

**DÖNER MİL DİNAMİK SIZDIRMAZLIK
ELEMENLARININ GELİŞTİRİLMESİ VE
PERFORMANSININ YÜKSEK
DEVİR ALTINDA DENEYSEL VE SONLU ELEMENLAR
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Barış ENGİN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖNER MİL DİNAMİK SIZDIRMAZLIK ELEMANLARININ
GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSININ YÜKSEK
DEVİR ALTINDA DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

Barış ENGİN
0000-0002-3445-9843

Prof. Dr. Murat YAZICI
0000-0002-8720-7594
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Barış ENGİN tarafından hazırlanan “DÖNER MİL DİNAMİK SIZDIRMAZLIK ELEMANLARININ GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSININ YÜKSEK DEVİR ALTINDA DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

- | | | | |
|---------------|---|---|------|
| Başkan | : | Prof. Dr. Murat YAZICI
0000-0002-8720-7594
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Prof. Dr. Ali DURMUŞ
0000-0003-2487-7344
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Prof. Dr. Adem ONAT
0000-0003-4834-0648
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Dr. Öğr. Üyesi Zeynep PARLAR
0000-0003-0010-8866
İstanbul Teknik Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ
0000-0002-4452-5744
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
.././.....

B.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.

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

Barış ENGİN

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

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

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

Prof. Dr Murat YAZICI
Tarih

Barış ENGİN
Tarih

İmza

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

İmza

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

ÖZET

Doktora Tezi

DÖNER MİL DİNAMİK SIZDIRMAZLIK ELEMANLARININ GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSININ YÜKSEK DEVİR ALTINDA DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Barış ENGİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Elektrikli araç kullanımının her geçen gün artmaktadır. Elektrikli araçların aktarma organlarında kullanılan döner mil keçelerinin çalışma koşulları, içten yanmalı motorlara göre daha zordur. Elektrikli araçlarda kullanılan döner mil keçelerinin maksimum çalışma sıcaklığı 150°C ve maksimum çalışma hızı 16 000 Rpm'dir. Standart bir yaylı döner mil keçesinde bu çalışma koşullarında başarılı olmasının imkansız olması bizi alternatif tasarımlara yöneltmiştir. Bu çalışmada öncelikle yüksek hızlarda çalışabilen alternatif spiral tırtıllı keçe tasarımı yapılmıştır. Alternatif olarak tasarlanmış yüksek devirli keçemiz, kullanım ömrünü belirlemek için test edilmiştir. İlk tasarım yüksek devirli keçemiz 7 günün sonunda 5 ± 0.3 g sızıntı vermiştir. Deney sonrası yapılan incelemelerde 7 gün sonunda tırtılların silindiği tespit edilmiştir. Tasarlanan ilk yüksek devirli keçenin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve radyal yük kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen radyal yük değeri ile deneysel radyal yük değeri karşılaştırıldığında %4,3 civarında bir sapma olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında Abaqus'te oluşturulan FEA modelinin doğruluğu kanıtlanmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli, I-sight yardımıyla sınır koşulları içinde optimize edilmiştir. Optimize edilmiş tasarım yüksek devirli keçenin bir prototipi üretilmiş ve ömür testi gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmiş tasarıma ait prototip yüksek devirli keçenin, aynı test koşulları altında 13 gün sonra 4 ± 0.3 g sızıntı gözlemlenmiştir. Elektrikli araç üreticisi firmaların talep ettiği kullanım ömrü 10 gün olduğu için yüksek devirli keçe üzerinde yapılan optimizasyon sonucu elde edilen yeni tasarım uygun bulunmuştur. Yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda ömrü %95 oranında iyileştirilmiş bir yeni yüksek devirli keçe geliştirilmiş ve performans testleri ile doğrulanarak, endüstrileşme aşaması için tez kapsamında birlikte çalışılan kuruluş SKT A.Ş ile sonuçlar paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döner Mil Keçesi, Yüksek Devir, Elektrikli Araç, Şanzıman, Sonlu Elemanlar Analizi, Sürtünme, Aşınma, Yüksek Sıcaklık, Elastomer, Kauçuk, Triboloji
2023, XV + 133 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPMENT OF HIGH SPEED ROTARY SHAFT SEALS AND FINITE ELEMENT AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SEAL PERFORMANCE

Barış ENGİN

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

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

The use of electric vehicles is expected to increase day by day. The operating conditions of the rotary shaft seals used in the powertrain of electric vehicles are more challenging than those of internal combustion engines. The maximum operating temperature of seal used in electric vehicles is 150° C and the max. operating speed is 16 000 Rpm. It is impossible for a standard seal with a garter spring not to leak under these operating conditions, which has led us to turn to alternative designs. First of all, alternative spiral knurled seal that can operate at high speeds was designed in this study. Our alternatively designed seal was tested to determine lifetime. The first design seal had 5g ± 0.3 of leakage at the end of 7 days. In the examinations made after the experiment, it was observed that the spirals were deleted at the end of 7 days. A finite element model of the first designed seal was created and radial load control was performed. When the radial load value obtained from the finite element model and the experimental radial load value are compared, it is seen that there is a deviation of around 4.3%. In the light of these data, the accuracy of the FEA model created in the Abaqus has been proven. The created finite element model was optimized within the boundary conditions with the help of I-sight. A prototype of the optimized design seal was produced and a life-time test was carried out. The prototype seal of the optimized design had 4 ± 0.3 g of leakage after 13 days under the same test conditions. Since the lifetime requested by the customer is 10 days, the optimization made on the seal is considered appropriate. The lifetime of the seal was approximately 95% improved.

Key words: Rotary Shaft Seals, High Speed, E-mobility car, Transmission, Finite Element Analysis, Friction, Wear, High Temperature, Elastomer; Rubber, Tribology
2023, XV + 133 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Murat Yazıcı'ya, gerek eğitim hayatım gerekse iş hayatındaki çalışmalarımındaki desteklerinden ötürü SKT A.Ş. adına Genel Müdürümüz Sayın A. Kaan TÜRKEKEL ve Ar-Ge Direktörümüz Sayın E. Timuçin BIYIKCI'ya, engin malzeme bilgisini benden esirgemeyen SKT A.Ş. Malzeme Ar-Ge Müdürümüz Sayın Ebru YILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmasının kapsamının akademik olarak detaylandırılmasındaki katkılarından dolayı Dr.Öğr.Üyesi Zeynep PARLAR'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Nermin ENGİN'e ve aileme çok teşekkür ederim.

Son olarak da bu tez çalışması 3190024 proje numaralı “Yeni Nesil Elektrikli Araçların Güç Aktarma Organları İçin Yüksek Devir Ve Sıcaklıkta Uzun Ömürlü Çalışacak Dinamik Sızdırmazlık Elemanı Geliştirilmesi” isimli proje kapsamında desteklenmiştir. Bu destekleri sebebiyle TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bariş ENGİN
.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1.Dudaklı Döner Mil Keçeleri	4
2.1.1.Keçe Tipleri	7
2.2.Keçe Dizaynının Temelleri	7
2.2.1.Dinamik Keçe Sızdırmazlık Mekanizması	9
2.2.2.Dudak Helisleri	13
2.2.3.Keçe Performans Limitleri.....	15
2.3.Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	20
2.3.1.Sonlu Elemanların Tarihsel Gelişimi.....	20
2.3.2.Uygulama Alanları.....	21
2.3.3.Sonlu Elemanlar Çözümlerinde Kullanılan Eleman Çeşitleri	24
2.4.Hiperelastik Malzeme Modelleri	25
2.4.1.Mooney-Rivlin Modeli	26
2.4.2.Neo-Hookeen Modeli	26
2.4.3.Ogden Modeli	27
2.4.4.Yeoh Modeli	28
2.5.Malzeme Katsayılarının Elde Edilmesi	29
2.5.1.Katsayılarının Elde Edilmesi İçin Gerekli Malzeme Deneyleri	29
2.5.2.Çekme Deneyleri	30
2.5.3.Tek Eksenli Çekme Deneyleri	31
2.5.4.Çift Eksenli Çekme Deneyleri	32
2.5.5.Bası Deneyleri.....	34
2.5.6.Tek Eksenli Bası Deneyleri	34
2.5.7.Kayma Deneyi	36
2.6.Optimizasyon	38
2.6.1.Optimizasyon Modellerinin Oluşturulması.....	39
2.6.2.Doğrusal Programlama Modelleri.....	40
2.6.3.Tamsayı-Karışık Doğrusal Programlama Modelleri.....	40
2.6.4.Doğrusal Olmayan Programlama Modelleri.....	41
2.6.5.Tamsayı-Karışık Doğrusal Olmayan Programlama Modelleri	41
2.7.I-Sight Programında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları.....	41
3. MATERYAL ve YÖNTEM	47
3.1. Malzeme Geliştirme.....	47
3.2. Malzeme Karakterizasyonu	49
3.2.1.Yoğunluk Ölçümü.....	50
3.2.2.Tek Eksen Çekme Deneyi.....	51
3.2.3.Çift Eksen Çekme Deneyi.....	52
3.2.4.Düzlemsel Kayma Deneyi	53
3.2.5.Basma Deneyi	54

3.2.6. Isıl Uzama Katsayı Saptama Deneyi.....	55
3.2.7. Isıl İletkenlik Katsayı Saptama Deneyi.....	56
3.2.8. Kuru Sürtünme Katsayı Saptama Deneyi	56
3.2.9. Yağlı Sürtünme Katsayı Saptama Deneyi.....	57
3.2.10. SEM Testi	59
3.3. Ürün Tasarım	61
3.3.1. Prototip Üretim	62
3.3.2. Tasarım Doğrulama ve Test.....	69
4. BULGULAR.....	78
4. 1. Garter Yaylı Keçeye Ait Sonlu Elemanlar Çalışması.....	78
4. 1.1. Ürün Tasarım	81
4. 1.2. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	84
4. 1.3. Analiz Modelinin Oluşturulması.....	84
4. 1.4. Mesh Yapısı	85
4. 1.5. Sınır Şartlar	85
4. 1.6. Malzeme Modeli	86
4. 1.7. İlişkilerin Tanımlanması	86
4. 1.8. İşin Oluşturulması	88
4. 1.9. Sonuçların Değerlendirilmesi	89
4.2. Yüksek Devirli Keçe Tasarımı ve Sayısal Doğrulaması.....	89
4.2.1. Ürün Tasarım	90
4.2.2. Sonlu Elemanlar Modeli Oluşturulması.....	94
4.2.3. Analiz Modelinin Oluşturulması.....	94
4.2.4. Mesh Yapısı	97
4.2.5. Sınır Şartlar	98
4.2.6. Malzeme Modeli	99
4.2.7. İlişkilerin Tanımlanması	101
4.2.8. İşin Oluşturulması	103
4.2.9. Prototip Üretimi	106
4.2.10. Fonksiyon Testi.....	109
4.3. Tasarım Optimizasyonu	111
4.3.1. Optimizasyon Çalışmaları.....	111
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	119
KAYNAKLAR	122
EKLER.....	127
ÖZGEÇMİŞ	132

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E	Elastiklik Modülü
ϵ	Birim Şekil Değişimi
σ	Gerilme
Ra	Ortalama Pürüz Yüksekliği
Rt	Maksimum Pürüz Yüksekliği
α	Keçe Dudağının Yağ Tarafı Açısı
β	Keçe Dudağının Hava Tarafı Açısı
W	Birim Şekil Değişimi Potansiyel Enerjisi
I	Uzama Invariantları
Λ	Uzama Oranı
J	Deforme Hacmin Deforme Olmamış Hacme Oranı
μ	Sürtünme katsayısı
Ts	Sürtünme Momenti
σ_{ort}	Ortalama Gerilme
L	Keçe Dudağının Temas Genişliği

Kısaltmalar	Açıklama
ACM	Poliakrilik Kauçuk
FEA	Finite Elements Analysis
FKM/FPM	Floroelastomer Kauçuk
HNBR	Yüksek Yoğunluklu Nitril Butadien Kauçuk
NBR	Nitril Butadien Kauçuk
PTFE	Politetra Fluoroetilen
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
TPU	Termoplastik Poliüretan
VMQ	Silikon
OEM	Ana Sanayi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Sızdırmazlık Elemanları İçin Kategorilerinin Şematik Gösterimi.....	2
Şekil 2.1. Keçe Terimleri.....	3
Şekil 2.2. Keçe Tasarımını Etkileyen Faktörler.....	5
Şekil 2.3. Keçe Etkiyen Faktörler.....	6
Şekil 2.4. Sızdırmazlık Elemanı Tasarım Gösterimi.....	8
Şekil 2.5. Yaygın Kullanılan Keçe Tipleri.....	9
Şekil 2.6. Keçe Dudağının Basınç Dağılımı.....	10
Şekil 2.7. Keçe Dudağının Basınç Dağılımı Gösterimi.....	11
Şekil 2.8. Hidrodinamik Etki.....	11
Şekil 2.9. Arzu Edilmeyen ve Arzu Edilen Keçe Dudağı Yüzey Görüntüsü....	13
Şekil 2.10. Değişik Helis Türleri.....	14
Şekil 2.11. Isı Artışının Mil Çapına Bağlı Olarak Dağılım Grafiği.....	16
Şekil 2.12. Elastomer Seçim Grafiği.....	17
Şekil 2.13. Keçe Elastomerlerinin Performans Sınırları.....	18
Şekil 2.14. Maksimum Salgılı Çalışma Koşulları.....	18
Şekil 2.15. Farklı Derecedeki Motor Yağlarında Tüketilmiş Enerji.....	19
Şekil 2.16. Tıp Biliminde Kullanılan Analiz.....	21
Şekil 2.17. Tek Boyutta İfade Edilen Sonlu Eleman Çesidi.....	24
Şekil 2.18. Çift Boyutlu Sonlu Eleman Örneği.....	24
Şekil 2.19. Dörtgenler Ailesi Eleman Örnekleri.....	25
Şekil 2.20. Kauçuk Mekaniğinde Yapılan Testler.....	30
Şekil 2.21. Tek Eksen Çekme Testi.....	31
Şekil 2.21. Tek eksenli çekme testi sonuç grafiği.....	32
Şekil 2.22. İki Eksen Doğrultusunda Çekme Deneyi Yapılacak Düzenek.....	33
Şekil 2.23. Çift Eksenli Çekme Testi Sonuç Grafiği.....	33
Şekil 2.24. Basma Testi Deney Düzenegi.....	35
Şekil 2.25. Basma Testi Sonuç Grafiği.....	36
Şekil 2.26. Basit Kayma Deney Düzenegi.....	37
Şekil 2.27. Basit Kayma Deney Testi Sonuç Grafiği.....	37
Şekil 3.1. Reçete Alternatifleri.....	48
Şekil 3.2. Tez Kapsamında Hazırlanan Numunelere Ait Görseli.....	49
Şekil 3.3. Tez Kapsamında Hazırlanan Numunelere Ait Görseller.....	50
Şekil 3.4. Yapılan Yoğunluk Ölçümüne Ait Bir Örnek.....	51
Şekil 3.5. Yapılan Tek Eksenli Çekme Deneyine Ait Bir Örnek.....	52
Şekil 3.6. Yapılan Çift Eksenli Çekme Deneyine Ait Bir Örnek.....	53
Şekil 3.7. Yapılan Düzlemsel Kayma Deneyine Ait Bir Örnek.....	54
Şekil 3.8. Yapılan Düzlemsel Kayma Deneyine Ait Bir Örnek.....	55
Şekil 3.9. Isıl İletkenlik Deney Sonuçları.....	56
Şekil 3.10. Kuru Sürtünme Deneyi.....	57
Şekil 3.11. Yağlı Sürtünme Deneyi.....	58
Şekil 3.12. SEM Görüntüsü.....	59
Şekil 3.13. Keçe Bileşenleri.....	63
Şekil 3.14. Bilezik Resmi.....	64
Şekil 3.15. Fosfat Hattı.....	65
Şekil 3.16. Yapıştırıcı Hattı.....	65
Şekil 3.17. Hamur Üretim Hattı.....	66

Şekil 3.18.	Ön-Şekil Üretim Hattı.....	66
Şekil 3.19.	Yay Üretim Hattı.....	67
Şekil 3.20.	Yay Ekleme Hattı.....	67
Şekil 3.21.	Kompresyon Presler.....	68
Şekil 3.22.	Postkür Fırını.....	68
Şekil 3.23.	Kesme Operasyonu.....	69
Şekil 3.24.	Teknik Resim.....	70
Şekil 3.25.	Profil Kontrol.....	71
Şekil 3.26.	Radyal Yük Ölçüm Cihazı.....	72
Şekil 3.27.	Test Benchleri.....	72
Şekil 3.28.	Yüksek Devirli Test Bench Tasarımı.....	73
Şekil 3.29.	Yüksek Devirli Test Cihazı.....	74
Şekil 3.30.	Profil Kesimi.....	75
Şekil 3.31.	Aşınma Ölçümü.....	75
Şekil 3.32.	Örnek Test Raporu.....	77
Şekil 4.1.	Radyal Yük Ölçüm Cihaz Şeması.....	78
Şekil 4.3.	Kiriş Hareketi.....	80
Şekil 4.4.	Makro Görüntüsü.....	80
Şekil 4.5.	Keçenin 3-D Görüntüsü.....	81
Şekil 4.6.	Bilezik Kesit Görüntüsü.....	82
Şekil 4.7.	Bilezik Kesit Görüntüsü.....	82
Şekil 4.8.	Teknik Resim.....	83
Şekil 4.9.	Kauçuk Kalıp Teknik Resim Kesiti.....	83
Şekil 4.10.	Kauçuk Form.....	84
Şekil 4.11.	Ağ Yapısı.....	85
Şekil 4.12.	Montaj.....	86
Şekil 4.13.	Malzeme Modeli.....	86
Şekil 4.14.	Kontakt Tanımlaması.....	87
Şekil 4.15.	Yay Tanımlaması.....	87
Şekil 4.16.	Çözüm.....	88
Şekil 4.17.	Montaj Durumu.....	88
Şekil 4.18.	Montaj Akışı.....	89
Şekil 4.19.	Keçenin 3D görüntüsü.....	90
Şekil 4.20.	Bilezik Kesit Görüntüsü.....	91
Şekil 4.21.	Keçenin Kesit Görseli.....	91
Şekil 4.22.	Teknik Resim.....	92
Şekil 4.23.	Montajlı Durum.....	92
Şekil 4.24.	Sac Kalıp Teknik Resim Kesiti.....	93
Şekil 4.25.	Kauçuk Kalıp Kesiti.....	93
Şekil 4.26.	Kesme Aparatı.....	94
Şekil 4.27.	Kauçuk Form.....	95
Şekil 4.28.	Metal Form.....	95
Şekil 4.29.	Milin Eksenel Simetrik Modeli.....	96
Şekil 4.30.	Analiz Adımlarının Tanımlanması.....	97
Şekil 4.31.	Sonlu Eleman Modeli Ağ Yapısı.....	98
Şekil 4.32.	Yer Değiştirme Şartı.....	99
Şekil 4.33.	Metal Malzeme Atanması.....	100
Şekil 4.34.	Malzeme Verilerinin Abaqus Ekranına Girilmesi.....	100

Şekil 4.35.	Malzeme Katsayıları.....	101
Şekil 4.36.	Kontak Bilgisi Tanımlama Ekranı.....	102
Şekil 4.37.	Yay Bilgisi.....	102
Şekil 4.38.	Çözüm.....	103
Şekil 4.39.	Montaj Durumu.....	104
Şekil 4.40.	Kontak Basınç Dağılımı.....	104
Şekil 4.41.	Sıcaklık Durumu.....	105
Şekil 4.42.	Tırtıl Görünümü.....	105
Şekil 4.43.	Destek Bileziği.....	106
Şekil 4.44.	Kauçuk Ön-şekil.....	106
Şekil 4.45.	Vulkanize Ürün.....	107
Şekil 4.47.	Ölçüm Raporu.....	107
Şekil 4.48.	Araldit Aparatı.....	108
Şekil 4.49.	Araldite Montajlı Keçe.....	108
Şekil 4.50.	Test Raporu.....	110
Şekil 4.51.	Dudak Aşınmaları.....	111
Şekil 4.52.	Yüksek Devirli Keçe Ölçülerinin Numaralı Hali.....	112
Şekil 4.53.	Parametrik Model.....	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Keçe Tipleri.....	7
Çizelge 2.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Örnekleri.....	22
Çizelge 2.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Amaçları.....	23
Çizelge 3.1. Isıl Uzama Ölçümü.....	55
Çizelge 3.2. FKM Reçetesi.....	60
Çizelge 3.3. ACM Reçetesi.....	60
Çizelge 4.1. Radyal Yük Değerleri.....	89
Çizelge 4.2. Karşılaştırma.....	109
Çizelge 4.3. Test Programları.....	109
Çizelge 4.4. Ölçüm Sonuçları.....	112
Çizelge 4.5. Parametreler.....	114
Çizelge 4.6. Sınır Şartları ve Sonuçlar.....	116
Çizelge 4.7. Optimize Parça Ölçüleri.....	117
Çizelge 5.1. Geliştirilen Malzemeye Ait Mooney-Rivlin Katsayıları.....	120
Çizelge 5.2. Çözüm Sonuçları.....	120

1. GİRİŞ

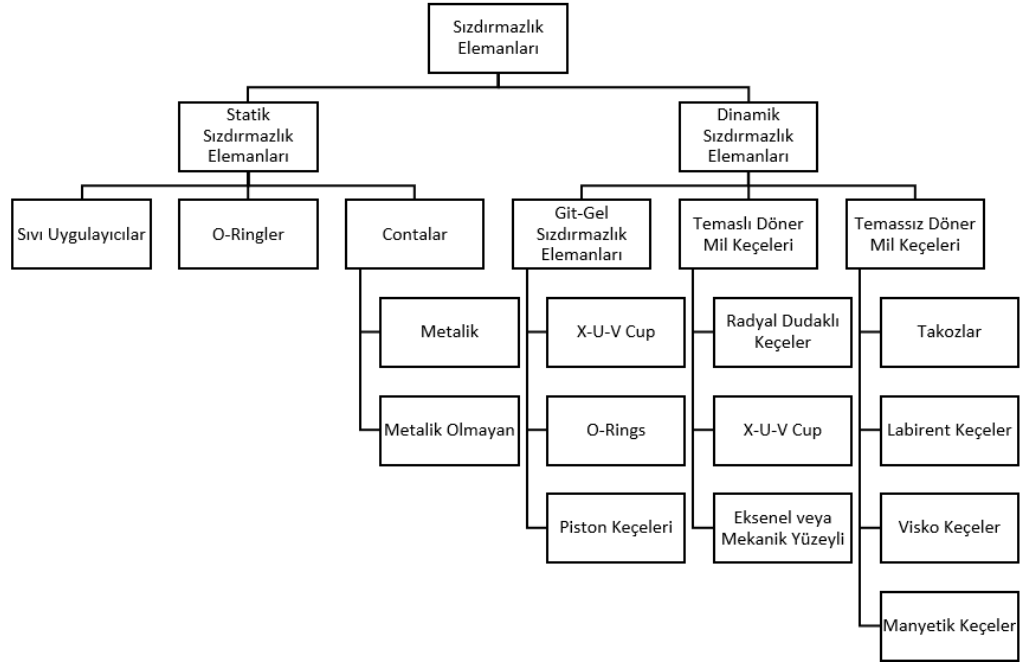
Gelişen teknolojiyle birlikte makinelere bağımlılığın artmasıyla sızdırmazlık elemanlarının önemi günden güne artmaktadır. Makinelerde yağlayıcıların, sıvıların, katıların ve gazların sızdırmazlığını sağlamak üzere çok değişik türlerde sızdırmazlık elemanları kullanılmaktadır. Özel sızdırmazlık elemanları tasarlanırken basınç ve vakum etkisi dikkate alınmaktadır. Sızdırmazlık sistemleri yağlayıcının dışarı çıkmasını önlerken aynı anda da dış ortamdan içeriye yabancı madde girişini önlemektedir.

Bazı sızdırmazlık sistemleri küçük seviyede sızıntıları tolere edebilirken bazı sızdırmazlık sistemleri hiçbir şekilde kaçağa müsaade etmemektedir. Eğer sistemde sızıntı toleransı mevcutsa maliyet artışını engellemek için hiçbir zaman sıfır kaçak hedeflenmez.

Sızdırmazlık elemanları statik ve dinamik olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Statik sızdırmazlık elemanları birbiri üzerinde sınırlı seviyede hareket eden iki makine elemanı arasında kullanılırlar. Standart statik sızdırmazlık elemanlarına metal gasketler, metal olmayan contalar, elastomer o-ringler örnek olarak verilebilirler. Sıvı sızdırmazlık elemanları da statik sızdırmazlık elemanlarının bir çeşididir.

Dinamik sızdırmazlık elemanları dönen, git-gel hareketi yapan veya salınım hareketi yapan miller için kullanılır. Paket keçeler, o-ringler, radyal mil keçeleri ve piston sıyrıcıları git-gel hareketi yapan mil sistemlerinde kullanılırlar.

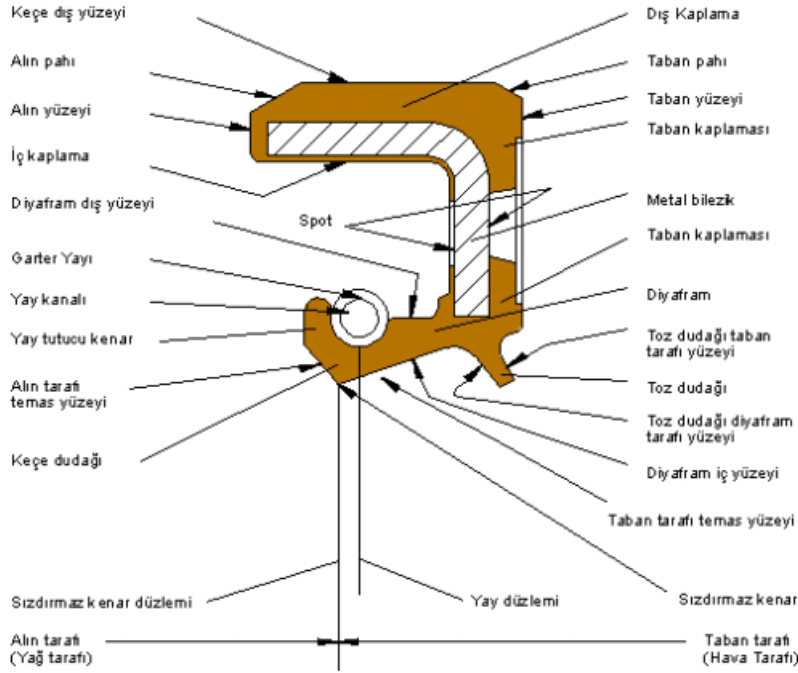
Hem temaslı hem de temassız keçeler tasarımları döner mil sistemlerinde kullanılırlar. Mile temas etmeyen sızdırmazlık sistemleri takozlar, labirentler, visko ve manyetik keçeler olacak şekilde dört ana kategori altında toplanmıştır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Sızdırmazlık Elemanları İçin Kategorilerinin Şematik Gösterimi (Türkel 2015)

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Hareketli mille çalışan sistemler için kullanılan en yaygın sızdırmazlık elemanı temaslı olanlardır. Sızdırmazlık elemanlarının temas edenlerinin en kolay temin edileni ve en ucuz olanı da döner mil keçeleridir. Standart bir keçe için tanımlamaların iyi şekilde bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 2.1. Keçe Terimleri (Türkel 2015)

Döner mil keçeleri otomotivde, traktörlerde, endüstriyel pompalarda, uçaklarda vb. uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Her uygulama kendine özgü şartnamelere sahiptir. Bu sebepten dolayı döner mil keçesi tasarımlarına ait kritik detaylar çoktur. Uygun bir döner mil keçesi seçilirken çalışma boşluğu, sürtünme, kaçak vb. parametreler göz önünde bulundurulurlar.

Sabit haldeki bir yuva ile dönen bir mil arasında sızdırmazlık sağlamak için kullanılan makine elemanları genel tabirle döner mil keçesi (rotary shaft seal) olarak bilinirler.

Keçelerin adlandırılmaları ise kullanıldıkları yere örneğin; porya keçesi, diferansiyel keçesi, piston keçesi vb. şekillerde yapılır Makine elemanları derslerinde anlatılan en

kritik elemanlardan biridir. Otomotivden başlayarak birçok özel alanda elastomer dudaklı keçeler kullanılmaktadır (Johnston ve ark. 1984).

Elastomer dudaklı keçelerin genellikle dönel sistemlerde bulunan yağın bir yerden bir yere geçişini engellemek ana görevidir. İlave olarak, yabancı parçacıkların bir uygulama bölgesine girişini veya şanzımanlardan ve rulmanlardan yağ kaybını önlemek için de tedarik sağlayabilir.

Elastomer dudaklı keçelerin sıvıyı bir yerden bir yere geçirmemesi tek başarı kriteri olmamaktadır. Çalışma esnasında oluşan aşırı dereceli aşınma bandı da kabul edilmez. İyi tasarlanmış döner mil keçeleri, düşük sürtünme ve düşük aşınma oranı için hareketli yüzeyde ince bir akışkan film ile kabul edilebilir derecede düşük bir sızıntı seviyesi üretir. Standart şekle sahip elastomer dudaklı keçeler destek bileziği, elastomer yapı ve ön gerilme sağlayan garter yaydan oluşur.

2.1.Dudaklı Döner Mil Keçeleri

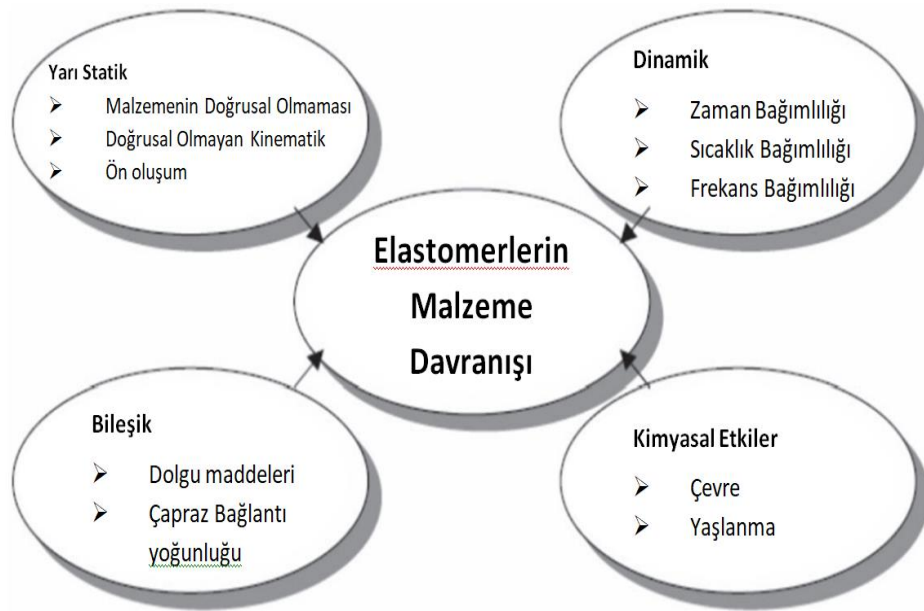
1930 yılların başında deriden yapılmış dudaklı keçeler kullanılmaya başlanmıştır. 50 yıllık matematiksel ve ampirik gelişmeler sonrası 1990 yıllarında keçelerin nasıl çalıştıkları detaylı bir şekilde anlaşılmıştır. Dudaklı keçeler genellikle dört alt kategoriye bölünmüştür (Horve 1996).

1. Elastomerik Dudaklı Keçe: Döner millerde akışkanların içeriye veya dışarıya çıkışını önlemek amacıyla kullanılır.
2. PTFE / Plastik Keçe: Elastomer keçelere alternatif olarak özellikle yağlamanın mevcut olmadığı kuru sürtünmeli uygulamalarda ve ısı direnç ile kimyasal dayanım gereken yerlerde kullanılır.
3. Düşük Sürtünmeli Keçeler: Elastomerik veya PTFE keçelerin daha ileri ve özel uygulamalarını kapsamaktadır.
4. Yatak/Rulman Keçeleri: Dudaklı keçelerden türetilmekle birlikte genellikle düşük yükler fakat aşırı kirli ortamlarda kullanılırlar.

Elastomer dudakların veya PTFE dudakların sızdırmazlık sisteminin sadece bir parçasının olduğu unutulmamalıdır. Yuva sızdırmazlık elemanının montaj edildiği

boşluktur. Mil ise keçe dudağıyla temas ederek dönem hareketi yapan parçadır. Dudaklı keçelerle etkileşim içerisinde olan millerin yüzey pürüzlülükleri ve işleme metotları sızdırmazlık açısından önemli parametrelerdir.

Çağımızda savunma sanayisinin önem kazanması sebebiyle elastomer dudaklı keçelerin teorisi üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Elastomer malzemelerin matematiksel hesaplamalarında kullanılması için hiperelastik malzeme modelleri geliştirilmiştir. En yaygın olarak kullanılanlar polinom formları (Rivlin serisi), Ogden ve Neo-Hookean modellerinden birisidir. Her iki form için de malzeme modelinin kararlılığı sorusu dikkate alınmalıdır. Elastomer bileşenlerin FE hesaplamalarında, hiperelastik malzemenin doğrusal olmayan malzeme davranışı, sonuçları önemli ölçüde etkiler (Bien-aimé ve ark. 2020) Bu nedenle, simülasyonlardan arıza ve ömür tahminleri açısından güvenilir sonuçlar elde etme yeteneği, genel üç boyutlu gerilme ve deformasyon durumları için malzemenin davranışının kesin modellenmesine dayanmaktadır (Bhandari ve ark. 2007). Yapılan malzeme testlerinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplama modellerinden en uygunu seçilmelidir (Li ve ark. 2002). Metalik özelliğe sahip malzemelerin sonlu elemanlar yazılımı programına tanımlanması için genel geçer katsayılar kullanılabilir ancak hiperelastik malzemeler için deneysel verilere ihtiyaç vardır. Aşağıdaki fiziksel ve kimyasal olaylar, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi simülasyon içinde dikkate alınmalıdır.

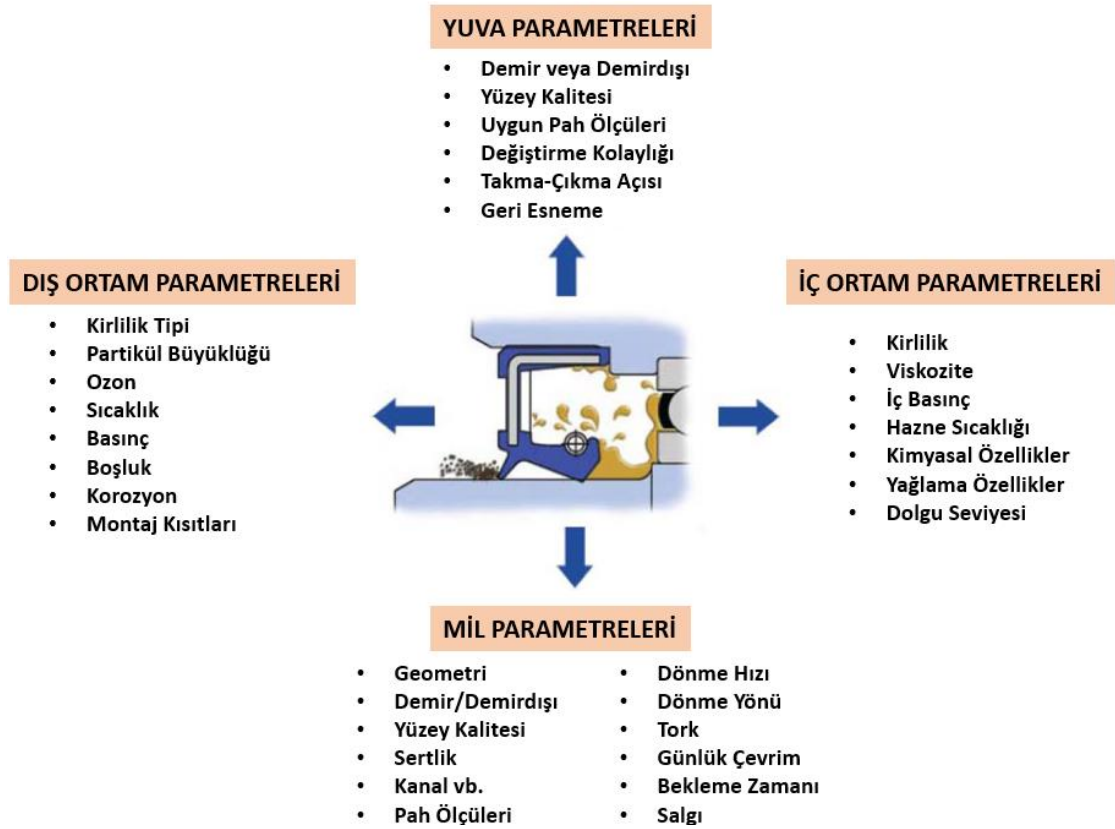


Şekil 2.2. Keçe Tasarımını Etkileyen Faktörler (Türkel 2015)

Hemen hemen tüm makinelerde kullanılması sebebiyle elastomer dudaklı keçelerin sonlu elemanlar çalışmaları hakkında çok sayıda bilimsel makale yayınlanmıştır (Zhang ve ark. 2019)

Bir başka makalede, sızdırmazlık elemanlarının tiplerinin yük etkisi altında nasıl değişeceği konusunda çalışma yapılmış olup, C tipi elastomer dudaklı keçeleri önerilmiştir (Zhou ve ark.2015). Zhou ve arkadaşları eski zamanlarda yüksek işlemcili bilgisayarların olmaması nedeniyle çözüm süresini kısaltmak amacıyla çalışma yapmışlardır. Analiz dünyasına iki boyutlu aksel simetrik modeli tanıtmışlardır. %5 gerilme üst sınırını aşmaması sebebiyle Mooney-Rivlin modeli kullanılmıştır.

Elastomer dudaklı keçelerde kullanılan malzemenin hiperelastik malzeme olması sebebiyle analiz metodunun implicit yerine explicit seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. (Calonius ve ark. 2005).

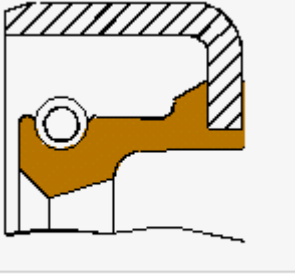
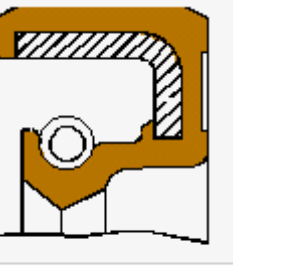


Şekil 2.3. Keçe Etkiyen Faktörler (Flitney 2014)

2.1.1.Keçe Tipleri

Döner mil keçelerinin tasarımları yapılırken mil ve yuva çapları öncelikli dikkate alınırken çalışma yağı da ikinci bir şekilde incelenir. Keçeler firmaların kendi sınıflandırmalarına göre adlandırılır. Bazı OEM firmaları ise DIN 3760' a göre keçe tiplerini sınıflandırır.

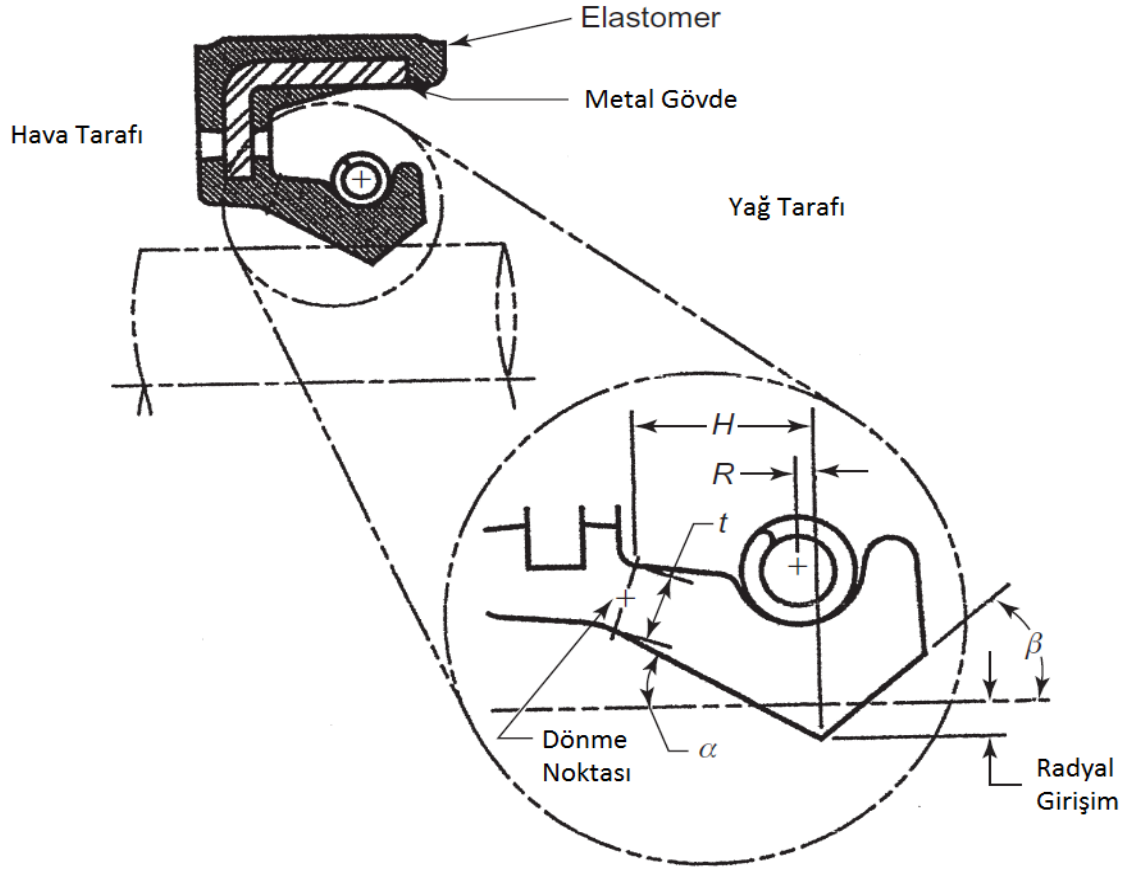
Çizelge1.1 Keçe Tipleri (Türkel 2015)

 <p style="text-align: center;">L1</p>	Elastomer dudaklı bir keçedir. Dış çapında metal bir yüzey mevcuttur.
 <p style="text-align: center;">L3</p>	Elastomer dudaklı bir keçedir. Dış çapında kauçuk malzeme mevcuttur. Yuva iç çapından kaynaklanan kaçakların önüne geçmek için yapılmıştır.

2.2.Keçe Dizaynının Temelleri

Standart bir döner mil keçesi elastomer dudak, metal bilezik ve garter yayından oluşmaktadır. Keçenin dudağı mil üzerinde 0.4 ± 0.1 mm'yi geçmeyecek şekilde temas etmelidir. Keçe dudağı üzerinde iki adet önemli açı oluşmaktadır. Bu açılardan yağ tarafına bakan açı, hava tarafına bakan açıdan büyüktür. Serbest halde kesit alınmış bir sızdırmazlık elemanında yağa bakan taraftaki β açısının değeri $38-44^\circ$ civarında iken hava tarafına bakan α açısı $24-31^\circ$ mertebelerindedir. Fakat verilen ön sıkılıktan dolayı bu açılar yaklaşık olarak 10° civarlarında değişmektedirler. Zamanla elastomerin gerilme gevşeme (stress relaxation) davranışı göstermesi nedeniyle garter yayı kullanılmaktadır.

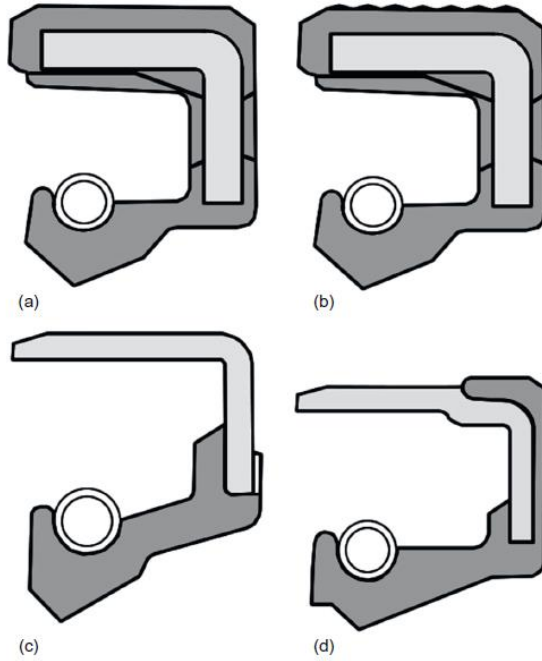
Garter yayının etkisiyle de asimetrik basınç dağılımı oluşturulmaktadır. Garter yayının etkisiyle yağ tarafında kısa, fakat keskin bir basınç dağılımı oluşur. Garter yayının diğer bir etkisiyle hava tarafında uzun, fakat doğrusal şekilde azalan bir basınç dağılımı mevcuttur. Test sonrası mil yüzey görüntüleri incelendiğinde yağ tarafının hava tarafına göre oranı 0,3 civarındadır. Bu asimetrik dağılım keçe sızdırmazlık mekanizmasının temel taşlarından biridir. Elastomer dudaklı bir keçe tasarlamak için Şekil 2.4'te verilen bilgiler kullanılmalıdır.



Şekil 2.4. Sızdırmazlık Elemanı Tasarım Gösterimi (Flitney 2014)

Keçe tasarımı yapılırken R değeri genellikle H değerinin 0.1' i olarak belirlenir. Yağ keçelerinde genellikle R değeri keçe dönme noktası veya hava tarafı yönündedir. Eğer tasarım yapılan keçe gres veya çamur keçesiye R değeri hava tarafının tam tersi yönündedir. İdeal olarak R değeri 0.35 mm civarındadır. R değerinin pozitif olması asimetrik basınç dağılımını oluşturan en büyük parametredir. Eğer R değeri negatif durumda olursa yağ kaçağı problemi oluşmaktadır. Keçeler çalışma ortamlarına göre

tasarlanırlar. Keçenin uygun tasarlanması için H, t ve dönme noktası uyum içerisinde oluşturulmuş olması gerekmektedir. Dudak boyununun arttırılması dinamik salgı değeri yüksek olan millerde faydalı sonuç vermektedir. Dudağa gelen basınç yüksekse H yüksekliğinin azaltılıp t kalınlığının arttırılması gerekmektedir. Standart keçeler çoğu zaman L tipinde metal desteklerle kalıplanmasıyla üretilmektedir. Keçelerin dış çaplarının hassasiyeti de bu metal bileziklerin hassasiyetiyle doğru orantılıdır. Keçenin çalışma sırasında titreşim etkisiyle yerinde çıkmasını önlemek için girişim verilmektedir. Dışı kauçuk keçeler yuva iç çaplarından herhangi bir kaçak ihtimali olacağı değerlendirildiği durumlarda kullanılırlar. Dışı metal olan keçeler demontaj kuvvetlerinin arttırılması amacıyla tasarlanırlar. Yaygın kullanılan keçe dış çaplarına örnekler Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Yaygın Kullanılan Keçe Tipleri (Flitney 2014)

2.2.1. Dinamik Keçe Sızdırmazlık Mekanizması

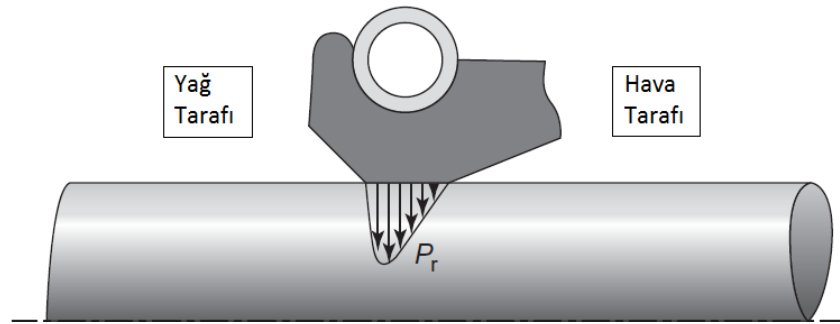
Kauçuk dudaklı keçeler üzerine yapılan araştırmalar 50 yılı aşkın süredir devam etmektedir. Dudaklı keçeler ve mil arasında belirli seviyede yağ filmi gerekliliği 1957 yılında ilk defa dile getirilmiştir. 1957 yılından günümüze kadar tecrübeye dayalı ve sayısal analiz çalışmaları devam etmektedir. Araştırmalar sonucunda dudaklı keçelerin

sızdırmazlık mekanizmaları hakkında onaylanarak denenen iki temel kuram bulunmaktadır. Her iki kuramda da “içe doğru pompalama” diye bilinen yağın menisküs yapısı altında tekrardan geriye döndüğü esas alınmıştır. Keçelerin sızdırmazlığı hakkında iki temel mekanizma mikro mekanizma ve makro kuramlardır.

Mikro araştırmalar konusunda son 45 yıldır üzerinde çalışılan tüm sonuçlar ünlü bir araştırmacı olan Salant tarafından özetlenmiştir (Salant 1992). Salant’a göre elastomer dudaklı keçelerin uygun çalışması için iki temel tasarım kriteri vardır (Salant 1992).

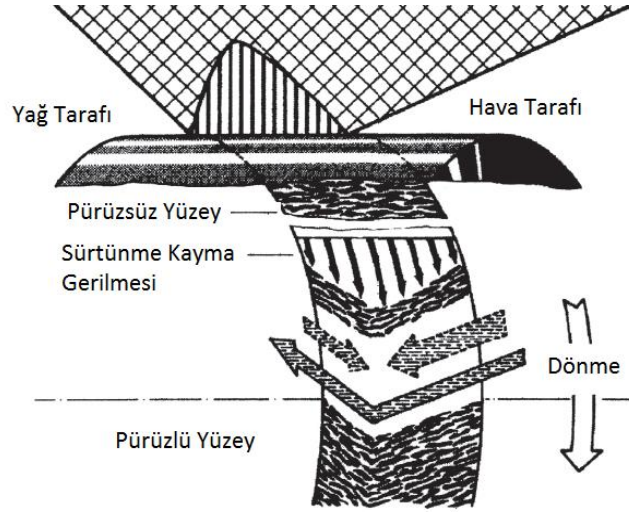
1. Keçe asimetrik geometrisi
2. Keçenin montaj sonrası temas yüzeyindeki dudak yüzeyi dokusu / yapısı

Sızdırmazlık tasarımı yapılan ürün ait dudak ya keskin köşe olacak şekilde trimlenir ya da kalıptan bu şekilde üretilir. İlk kalkış çalışmasından sonra keçe dudağıyla mil arasında yaklaşık 0.2-0.3 mm arasında bir kontak bandı oluşur. Bu kontak bandı keçe ömrünü tamamladıktan sonra aşınma bandının genişliği 0.5 mm’leri geçebilmektedir. Aşınma bandının 0.5 mm’leri geçmesi durumunda kontak basıncındaki asimetrik oluşum bozulur ve sızıntı meydana gelir. Sızdırmazlık elemanının çalışma bölgesinde kaçak beklenmektedir. Sızdırmazlık elemanının dudağının boyu ve dudağının kalınlığı mil yüzeyinde oluşan temas basınç profilini oluşturur. Bu profilde dudağın keskin köşesinde basınç maksimum olurken kenarlara gittikçe düşer ve sifıra ulaşır. Bu durumu özetleyen durum Şekil 2.6’da görülmektedir. Keçe dudağında oluşan basınç dağılımı yağ dudak tarafında daha yüksek olmasına rağmen hava tarafında temas daha uzundur.



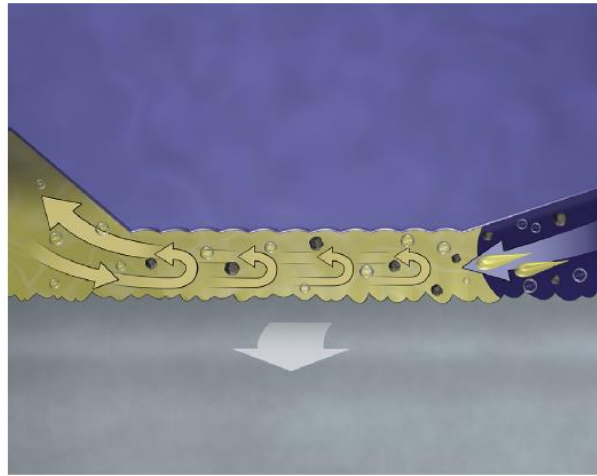
Şekil 2.6. Keçe Dudağının Basınç Dağılımı (Flitney 2014)

Çalışma ortamında mil dönmeye başladığında belirli bir süre sonra keçe dudağında aşınmaya sebep olacaktır. Bunun sonucu olarak da dudak yüzeyinde mikro boyutta pürüzlülük oluşacaktır.



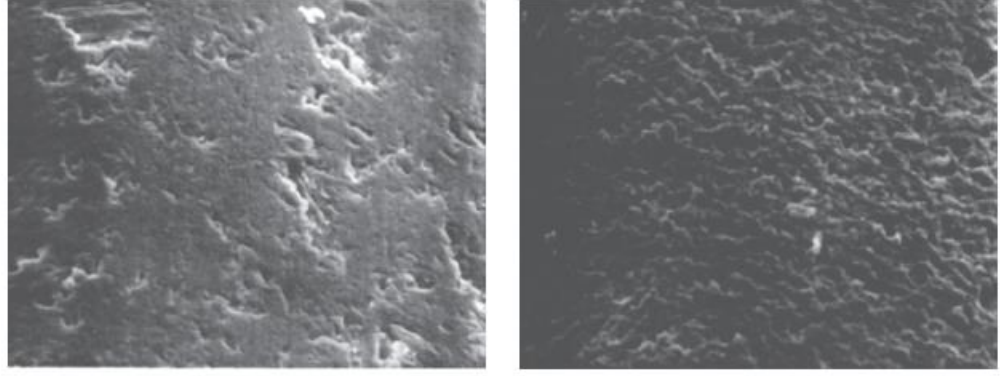
Şekil 2.7. Keçe Dudağının Basınç Dağılımı Gösterimi (Flitney 2014)

Mil dönüşün etkisiyle bu pürüzler yağ tarafına yönelerek yağı pompalama yapar. Şekil 2.7 de bu durumu şematik olarak görülmektedir. Keçe dudağında oluşan mikro hidrodinamik etkiler hem keçe dudağının yukarı kalkmasını hem de yağın geriye pompalanmasını sağlamaktadır. Bahsedilen teori sızdırmazlık elemanının her iki yönünde de geçerlidir. Her iki tarafta geçerli olmasına rağmen hava yüzeyinde yüzey pürüzlülük değerinin yağ yüzeyinden daha fazla olması sebebiyle menisküs hareketi yağ tarafına doğrudur. Yüzey pürüzlülük parametrelerinin yanında yağ tarafında oluşmuş keskin ve asimetrik basınç yardımıyla yağ dudak altından dönerek geri pompalama eğilimi içindedir. Hava tarafından gelen akış da keçenin sızdırmazlık fonksiyonu için yardımcıdır. Bu olay hidrodinamik akışla Şekil 2.8’de anlaşılır şekilde resmedilmiştir.



Şekil 2.8. Hidrodinamik Etki (Türkel 2015)

Keçeler ilk olarak kullanılmaya başlanıldığında pürüzlülük dağılımını rastgele olduğu için keçe her yönde benzer bir sızdırmazlık durumuna sahiptir. Belirli bir süreden sonra hareket durdurulduğunda kauçuğun gerilim gevşeme özelliğine bağlı olarak geri dönüş özelliği kaybolmuş olacaktır. Sonuç olarak ters yönlü dönüşler ana dönüş yönlerine göre daha etkin hale gelecektir. Pek çok çalışma bu teoriyi desteklemektedir. Pompalama hareketi elastomer üzerinde oluşan mikro boşluklar sayesinde sağlanmaktadır. Karşı yüzey olarak kullanılan milin yüzeyi de bir o kadar önemli etkindir. Yüzey kalitesi elastomer dudaklı keçe yüzeyinin mil yüzeyiyle iyi bir şekilde örtüşmesinin yanında uygun bir akışkan filmi oluşturmaya yaramaktadır. Döner mil keçesinin çalışacağı milin tornalama işlemiyle değil taşlama işlemiyle yapılması gerekmektedir. Standart taşlama veya tornalama işlemiyle oluşturulmuş mil yüzeylerinde istenilmeyecek düzeyde çizgisel izler oluşturmaktadır. Bu durumda mil sızdırmazlık elemanı üzerinde adeta tırtıl bulunuyormuş gibi çalışmaktadır. İstenmeyen çizgilerin yönünün yağ tarafına olması durumunda pompalama artarken tam tersi durumda pompalama azalır. Milin üzerinde oluşan açının yönü kaçağa sebep verebilir veya tırtıl etkisi göstererek pompalama oranını arttırır. Özellikle krank ön ve krank arka keçelerinin dönme yönlerinin kontrollü sağlanması sebebiyle bazen mikro yivler önemli fayda sağlamaktadır. T, milin mikro yivlere bağlı pompalama oranı keçenininkinden daha düşük olacağı için sızdırmazlık yine başarılı bir şekilde sağlanmış olacaktır. Döner mil keçe dudaklarının yağlanmasında temel mekanizma mikro pompalama mekanizmasıdır. Bu mekanizmanın verimli bir şekilde çalışması için dudağın konumlandırılma noktası oldukça önemlidir. Öncesinde de anlatıldığı gibi sadece doğru geometri değil uygun elastomerinde kullanılması bizi uygun sonuca götürür. Şekil 2.9'da arzu edilmeyen ve arzu edilen iki değişik dudağa ait yüzeylerin görüntüsü verilmiştir. Şekil 2.9-A'da görülen homojen olmayan ve yer yer yüzeyde yer alan derin çukurların sızdırmazlık üzerinde negatif etkisi mevcuttur. Şekil 2.9-B'deki gibi homojen ve derin olmayan asperasyon boşluklarının keçe sızdırmazlığı üzerinde olumlu etkisi mevcuttur (Horve 1996).



Şekil 2.9 Arzu Edilmeyen (solda) ve Arzu Edilen (sağda) Keçe Dudağı Yüzey Görüntüsü

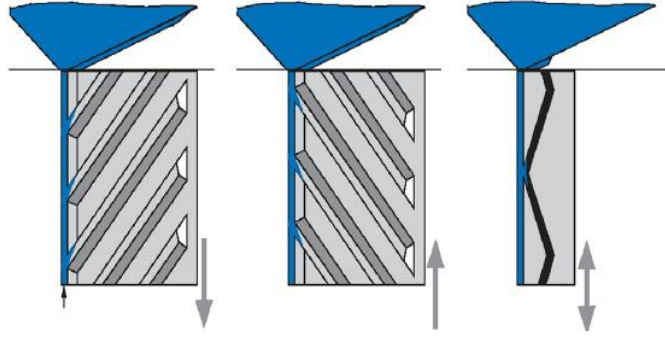
Döner dudaklı keçelerin uygun bir halde montaj yapılabilmesi için mil yüzey şekli oldukça önemlidir. Standart döner mil keçesinin karşıt yüzeyini oluşturan milin yüzey pürüzlülüğü 0.20- 0.85 μm Ra dır. Sızdırmazlık elemanı yüzeyinin pürüzlülüğü istenilen düzeye göre çok düşükse mikro yüzeyler oluşamayacağı için erken kaçaklar görülmektedir. Eğer yüzey pürüzlülüğü maksimum değer üzerinde olursa keçe dudığında istenilmeyen düzeyde bir aşınma meydana gelir ve bu sebeple ilerleyen süreçlerde kaçak meydana gelir. Döner mil keçelerinde kaçak durumunu etkileyen önemli parametrelerden biri de (milin dönüşü esnasında yaptığı) salgıdır. Eğer milin çalışması esnasında salgı 0.2 mm'yi geçerse keçe dudaklarından kaçaklar meydana gelmektedir. Bu salgı hareketi keçe dudaklarının bir bölgesinde radyal kuvveti artırırken diğer tarafta da radyal kuvveti azaltır. Bu etkiyi meydana getiren diğer bir sebep ise hatalı montaj operasyonudur. Eğer keçe yuvaya montaj edilirken açılı montaj işlemi yapılırsa keçe çalışmaya başlamadan önce statik bir salgı ile karşı karşıyadır. Bu durumda döner milin hareket etmesiyle birlikte keçe dudağı istenilen şekilde bir alanı dalgalanma hareketiyle süpürmektedir. Bu dalgalanma hareketi de aksel yönde yağın geriye pompalanmasında rol oynamaktadır. İlave olarak salgıdan kaynaklı oluşan süpürme işlemi temas alanını artırması sebebiyle dudakta oluşacak sürtünme kaynaklı ısıyı düşürmektedir.

2.2.2.Dudak Helisleri

Standart döner mil keçelerinin büyük bir çoğunluğu daha önce anlatıldığı gibi dudak boyu, dudak kalınlığı ve yay mesafesi gibi kriterlere bağlı olarak çalışır. Bu durum yönlü keçe dudak çalışmalarında biraz daha farklıdır. Pompalama oranının artırılması için hava

tarafına özel geometriler oluşturulur. Bu geometriler mil yüzey oturtulduğu zaman dudağın temasını engellemeyecek şekilde küçük çıkıntı veya kabartı şeklindedir. Bunlara literatür çalışmalarında pompalama kanatçığı, hidrodinamik kanatçıklar veya sızdırmazlık destekleri gibi isimler verilir. 7 m/s hızın üzerinde çalışacak keçelerde dudak tek başına geri pompalama işlemi yapamaz. Dudak helisleri genellikle yüksek hızlarda çalışan keçelerin pompalama oranlarını arttırmak amacıyla eklenirler. Dönüş yönlerine veya dudak yapılarına göre çeşitli alternatifleri bulunmaktadır.

Sızdırmazlık elemanlarının yüksek hızlarda çalışma beklentisinin günden güne artması sebebiyle helis yapılarında değişiklikler yapılmıştır. Çok kullanılan helislere ait görseller Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

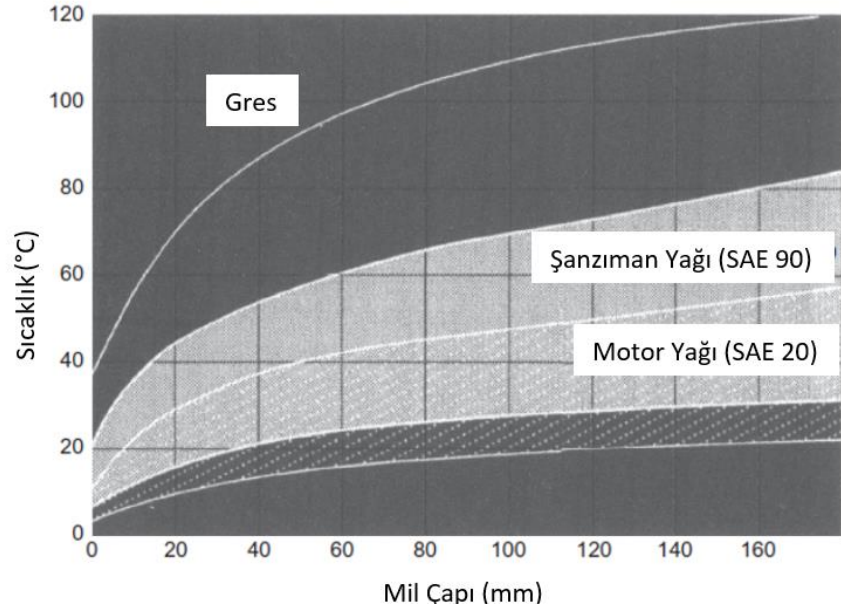


Şekil 2.10 Değişik Helis Türleri (Türkel 2015)

Döner mil keçelerinin çalışma koşullarında hareket yönü tanımlı olduğu için helis tipleri de hareket yönüne uygun şekilde tasarlanır. Bazı durumlarda tekerlek keçeleri veya şanzıman keçeleri gibi uygulamalarda mil hareket yönü tek yönlü değildir. Bu sebeple dudak yapısına bağlı olarak çift yönlü helisler tasarlanır. Transmisyon gibi iki yönlü dönüşlerin söz konusu olduğu durumlarda, Şekil 2.10'da gösterilen iki yönlü (bidirectional) kanatçık uygulamaları da mevcuttur. Avantajlarının yanı sıra bazen dezavantajlarının olma durumu da göz önüne alınmalıdır. Dezavantajlarının en önemlisi, bulaşık ya da karbonlaşmış yağ tortularının sızdırmazlık dudağına daha kolay şekilde ulaşmasıdır. Bu etki de keçeyi bozucu şekilde zorlamaktadır.

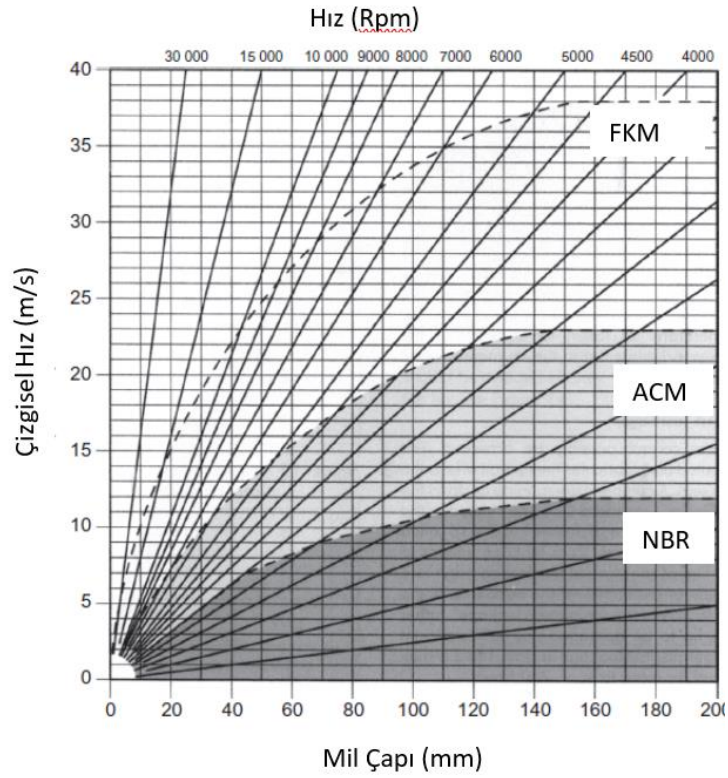
2.2.3.Keçe Performans Limitleri

Optimumum seviyede çalışacak bir sızdırmazlık sisteminde geometrik şekil dışında elastomer uyumu ve radyal yük önem kazanmaktadır. Bu yüzden elde edilebilecek her bir parametre mükemmel bir sızdırmazlık sistemi oluşturmak için önemlidir. Bu faktörden en önemli olanı da keçe dudağında sürtünme kaynaklı oluşan ısı enerjisidir. Keçeler mil yüzeyinde uzun bir süre çalıştığından dolayı sürtünme kuvvetinden kaynaklı şekilde bir ısı artışı meydana gelecektir. “Bu problemin boyutu tipik bir keçenin 50-60 mm’lik bir mil üzerinde çalışması sonucu yaklaşık 100 W’lık bir gücün tüketilmesi ile açıklanabilir” (Anonim 2015). Açığa çıkan bu enerji dudak-mil teması sebebiyle tüketilmektedir. Bu enerji sebebiyle oluşan sıcaklık yoğunluğu ise elektrikle çalışan bir ısıtıcıdan fazladır. Bunun anlamıysa dudak bölgesinin altında bulunan yağın gövdede bulunan yağa göre daha fazla ısınmasıdır. Mil çapına bağlı olarak keçe dudağı sıcaklıkları Şekil 2.11’de verilmiştir (Horve 1996). Bu grafikten anlaşıldığı gibi dudak bölgesinde bulunan yağ sıcaklıkları gövde bulunan yağın sıcaklıklarına göre 40°C den daha fazladır. Bu durumun elastomer seçimi esnasında dikkate alınması gerekmektedir. Bu sıcaklık farkı transmisyona yağları ve gres kullanılan ortamlarda daha fazladır. Birçok OEM firması transmisyonda oluşabilecek sıcaklığı 100°C olarak bildirmektedir. Fakat keçe dudağı bölgesinde oluşabilecek sıcak 140°C civarındadır (Türkel 2015). Bu sebeple malzeme seçiminde 140°C dikkate alınarak, FKM veya ACM elastomer malzemeler seçilmelidir. Keçenin ömrünü etkileyen en önemli parametrelerden biri de uygun elastomer seçimidir.



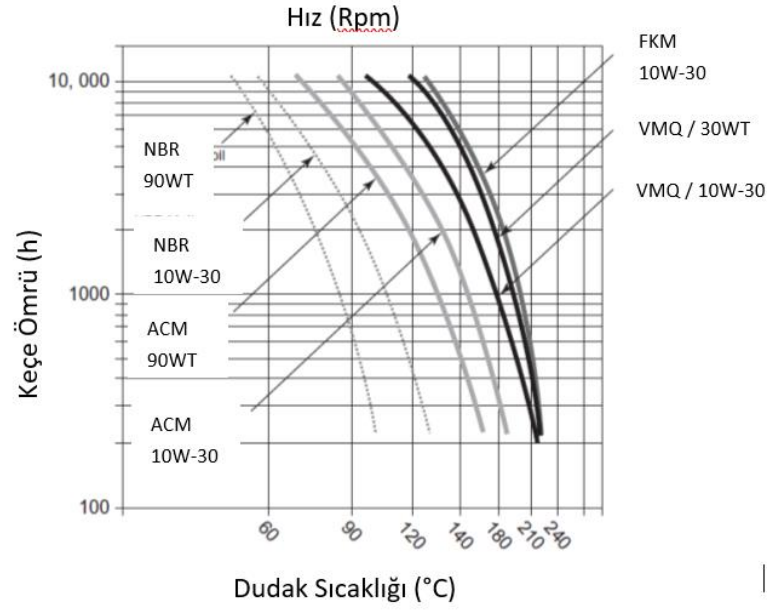
Şekil 2.11 Isı Artışının Mil Çapına Bağlı Olarak Dağılım Grafiği (Dekker 1996)

Millerin yüzeyinde oluşan radyal yük ve buna bağlı çizgisel hız üretilen ısıyı etkileyen önemli parametrelerdir. Elastomer özellikleri de sürtünme kaynaklı ısıyı etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Değişken malzemelere bağlı olarak tavsiye edilen mil yüzey hızlarını gösteren grafik Şekil 2.12'dedir (Türkel 2015).



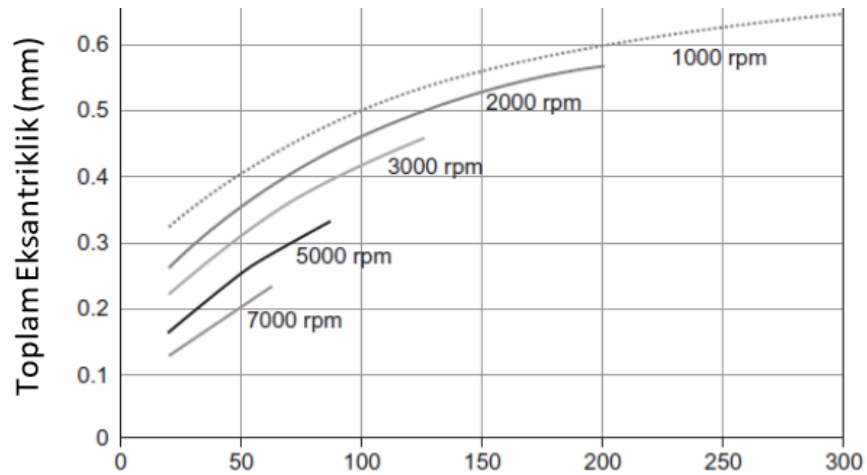
Şekil 2.12 Elastomer Seçim Grafiği (Türkel 2015)

Sıcaklığa aşırı derece duyarlı olan FKM veya ACM gibi elastomerler çoğunlukla yüksek dönme hızları için de uygundur. NBR, ACM, VMQ ve FKM gibi önemli dört ana malzemenin sınırları sıcaklığa bağlı olarak Şekil 2.13'te gösterilmiştir (Flitney 2014). Bu grafikte basınç etkisi ihmal edilerek hız limitleri belirlenmiştir. Eğer sistemde yüksek basınç mevcutsa hız limitleri belirli oranda düşmektedir. Burada gösterilen limitler keçe üreticilerinin tecrübelerine ve OEM firmalarının beklentilerine istinaden oluşturulmuştur. Yukarıda belirtilen özellikler dışında da keçe kullanımı mümkün olmasına rağmen ömürlerinin daha kısa olacağı göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.13 Keçe Elastomerlerinin Performans Sınırları (Flitney 2014)

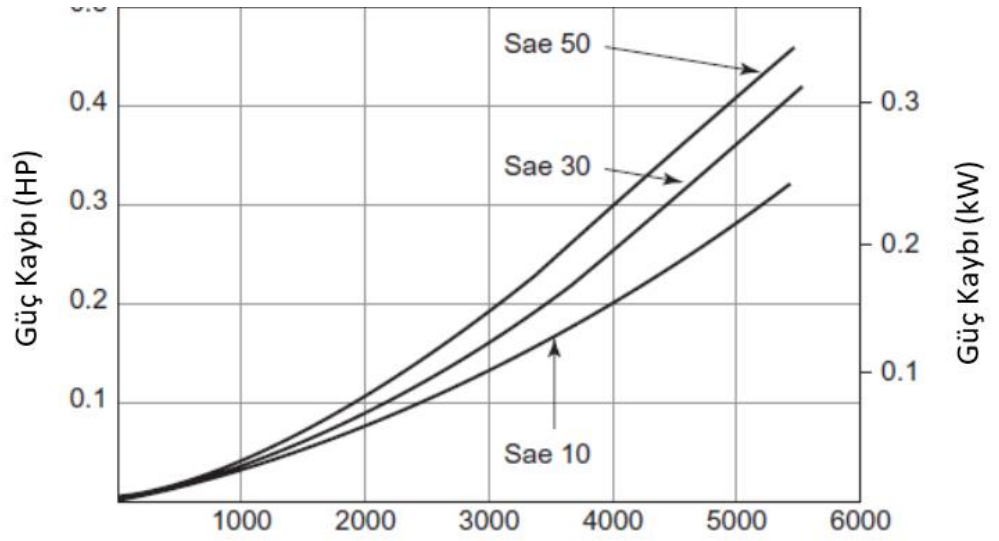
Sızdırmazlık sistemlerinde kullanılan döner millerde genellikle düzgün bir yataklama sistemiyle salgısız çalışma amaçlanır. Ancak, bazı durumlarda salgı meydana gelir. Meydana gelen salgıyı keçe performansını arttırmak amacıyla uzun bir yapıyla olumlu yönde kullanırız. Sızdırmazlık sisteminin tasarlanması için kritik üç veri; dudak geometrisi, elastomer malzeme ve çalışma sıcaklığıdır. Sızdırmazlık sistemleri için müsaade edilen maksimum salgı limitleri Şekil 2.14’te gösterilmiştir (Flitney 2014).



Şekil 2.14 Maksimum Salgılı Çalışma Koşulları (Flitney 2014)

Sızdırmazlık sisteminde kullanılan yağın viskozite değeri, dudak ve mil arasındaki sürtünme ilişkisini doğrudan etkiler. Genellikle akademik çalışmalarda kullanılan veriler

motorda kullanılan yağlara aittir. “Bu yağlara ait viskozite özellikleri ise 100 C’de genellikle 5-10 cP (yada 0.05-0.1 Pa.s) aralığındadır.”(Anonim 2011) Şanzıman sistemlerinde kullanılan yağlar aşındırıcı malzeme bakımından motor yağlarına göre daha agresif yapıya sahiptir. Yüksek sürtünme katsayısına sahip olması sebebiyle milin sürtünmeden dolayı kaybedeceği enerji daha yüksektir. Şekil 2.15’te farklı dereceli motor yağlarının enerji kayıpları incelenmiş olup yağın derecesi arttıkça güç kaybının arttığı bilgisine varılmıştır (Flitney 2014).



Şekil 2.15 Farklı Derecedeki Motor Yağlarında Tüketilmiş Enerji (Flitney 2014)

Döner mil keçelerinin tasarımlarında ve ömür testlerinde yüksek viskoz akışkanlar problem olmaktadır. Bunun yanında düşük viskoz akışkanlarda benzer problemi meydana getirmektedir. Her iki durumda da arzu ettiğimiz hidrodinamik akış oluşmayıp yüksek dereceli dudak aşınması meydana gelmektedir. Eğer medya olarak kullanılacak madde su bazlı olacak ise geometri-elastomer ilişkisi yüksek önem kazanacaktır. Böyle durumlarda alternatif çözümler aranmaktadır. Bu çözümlerin başında PTFE’den imal edilmiş döner mil keçeleri gelmektedir. Bazı durumlarda zorunlu olarak elastomer dudaklı keçe kullanılacaksa, bu durumda yeni bir elastomer geliştirilmesi gerekmektedir.

2.3.Sonlu Elemanlar Yöntemi

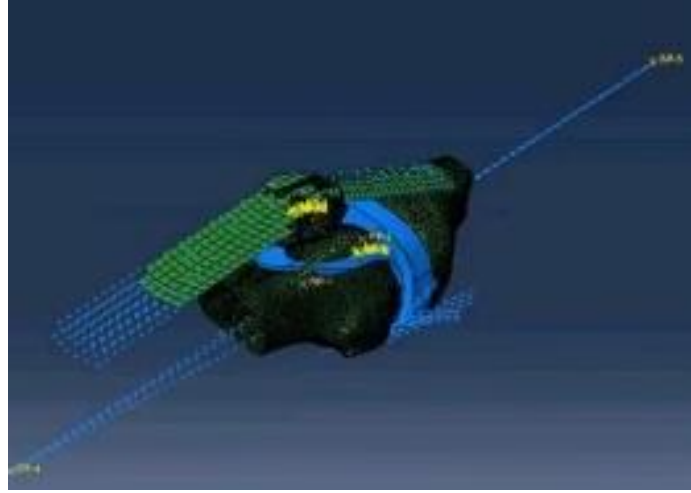
Sonlu Elemanlar Yöntemi, zorluk derecesi yüksek olan mühendislik problemlerine sonuca küçük bir sapmayla ulaşılabilecek yaklaşımlarla çözüm üretmeye yarayan sayısal çözüm metodudur. İki binli yılların başlarından itibaren kullanılan bilgisayarların beklemedik şekilde hızlı gelişimiyle birlikte, sayısal hesaplama yöntemleri de çok hızlı bir şekilde gelişmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi tarihte ilk olarak yapısal ve statik analiz çalışmaları için geliştirilmiştir. Gün geçtikçe analiz çalışmaları kompleks hale gelerek uçak mühendisliğinden, nükleer mühendisliğine kadar uzanmıştır. Bu alanlarda ilave olarak manyetizma analizleri ve dinamik-termal analizleri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

2.3.1.Sonlu Elemanların Tarihsel Gelişimi

Tümevarım çözüm prensibi, sonlu elemanlar yöntemi temel taşlarından biridir. Sonlu elemanlar; iki veya üç boyutlu modellerin bir elementi veya bir alanıdır. Gerilme analizi sonlu elemanlarla çözüme kavuşturulmaya çalışılan ilk problemlerdir. Gelişen sonlu elemanlar çözüm metodları ısı transferi analizi, akışkanlar mekaniği analizi, elektriksel alan analizi gibi çeşitli dallarda da denenmektedir.

FEA tarihte ilk önce 1940 yıllarında uzay problemlerinin çözülmesi için kullanılmaya başlanmıştır. Çeşitli uçak üretici firmaları sonlu elemanlar için oluşturulan paket programları ilk olarak kullanmaya başlamışlardır. Sonlu elemanlar metodunun ana fikri hakkında ilk yayınlanan makale Turner ve arkadaşları tarafından oluşturulmuştur (Huang 2000). İlerleyen teknolojiyle birlikte 1975'lerde olgunlaşarak sonlu elemanlar yöntemi mühendislik, fizik gibi çeşitli doğa bilimleri alanlarının yanı sıra tıp biliminin çeşitli dallarında da yer almıştır. Şekil 2.16'da tıp biliminde uygulanan sonlu elemanlar çözümüyle ilgili örnek gösterilmiştir (Huang 2000) .



Şekil 2.16 Tıp Biliminde Kullanılan Analiz (Huang 2000)

Protez diş alanında sonlu elemanlar üzerine yapılan ilk analiz çalışması 1968 yılında Ledley ve Huang tarafından yapılmış olan gerilim analiz çalışmasıdır (Huang 2000). Bu projede bir dişe ait matematiksel model oluşturulup, diş üzerine çeşitli yönlerden kuvvetler uygulanarak gerilmelere bakılmıştır. Analiz sonuçları ışığında dişi destekleyen kemik dokusunda oluşan gerilmeler incelenmiştir. 2000’li yılların başından itibaren diş hastalıkları alanında yaygın şekilde sonlu elemanlar metodu uygulanmaya başlanmıştır. Poisson denklemi 1965 yılı içerisinde Zienkiewicz ve Cheung tarafından sonlu elemanlar metodu yardımıyla çözüme kavuşturulmuştur (Huang 2000). Potansiyel akış problemlerinin çözümü için bu metot 1970’li yıllarda Doctors tarafından kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodunun hızlandırılması amaçlanarak çeşitli paket programlar (Abaqus, Ansys, Marc...) oluşturulmuştur.

2.3.2.Uygulama Alanları

Sonlu elemanlar metodu, genellikle yapısal analiz problemleri için kullanılmasının yanı sıra, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar gibi uzun çözüm süreleri olan kompleks denklemlerin çözülmesinde kullanılmaktadır. FEA metodunun bu kadar yaygın kullanılmasının bir nedeni de benzer olmayan problemler arasında bir ilişki kurup çözüm süresini kısaltmasıdır. Sonlu elemanlar metoduna ait örnek çalışma alanları Çizelge 2.1’de bazı modelleme örnekleri de Çizelge 2.2’de açıklanmıştır.

Çizelge2.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Örnekleri (Huang 2000)

Uygulama Alanları	Denge Problemleri	Özdeğer Problemleri	İlerleme Problemleri
İnşaat Mühendisliği	Çerçevelerin, levhaların, duvarların, yapıların, köprülerin, kirişlerin, ve öngerilmeli beton elemanların statik analizi	Doğal frekanslar, Stabilite analizi	Gerilme dalgalarının ilerlemesi, Yapıların periyodik olmayan yüklerle cevabı
Uçak Mühendisliği	Gövdenin, kanatların, kanatçıkların statik analizi, Roketlerin, füzelerin statik analizi	Doğal frekanslar, Stabilite analizi	Yapıların gelişigüzel yüklerle cevabı, Yapıların periyodik olmayan yüklerle cevabı
Isı İletimi	Sürekli rejim için katı ve akışkanlarda sıcaklık dağılımı		Roket çıkışlarında, içten yanmalı motorlarda, türbin kanatalarında ve binalarda ısı akışı
Jeomekanik	Hafriyatların, istinad duvarlarının, yer altı boşluklarının, kaya ve toprak yapıların etkileşiminin analizi.	Baraj gövdesi ile göletin ve toprak ile yapıların etkileşiminin incelenmesi, doğal frekansların bulunması	Zamana bağlı toprak ve yapı etkileşimi problemleri, toprak ve kayalarda sızıntı problemleri
Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği	Hidrolik yapıların ve barajların analizi, potansiyel, serbest yüzey, sınır tabakası ve viskoz akışlar ile transonik aerodinamik problemlerin çözümü	Sığ havuzların, göllerin, limanların doğal periyotlarının bulunması, sıvıların rijit ve esnek kaplardaki hareketleri	Kararsız akış ve dalga ilerlemesi analizi, gözenekli yapılarda sızıntı, gaz dinamiği
Nükleer Mühendislik	Nükleer basınçlı kapların ve yapıların analizi, reaktör parçalarında sürekli rejim için sıcaklık dağılımı	Yapıların doğal frekansları, yapıların stabilite analizi	Reaktör parçalarında kararsız sıcaklık dağılımı, reaktör yapılarının ısı ve viskoelastik analizi
Biyomedikal Mühendisliği	Kemiklerde, dişlerde, gözlerde vs. gerilme analizi, doğal yapılar ve protezler için yük taşıma kapasitesi analizi, kalp kapakçıklarının mekaniği		Kafatasının darbe analizi, anatomik yapıların dinamiği
Mekanik Tasarım	Basınçlı kapların, pistonların, kompozit malzemenin, dişilerin vs. gerilme analizi, gerilme konsantrasyonu problemleri	Makine elemanlarının, takım tezgahlarının, dişilerin vs. doğal frekansları ve stabilite problemleri	Dinamik yük altında çatlak ve kırılma mekaniği problemleri

Çizelge2.2 Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Amaçları (Huang 2000)

Hidrolik	<ul style="list-style-type: none">➤ Yeraltı sularını taşıyan geçirimli katmanların analizi➤ Göllerde su dolaşımının analizi ve termal analiz➤ Nehirlerde ve denizlerde gelgit sonucu oluşan yayılma ve dağılmanın analizi
Toprak Mekaniği	<ul style="list-style-type: none">➤ Yamaçlar, kazılar ve setler için gerilme analizi➤ Temellerin yük taşıma ve oturma analizi
Hidroelastisite	<ul style="list-style-type: none">➤ Sıvıların elastik kaplardaki hareketleri➤ Baraj gövdesi ile göletin etkileşiminin analizi
Biyomekanik	<ul style="list-style-type: none">➤ Alyuvarların ve plazmanın kılcal damarlardaki hareketlerinin incelenmesi➤ Eklemelerde yağlama analizi➤ Kalbin ve kemiklerin gerilme analizi
Temas Problemleri	<ul style="list-style-type: none">➤ Elastik çarpmanın analizi
Nükleer Mühendislik	<ul style="list-style-type: none">➤ Beton reaktör gövdelerinin analizi➤ Çok gruplu nötron yayılması problemlerinin çözümü
Korozyon	<ul style="list-style-type: none">➤ Yerel korozyon hücrelerinin analizi
Kompozit Malzemeler	<ul style="list-style-type: none">➤ Katmanlı ahşap sistemlerin analizi➤ Sandviç kabukların analizi➤ Tabakalı levhaların analizi
Mekanizma	<ul style="list-style-type: none">➤ Mekanizmaların deplasman ve gerilme analizi➤ Dişlilerin gerilme analizi
Otomotiv	<ul style="list-style-type: none">➤ Araç gövdelerinin analizi
Kırılma Mekaniği	<ul style="list-style-type: none">➤ Gerilme yoğunluğu faktörlerinin bulunması➤ Çatlak ilerlemesinin analizi
Aeroelastisite	<ul style="list-style-type: none">➤ Kaldırma özelliğine sahip yüzeylerde yük dağılımı, ayrılma ve kanat hareketlerinin analizi
Takım Tezgahları	<ul style="list-style-type: none">➤ Torna tezgahı, freze tezgahı, radyal matkap vb.'nin yapısal analizi
Metal Biçimlendirme	<ul style="list-style-type: none">➤ Soğuk ve sıcak haddeleme, ekstrüzyon, derin çekme vb. işlemlerin analizleri
Döküm	<ul style="list-style-type: none">➤ Katılaşmanın analizi

2.3.3.Sonlu Elemanlar Çözümlerinde Kullanılan Eleman Çeşitleri

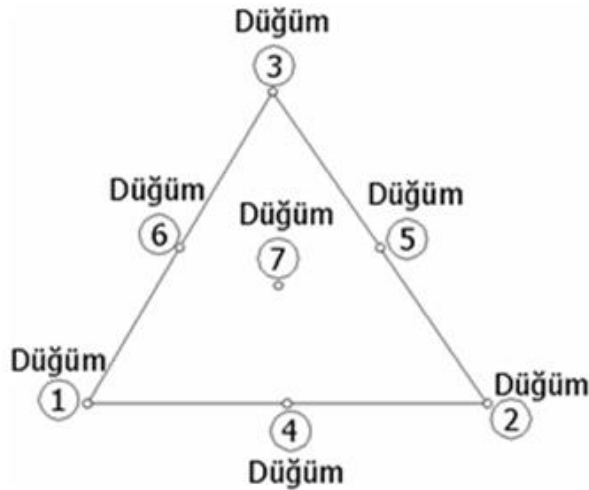
Sonlu elemanlar metodunda mutlak sonuçların elde edilebilmesi için en önemli adım sistemin doğru ağ yapısına bölünmesidir. Sonlu elemanlara bölme işleminde analiz türü ve parça boyutu göz önüne alınarak en uygun şekilde ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Ağ yapısının oluşturulmasında tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve dönelemler üzere çeşitli elemanlar kullanılırlar.

Sonlu elemanlar modelinde geometriyi, malzemenin karakteristiklerini veya sınır koşullarını tek boyutta ifade edebiliyorsak Şekil 2.17’de gösterildiği gibi ifade edebiliriz.



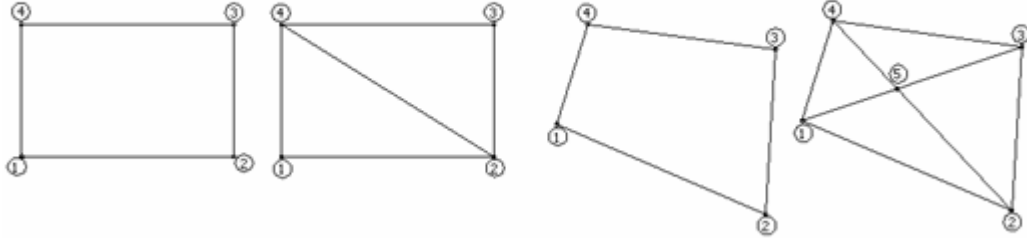
Şekil 2.17 Tek Boyutta İfade Edilen Sonlu Eleman Çeşidi

Bazı sonlu elemanlar problemleri tek boyutta sınırlandırılmaz. Bu problemlerin çözümlenmesinde çift boyuttan oluşan elemanlar kullanılırlar. Basit bir anlatımla çift boyutlu eleman Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Çift Boyutlu Sonlu Eleman Örneği

Sonlu elemanlar modellerinin çözümlerinin daha kararlı olabilmesi için dörtgenler ailesinden elemanlar kullanılırlar. Şekil 2.19'da dikdörtgen, paralel kenar ve prizma eleman örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.19 Dörtgenler Ailesi Eleman Örnekleri

Her sonlu eleman problemin çözümlenmesinde iki boyutlu eleman kullanılması yeterli değildir. Bu durumda alternatif sonlu eleman tipleri oluşturulmuştur. Bu elemanlara genel olarak üçüncü boyuta sahip elemanlar denir. Yüksek zorluğa sahip sonlu elemanlar problemlerinde genellikle dikdörtgenler prizması kullanılmaktadır.

Döner mil keçeleri gibi analiz çalışmalarında eksen doğrultusunda bir simetriklik durumu mevcuttur. Bu tarz problemlerin çözümlenmesi için aksenal-simetrik elemanlar geliştirilmiştir. Bu metodun geliştirilmesi üç boyutlu kompleks problemlerin çözüm süresi hatırı sayılır seviyede bir iyileşme sağlamıştır. İlave olarak sınır koşullarının uygulanmasında daha kolay bir metot sağlamıştır.

Tez çalışması kapsamında 2D aksenal simetrik elemanlar kullanılmıştır. 2D aksenal simetrik elemanlar çözüm süresinin kısaltılması adına önemli derecede fayda sağlamaktadır. Bu sebeple termal analizler dışında olan analizlerde 2D elemanlar kullanılmaktadır. Termal analizler için sürtünme kaynaklı ısı oluşumunu simüle edebilmek adına dörtgen elemanlar kullanılmaktadır (Xi Zhang ve ark. 2016).

2.4.Hiperelastik Malzeme Modelleri

Elastik olmayan malzemeler düşük kuvvetlerin uygulanması durumunda şartlarını muhafaza ederek elastik olarak yüksek şekil değiştirmeye maruz kalırlar. Elastik olmayan malzemelerin üzerine etki eden kuvvet karşısında gösterdiği şekil değişikliği

doğrusal değildir. Hiperelastik malzemeler için gerilme ve şekil değiştirme arasında sabit bir oran mevcut değildir. Şekil değiştirme enerji fonksiyonu bu ilişkiyi tanımlamak için kullanılmaktadır. Araştırmacılar çalışmalarında şekil değiştirme fonksiyonunu değişik şekillerde yorumlamışlardır. Araştırmacıların çalışmalarından en yaygın şekilde bilinenleri aşağıda sıralanmıştır.

2.4.1.Mooney-Rivlin Modeli

Hiperelastik malzeme modelleri hakkında ilk çalışma 1940'lı yıllarda Mooney tarafından yapılmıştır (Engin ve ark. 2019). Mooney çalışmasında özel ve genel durum olacak şekilde iki bölümde ele almıştır. Genel durumda yer almayan özellikler olarak malzemenin sıkıştırılmaz olduğunu ifade etmiştir. İzotropik ve kayma gerilmesini kayma şekil değiştirmeyle orantılı kabullerini ifade ederek bu özellikleri sağlayan malzemelere de hiperelastik malzeme tanımlaması yapmıştır. Tek eksenli çekme deneyi sonuçlarından faydalanılarak Mooney-Rivlin malzeme modeli uygulanır. Tek eksenli çekme deneyi dışındaki veriler kullanılmaya çalışılması durumunda ciddi şekilde uyumsuzluk göstermektedir. Mooney-Rivlin malzeme modelinin sınırsız seriler halindeki açılımı Denklem 2.1 verilmiştir (Engin ve ark. 2019).

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i,j=1}^{\infty} C_{i,j} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad 2.1$$

Denklem 2.2'de ise iki parametrelili Mooney-Rivlin malzeme modeli açıklanmıştır (Engin ve ark. 2019).

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad 2.2$$

Denklem 2.2'de W enerjisi, C indirgenmiş elastik elastik tensörü ve I' da eksen doğrultusundaki uzamayı ifade etmektedir (Engin ve ark. 2019).

2.4.2.Neo-Hookeen Modeli

Treloar tarafından ilk defa kullanılan şekil değiştirme enerji fonksiyonudur. Araştırmacı yaptığı çalışmasında Neo-Hookeen malzeme modelini değişken deformasyonlarda istatistiksel kıyaslamalar yapmak için kullanmıştır (Engin ve ark.

2019). Araştırmacı çalışmasında y doğrultusunda yaptığı çekme deneyi esnasında %40 civarında Şekil üzerinde değişim gördüğü durumunda teorik verilerle uyum sağlamıştır. Benzer durumlar diğer deneyler içinde geçerlidir. Tek eksenli basma deneyinde teorik ve deneysel veriler kıyaslandığında st düzeyde uyum sağlamadığı görülmüştür. Sonuç olarak Neo-Hookeen malzeme modelinin düşük Şekil değiştirme alanında yeterli ancak yüksek Şekil değiştirme alanında etkisiz olduğu değerlendirilmiştir (Engin ve ark. 2019).

Denklem 2.3'te tek terime indirgenmiş Mooney-Rivlin Malzeme Modelinin adı Neo-Hookeen olmuştur (Engin ve ark. 2019).

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

2.3

Denklem 2.3'te W enerjii, C indirgenmiş elastik elastik tensörü ve I' da eksen doğrultusundaki uzamayı ifade etmektedir (Engin ve ark. 2019).

2.4.3.Ogden Modeli

Deneysel veriler işığında eğrilerin uydurulma yaklaşımına Ogden Modeli denilmektedir.

Arzu edilen hassasiyette rastgele bir gerilme bu modelde ifade edilebilmektedir. Bu malzeme modelinde herhangi bir yük altında arzu edilen hassasiyette tanımlama yapılabilmektedir.  terimle sınırlandırılmış olması sebebiyle tek eksenli, eş – iki eksenli ve basit kayma deneylerinin sonuçları katsayıların bulunması için yeterlidir. Bu malzeme modeli poisson oranı yüksek, sıkıştırılması güç olan elastomer malzemeler için kullanılır. Ogden modeli için enerji, temel uzamaların fonksiyonudur (Engin ve ark. 2019). Denklem 2.4 de ogden modeli verilmiştir.

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\mu_r}{\alpha_r} (\lambda_1^{\alpha_r}, \lambda_2^{\alpha_r}, \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad 2.4$$

Denklem 2.4'te W enerjii, λ uzamayı, μ_r ve α_r malzeme sabitlerini ifade etmektedir (Engin ve ark. 2019).

2.4.4. Yeoh Modeli

Araştırmacıların birçoğu test örneği için vulkanizasyon yapılmış ancak ilave dolgu maddesi yer almayan elastomer malzeme kullanmıştır. Yeoh, bu durumun tam tersi olarak vulkanizasyon yapılmış fakat ilave dolgu maddesi yer almayan elastomer malzeme test etmiş ve bahsedilen elastomerin üzerinde meydana gelen şekil değiştirme enerjisinin fonksiyonunu elde etmeye çalışmıştır. Araştırmacı malzeme katsayılarının tespiti için kullanacağı metodu kolay ve her yerde bulacağı şekilde tanımlamıştır. Bu metod malzeme deneylerinin olmazsa olmazı bir eksen doğrultusunda yapılan uzama deneyidir. Her iki doğrultuda yapılacak uzama deneyinin yapılmasının zor olması sebebiyle araştırmacı bu deneyi ihmal etmiştir (Engin ve ark. 2019).

Yeoh malzeme modelinin en önemli avantajlarından bir tanesi hemen hemen neredeyse tüm sonlu elemanlar yazılım programlarında standarttır. Yeoh tüm araştırmalarını vulkanizasyonu tamamlanmış elastomere karbon siyahı eklenmiş ve eklenmemiş numuneler için yapmıştır. Yeoh her iki denemesinde de kayma modülünün, Neo-Hookean ve Mooney-Rivlin malzeme modelinin aksine deformasyonla değiştiğini ispatlamıştır. Araştırmacı hipotezinde malzeme katsayılarının belirlenmesinde tek eksen deneyinin yeterli seviyede olduğunu açıklamıştır. Bu sebeple çift eksen çekme deneyine ihtiyaç kalmadan malzeme davranışının karakteriştiği belirlenmiştir. Yeoh'a göre hiperelastik malzeme katsayıları Denklem 2.5'te verildiği şekilde hesaplanmaktadır (Engin ve ark. 2019).

$$W(I_1, I_2, I_3) = \sum_{i,j,k=0}^{\infty} c_{i,j,k} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad 2.5$$

Denklem 2.4'te W enerjii, I uzamayı, i, j ve k malzeme sabitlerini ifade etmektedir (Engin ve ark. 2019).

Döner mil keçeleri dinamik halde çalışmaları esnasında burç ve takozlar kadar yüksek deformasyona maruz bırakılmazlar. Döner mil keçelerinin çalışması esnasında maksimum deformasyon %5'i geçmemektedir. Bu sebeple %5 deformasyona kadar uyum gösteren Mooney-Rivlin Malzeme modeli döner mil keçelerinin analizlerinde

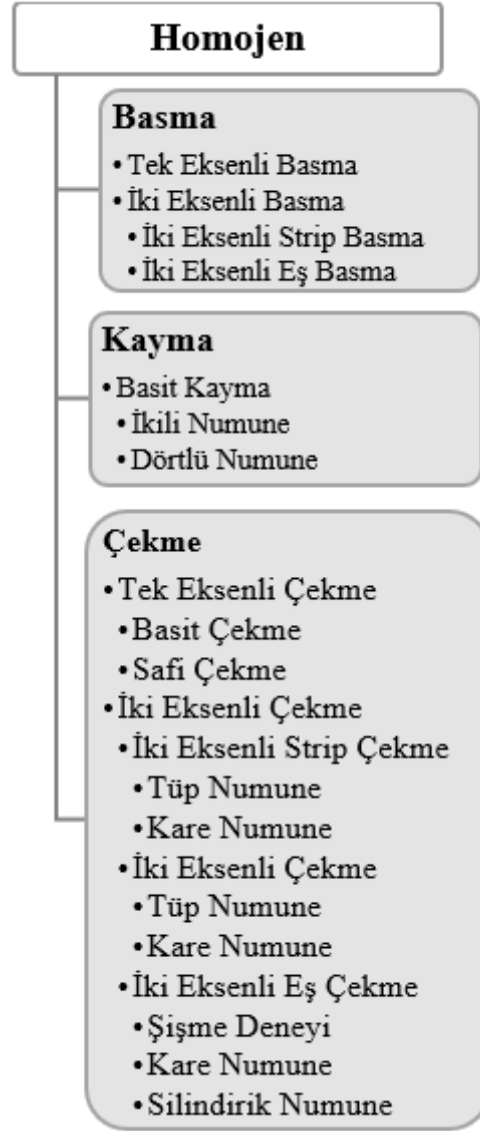
kullanılmaktadır (Horve 1996). Tez çalışması kapsamında da Mooney-Rivlin Malzeme modeli kullanılmıştır.

2.5.Malzeme Katsayılarının Elde Edilmesi

Sonlu elemanlar analizlerinde malzemenin mekanik davranışını tanımlamak için uygun malzeme modelinin tanımlanması gerekmektedir. Hiperelastik malzeme modelinin seçimi ve malzeme testleri arasındaki uyumun sağlanarak doğru katsayıların elde edilmesi son derece önemlidir. Kullanılan sonlu elemanlara yönelik paket programlarda hiperelastik malzemenin tanımlanabilmesi için iki farklı metot kullanılmaktadır. Birinci yöntem olarak elde edilen deneysel veriler paket programa girilir. Deneysel verilere göre uyum sağlayan hiperelastik malzeme modeli seçilir ve programın katsayıları hesaplaması beklenir. Diğer yöntem de ise deneysel verilere ait sonuçlar açık kodlar yardımıyla tespit edilir ve programa hazır olarak giriş yapılır (Engin ve ark. 2019).

2.5.1.Katsayılarının Elde Edilmesi için Gerekli Malzeme Deneyleri

Cisimlere herhangi bir doğrultudan bir kuvvetin uygulanması sonucunda cisim üzerinde çeşitli durum değişiklikleri meydana gelir. Bunun mukavemet dilinde adı deforme olmuş durumdur. Eğer cisim deformasyona uğrarken asal ekseninde bir bozulma olmuyorsa bu duruma dönmesiz (saf) deformasyon denir. Kauçuk malzemelerle yapılan testlerde, numunenin dönmesiz homojen deformasyona maruz kalması sağlanır. Bu sayede ölçümler daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir (Vahapoğlu, 2013). Şekil 2.20’de kauçuk mekaniğinde yapılan testler gösterilmiştir (Engin ve ark. 2019). Elastomerik malzemeler modellenirken genellikle davranış elastik, malzeme izotropik ve katı elastomerler için malzeme yaklaşık olarak sıkıştırılmaz olmak üzere çeşitli varsayımlar yapılır (Keerthiwansa ve ark. 2018). Kauçuklar üzerinde sıklıkla basma ve çekme şeklinde iki tipte test gerçekleştirilir. Basma durumu her zaman tek eksenli iken,çekme tek eksenli, düzlemsel veya eş eksenli bir şekilde uygulanabilir (Dalrymple ve ark. 2007).



Şekil 2.20 Kauçuk Mekaniğinde Yapılan Testler (Engin ve ark. 2019)

Tez kapsamında kullanılacak Mooney Rivlin modelindeki malzeme katsayıları deneysel olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda tek eksenli ve çift eksenli çekme deneyleri, basma deneyleri ve kayma deneyi gerçekleştirilmiştir.

2.5.2.Çekme Deneyleri

Hiperelastik malzemelerin laboratuvar testlerinin en bilineni çekme deneyidir. Bu deney az bir tecrübeye sahip teknisyenler tarafından bile yapılabilecek kolaylıktadır. Literatürde bu test tek eksenli ve iki eksenli olacak şekilde sınıflandırılmıştır. Kauçuk

malzemelerin özelliklerinin incelenmesinde tek başına çekme deneyi yetersiz kalmaktadır. Bu deneyin yanı sıra basma deneyine de ihtiyaç duyulmaktadır (Abdullah, 2020). Analiz çalışmasında kullanılmak üzere tek eksen çekme deneyinin yanı sıra belirlenmiş testlerde yapılmıştır. Bu testler hakkında detaylı bilgiler aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

2.5.3. Tek Eksenli Çekme Deneyleri

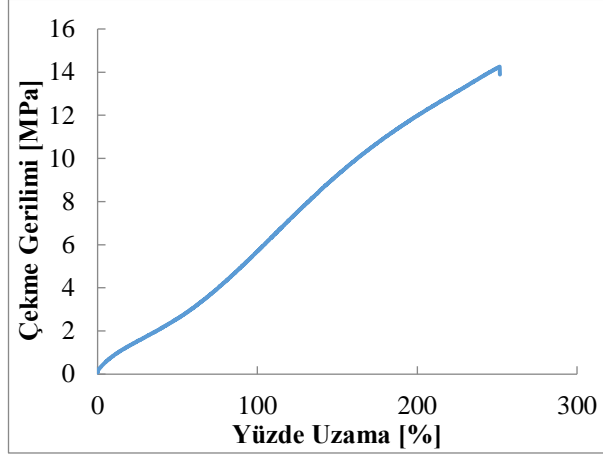
Elastik davranış gösteren metalik malzemelerin sonlu elemanlara tanımlanması için tek eksen doğrultusundaki çekme deneyi yeterlidir.

Fakat elastomer bazlı malzemelerin tanımlanması için birçok test yapılması gerekmektedir (Sasso ve ark. 2008). Tensometre üzerinde bulunan iki çene arasına test numunesi kaşık formunda bağlanır. Sabit hızda ve sabit uzama etkisi altında numune deformasyona tabi tutulur. Başlangıçta uygulanan çevrimlerin numunenin karakteristikleri üzerinde etkisi oldukça büyüktür. Buna “Mullin etkisi” denir (Freitas 2009). Hiperelastik malzemenin dengeye ulaşma süresi ortalama 15 çevrimdir (Erkek ve ark. 2015). Tez çalışmasında Şekil 2.21 de görülen ZWICK marka çekme makinası kullanılmıştır. Bu cihazda tek eksen doğrultusunda çekme deneyi rahatlıkla yapılmıştır.



Şekil 2.21 Tek Eksen Çekme Testi

Değerlendirme işlemi sonrası sonlu elemanlar yazılımında kullanılacak veriye ait grafik Şekil 2.21’de açıkça gösterilmiştir. Değerlendirme sonrası veriler excel formatında alınıp Abaqus programına aktarılmaktadır.



Şekil 2.21 Tek eksenli çekme testi sonuç grafiği düşey eksen gerilme

2.5.4.Çift Eksenli Çekme Deneyleri

Tek eksenli çekme deneylerinde I1 ve I2’nin incelenmesi mümkün olmamaktadır. Hiperelastik malzemelerin tanımlanması için tek eksenle yapılan çekme deney testi yeterli değildir. Bu sebeple her iki eksen doğrultusunda test edebileceğimiz numune çeşitlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu numune şekillerinin başında altıgen kesitli numune gelmektedir (Fujikawa ve ark. 2014). Başlangıçta kenarı 1 birim olan numuneye 1 ve 2 doğrultularında F1 ve F2 kuvvetleri uygulanır. Bu kuvvetlerin etkisinde numune λ_1 ve λ_2 son boya ulaşır. σ_1 1 doğrultusunda meydana gelen gerilme ve σ_2 iki doğrultusunda meydana gelen gerilme olup denklem 2.6 ve 2.7 de verilmiştir.

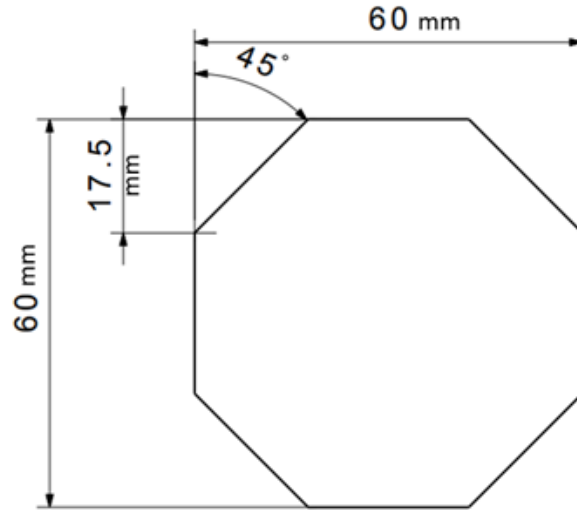
$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \quad \lambda_1 = \lambda_1 \quad (2.6)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_0} \quad \lambda_2 = \lambda_2 \quad (2.7)$$

A_0 , kuvvetin uygulandığı ilk kesit alanıdır. Sıkıştırılmazlık kanununa göre numunenin kalınlığının değişimi denklem 2.8’de gösterildiği şekilde bulunur.

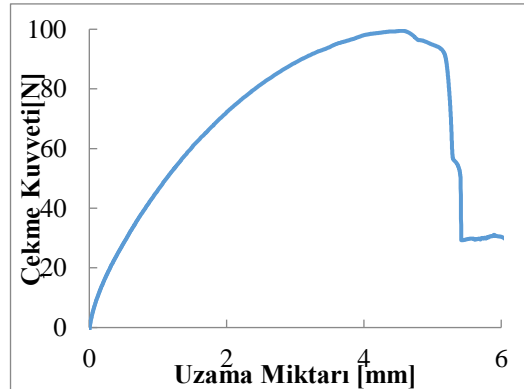
$$\sigma_3 = 0 \quad \lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (2.8)$$

Kuvvetler $\lambda_1 = \lambda_2$ veya $\lambda_1 = \lambda$ ve $\lambda_2 = 1$ şeklinde uygulanır. Çift eksen çekme deneyi SKT firmasının kendi iç standartlarına göre belirlenmiş olup numune ebatları Şekil 2.22’de gösterilmiştir. Numune ölçüleri mm cinsinden belirlenmiştir. Numunenin çekme makinasına tutturulması için bu amaçla bir tutucu aparat tasarlanmıştır. Testler yapılırken ZWICK marka tensometrenin hızı 100 mm/dk olarak belirlenmiştir. Çift eksenli çekme deneyi Şekil 2.24’te gösterilmiş olup, deneyler 6 adet numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.22 İki Eksen Doğrultusunda Çekme Deneyi Numunesi

Minimum altı farklı lottan yapılmış deney numunelerinin sonuçlarından kabul edilen sonuç Şekil 2.23’te verilen grafikte verilmektedir.



Şekil 2.23 Çift Eksenli Çekme Testi Sonuç Grafiği



Şekil 2.24 Çift Eksenli Çekme Testi

2.5.5. Basma Deneyleri

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi hiperelastik malzeme katsayılarının tanımlanması için birçok teste ihtiyaç duymaktayız. Bu testlerin en bilinenlerinden biri de basma deneyleridir. Basma deneyleri bir doğrultuda ve çift doğrultuda olacak şekilde yapılırlar. Basma deneyinin teorisi standart çekme deneyine aşırı derecede benzemektedir. Bu sebepten dolayı hesaplamalar için standart çekme deneyi formülleri kullanılır. Basma deneyinde doğrultunun çekme deneyine göre ters doğrultu da olması sebebiyle gerilme eksi işaretli olarak hesaplanır (Kanzenbach ve ark. 2019).

2.5.6. Tek Eksenli Basma Deneyleri

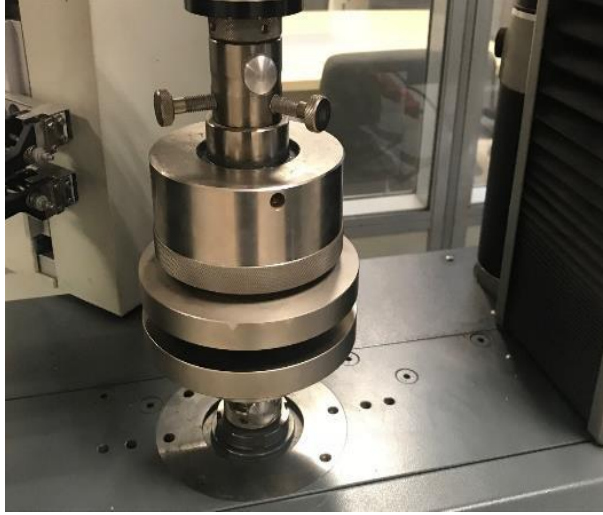
Elastomer kökenli malzemeler lineer olmayacak şekilde karaktere sahip olmaları sebebiyle hem çekme hem de basma deneylerine tabi tutulmalıdır. Genellikle hızlı bir şekilde yapılması sebebiyle bir doğrultuda uygulanan basma testleri yapılmaktadır. Numuneler çap 16 mm ve yükseklik 13 mm olacak şekilde imal edilir (Huri ve ark., 2018). Bu numuneler tensometre çenelerinin içine dengeli şekilde monte edilir. Daha sonrasında tensometre kontrol paneli üzerinden negatif y doğrultusunda hareket verilir (Huri ve ark., 2018).

Denklem 2.9’da gerilmenin tek doğrultuda yani 1 doğrultusunda olacağı anlatılmaktadır. Denklem 2.10’da uzamanın 1 doğrultusunda olmasına rağmen diğer doğrultularda da kısmen görüldüğü bilgisi verilmektedir.

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.9)$$

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\lambda} \quad (2.10)$$

Standart doğrultuda basma testi yapılan deney düzeneğinin bir görseli Şekil 2.25’te verilmiştir.

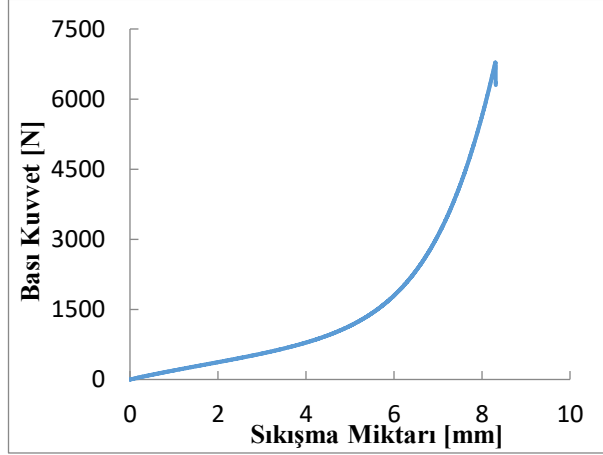


Şekil 2.25 Basma Testi Deney Düzeneği

Tek eksen doğrultusunda yapılan basma deneyinde metalik çeneler ve elastomer numune yüzeyi arasında ihmal edilmesi imkânsız değerlerde bir sürtünme katsayısı meydana gelmektedir. Bu bilgiler ışığında araştırmacılar genellikle basma deneyi yerine çift eksen doğrultusunda çekme deneyi yapmaktadır. Basma deneyleri esnasında ZWICK marka tensometre kullanılmış olup hız olarak da 100 mm/dk seçilmiştir. Bazı araştırmacılar numune üzerinde meydana gelecek bombeleşmeyi önlemek adına yağlama uygulaması yapmaktadır. Yağlama uygulaması sürtünmeyi tamamen yok etmemektedir (Xu ve ark. 2018).

Her ne kadar da olsa sürtünmeye maruz kalan numune üzerinden test yapılırsa da çeşitli veriler kayıt altına alınmış olup Şekil 2.26’da açıkça gösterilmiştir. Daha önceki deney

çalışmalarında olduğu gibi altı farklı lottan numune alınıp değişimleri incelenmiştir. Standart sapması düşük olan numuneye ait veriler sonlu elemanlar yazılımı içerisinde yer alan malzeme modeli bölümüne girilmiştir.



Şekil 2.26 Basma Testi Sonuç Grafiği

2.5.7.Kayma Deneyi

Literatürde kayma testi olarak ifade edilen, basit kayma deneyi yapılmaktadır. Diğer deneylerden farklı şekilde sadece homojen bir deformasyon çeşididir. Uygulanan kuvvetin yönü, test sırasında asal eksenin sabit kalmamasına sebep olmaktadır. Bu durum, basit kaymada safi deformasyonun görülememesine neden olur. Kauçuk malzemelerde kayma testi, numune metal plakalar arasına yapıştırılmış halde yapılır. Bu metal plakalardan biri sabit tutulurken diğerine bulunduğu düzlemde kuvvet etki eder (Ismail ve ark. 2018).

Denklem 2.11 de kayma gerilmesi verilmiştir.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

τ Kayma gerilmesi, F uygulanan kuvvet, A ise kuvvetin uygulandığı alandır. Kuvvetin birimi N, alanın birimi ise metrekaredir. Denklem 2.12 den kayma şekil değiştirmesi ise d kayma şekil değiştirmesi, t ise numune kalınlığı olmak üzere;

$$\gamma = \frac{d}{t} \quad (2.12)$$

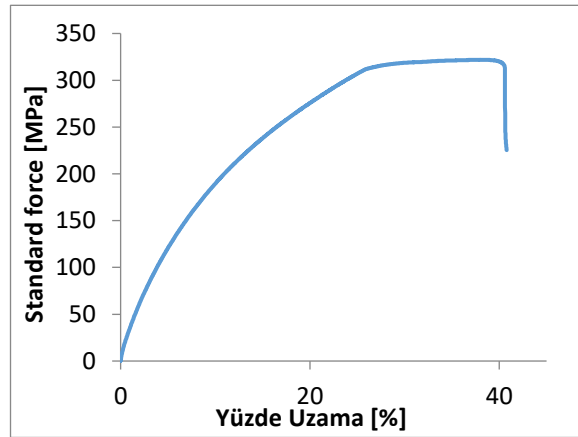
şeklinde hesaplanır. Basit kayma deneyine ait deney düzeneği Şekil 2.26’da gösterilmiştir.



Şekil 2.27 Basit Kayma Deney Düzeneği

Sonlu elemanlar yazılımına veri oluşturulması adına 6 adet basit kayma testi yapılmıştır. Deneyin ilk anından son anına kadar sapmanın 1 N altında olması durumunda sonuçlar uygun olarak değerlendirilmiştir. Kayma deneyi esnasında tasarımı tez esnasında geliştirilmiş aparatlar kullanılmıştır. Test cihazı olarak ZWICK marka tensometre kullanılmıştır. Standart sapması 0,01 N olarak ölçülmüştür. Test esnasında kullanılan numunelerin ölçüsü 60x150x2 mm ölçüsündedir.

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Şekil 2.28’de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 2.27 Basit Kayma Deney Testi Sonuç Grafiği

2.6.Optimizasyon

Optimizasyon, ekosistemde yer alan kaynakların verimlilik açısından en üst seviyede kullanılarak belirlenmiş hedeflere ulaşmasını sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Gass 2000). Genel olarak optimizasyon yüksek öncelikli iki önemli parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar modelleme ve çözümlerdir. Hayatımızı devam ettirirken önümüze çıkan problemlerin matematiksel ifadesine modelleme, elde ettiğimiz modelin en iyi çözümünün elde edilmesine de çözümlere denir. Bu konu üzerine çalışma yapan bilim adamları öncelikli olarak modelleme üzerine eğilmişlerdir. Modelleme üzerine yapılan ilk çalışmalar Leontif tarafından yapılmıştır. Leontif çalışmasında ABD dış ticaretini ve ekonomik yapısını modelleme yapmıştır (Koopmans 1949). Kantorovich isimli Rus kökenli bir matematikçi de üretimin planlaması aşamasında en çok karşılaşılan problemlerin modellenmesine yoğunlaşmıştır. Modelleme işlemi sonrası optimizasyon çözüm metodlarına ait ihtiyacı ortaya koymuştur. 1900' lü yıllarda iletişim kanallarının zayıf olması sebebiyle batı ülkelerinde çalışma yapan bilim insanları Kantorovich'i geç tanımışlardır. Kantorovich, üretimde yaşanan problemler üzerine dokuz farklı modelleme çalışma yapmıştır. Bu farklı dokuz modelleme içinde farklı dokuz adet çözümlere algoritması geliştirmiştir. Diğer yandan da Kantorovich ve Gavurin birlikte çalışarak ulaşımda verimliliğin artırılmasına yönelik optimizasyon modellemesi çalışmaları da yapmıştır (Koopmans 1949). Ayrıca, Koopmans tarafından 1949' lı yıllarda ekonomi alanında da optimum kapasite kullanımına yönelik modelleme çalışmaları Koopmans tarafından yapılmıştır. Optimizasyon modelleme çalışmaları bilim insanları tarafından kabul görmüş ve Leontif 1973 yılında Nobel Ekonomi ödülünü almıştır (Nobel 2006). Bu alanda bir diğer ödül de Nobel ödülünü almışlardır. Optimizasyon modellerinin özellikle ekonomik sistemlerde kullanılması ve üretim/dağıtım sistemlerinde karşılaşılan problemlerin birçoğunun optimizasyon problemi olarak modellenmesine rağmen optimizasyon modellerinin teorik özelliklerinin araştırılması ve genel çözüm algoritmalarının geliştirilmesi halen devam etmektedir. Modelleme çalışmaları hızlı şekilde devam ederken çözümlere yönelik olarak ilk bilinen çalışma Dantzig tarafından yapılmış olup ve simpleks adında bir algoritma geliştirmiştir. Nobel Ekonomi ödülünü 1975 yılında kazanan Koopmans bu ödülünü Dantzig ile ortak hakettiğini düşünerek

Nobel ödül komitesine bir başvuru yapmıştır. Nobel ödülünün üçte birini ödüle ortak olması gerektiğini düşündüğü Dantzig adına açılmış bir burs programına yatırmıştır. Koopmans yaptığı bu hareketle optimizasyon modelleme ve çözümleme çalışmalarının önemini tekrardan dünyaya belirtmiştir (Gass ve Assad, 2004). Optimizasyon teorisi, kararların doğru şekilde alınması sürecini hızlandırmakta ve doğru kararların alınmasında kullanılarak gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin etkin, doğru ve gerçek zamanlı çözümünde yararlanılmaktadır. Optimizasyon, ekonomik açılarından getirdiği kazançların yanında müşteri, işveren ve işçilerin memnuniyet seviyelerinin artırılmasında kullanılmaktadır. Optimizasyon üzerine yapılan çalışmaları yayınlamak üzere ilk dergi 1970’li yılların başında Interfaces dergisi kurulmuştur. Bu dergi düzenli aralıklarla yayın yaparak optimizasyon modelleme ve çözümleme çalışmaları hakkında sonuçları yayınlamaktadır. Bu dergi her yıl yayınlanan Ocak ayı serisinde geçmiş yıla ait en başarılı uygulamaları detaylarıyla tanıtılmaktadır. Birçok alanda karşılaşılan optimizasyon problemlerinin çözümünde; endüstriyel, finansal ve servis sistemlerinin performanslarında en iyileme olarak kullanılmasında modelleme ve çözümleme ön plana çıkmaktadır.

2.6.1.Optimizasyon Modellerinin Oluşturulması

Optimizasyonda model, temel bilimlerde ve mühendislikte yoğun olarak kullanılan, geniş kapsamlı bir sistemin bütün özelliklerini yansıtabilecek daha ufak boyutlardaki yapılardır. Optimizasyon modelleri genellikle analizi yapılacak sistemin ana unsurlarının yansıtabilecek ve modellerin oluşturulma amaçlarını reel bir şekilde içerecek detaylar bulundurlar. Örnek olarak tasarım aşamasında yer alan bir uçağı düşündüğümüz zaman, uçağın akış yapısını incelerken gerçekte var olan halini kullanmak yerine belirli ölçülerde küçültmüş modelinin rüzgar deneyine tabi tutarız. Tarım sektöründe ise bir bitkinin bütün şartnameleri incelenip bitkinin veriminde artış çalışmaları yapılırken, bitkinin küçük bir modeli de laboratuvar ortamında değişik parametrelere göre değerlendirilmiş olup veriler analize tabi tutulurlar. Optimizasyon problemleri için oluşturulan modeller ise sistemlerin işleyişlerini ve özelliklerinin net ortaya koyan, sistemlerin içindeki ve çevrelerindeki diğer etmenlerle olan ilişkilerini kapsayan matematiksel ifadelerden oluşmaktadır. Aşağıda belirtilmiş olduğu gibi, bu matematiksel ifadeler şu şartları açıkça göstermelidir (Türkay 2019).

- Sistemin net olarak değerlendirilebilen özelliklerini içeren parametreler
- Optimum sonuçları verebilecek karar değişkenler
- Sınır değerlerini belirleyen kısıtlar

Denklem 2.13 de bu parametrelerin matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \max z &= f(x,y) \\
 g(x,y) &= 0 \\
 h(x,y) &\leq 0
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Yukarıda açıklamış olduğumuz optimizasyon probleminde sistemin performans ölçütü veya diğer bir adıyla amaç fonksiyonu $z=f(x,y)$ ile ifade edilmiş ve karar değişkenleri x ve y 'nin bu kısıtı en iyileyecek değerlerin bulunması amaçlanmaktadır. Sistemin özellikleri ise $g(x,y)$ eşitliği ve $h(x,y)$ eşitsizlikleri belirlenmiştir. Ayrıca karar değişkenleri iki farklı türde ifade edilmiştir: n boyutlu uzayda herhangi bir reel değeri alabilen sürekli değişkenler (x) ve herhangi bir tamsayı değeri alabilen tam sayılı değişkenler (y). Optimizasyon modellerini içerdikleri karar değişkenlerinin, amaç fonksiyonunun ve sistem kısıtlarının özelliklerine göre sistem parametrelerinin bilinen sabit değerlere aldığı durumlarda aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Türkay 2019).

2.6.2.Doğrusal Programlama Modelleri

Doğrusal programlama modelleri yalnızca sürekliliği sağlanmış değişkenleri ve doğrusal amaç fonksiyonları içerir. Bu programlama modeli optimizasyon modelleri arasında en çok kullanılan modeldir. Doğrusal programlama modelleri bilimsel, endüstriyel ve ekonomik problemlerin modellenmesinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu bağlamda genelde işletmelerde kullanılan verimliliğin optimizasyonu modelleri doğrusal programlama modelidir (Türkay 2019).

2.6.3.Tamsayı-Karışık Doğrusal Programlama Modelleri

Tamsayı-karışık doğrusal programlama modellerinde doğrusal programlama özelliklerine ilaveten karar değişkenleri de tam sayılı değerler alabilirler. Örneğin ele alınan problem masa, sandalye, otomobil vb. üretimlerinin optimum düzeyini bulmak ise bu durumda 1.72 masa, 5.6 sandalye veya 103.6 otomobil gibi çözümler anlamlı

olmayacaktır. Bazı durumlarda bu değerleri en yakın tamsayıya yuvarlamak düşünülse de çözümü optimalden uzaklaştırabilir. Hatta uygun olmayan çözümler verebilir (Türkey 2019).

2.6.4.Doğrusal Olmayan Programlama Modelleri

Doğrusal olmayan programlama modellerinde amaç fonksiyonu veya kısıtlardan bazıları doğrusal değildir. Optimizasyon sonucunda amaç fonksiyonu en iyileyecek karar değişkenleri, x , n boyutlu uzayda herhangi bir gerçek değeri alabilirler (Türkey 2019).

2.6.5.Tamsayı-Karışık Doğrusal Olmayan Programlama Modelleri

Bu modeller amaç fonksiyonunda ve/veya kısıtlarda doğrusal olmayan ifadeleri ve tamsayılı değişkenleri kapsamaktadır. Bu modellerin genel hali bu bölümün başında verilmiştir (Türkey 2019).

2.7.I-Sight Programında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları

Abaqus programında oluşturulan parametrik analiz datasındaki iş koşuturulur. İş koşuturulduktan sonra elde edilen ODB (OpenDocumentdatabase) dosyasında çıktılar alınarak I-Sight uygulaması içerisinde yer alan uygun optimizasyon algoritması seçilir (Anonim 2020). I-Sight programında kullanılan algoritmalar:

- 1) Adaptif DOE
- 2) Arşiv Bazlı Mikro Genetik Algoritma
- 3) Adaptif Simülasyon Yaklaşımı
- 4) Downhill Simpleks
- 5) Evol Optimizasyon Algoritması
- 6) Karışık Tam Sayılı Dördüncü Derece Programlama
- 7) Çoklu Ada Genetik Algoritması
- 8) Çok Fonksiyonlu Optimizasyon Sistemi
- 9) Hooke-Jeeves Direkt Metod

Adaptif DOE (Design of Experiment) metodu çözümünün çok uzun süre almasından ve yüksek işlemcili bilgisayar gerektirmesinden dolayı çok tercih edilmez.

Arşiv Bazlı Mikro Genetik Algoritma metodu çok yüksek nonlinearite içeren problemlerde kullanılır (Anonim 2020). Çözüm süresinin yüksek olması ve sınır şartlarının oluşturulmasının zor olması sebebiyle zor tercih edilir. Arşiv bazlı mikro genetik algoritmayı ifade etmek gerekirse:

$$\min_x f(x) \quad (2.14)$$

$$b(x) \geq 0 \quad (2.15)$$

$$c(x) = 0 \quad (2.16)$$

Denklem 2.14'te fonksiyonu minimum yapan x değeri aranmaktadır. Denklem 2.15 ve Denklem 2.16'da kısıt fonksiyonları verilmektedir. Lagrange çarpanını denklem 2.17'deki gibidir.

$$L(x, \gamma, \sigma) = f(x) - \gamma b(x) - \sigma c(x) \quad (2.17)$$

Denklem 2.17'de Lagrange denkleminin f fonksiyonundan belirli katsayılarla çarpılmış kısıt denklemlerinin çıkarılmasıyla elde edildiği açıklanmaktadır.

Arşiv bazlı mikro genetik denklemini sonuç olarak denklem 2.18'de verilmiştir.

$$\min_d f(x_k) + \nabla f(x_k)^T d + 0.5 d^T \nabla^2_{xx} L(x_k, \gamma_k, \sigma_k) d \quad (2.18)$$

$$b(x_k) + \nabla b(x_k)^T d \geq 0 \quad (2.19)$$

$$c(x_k) + \nabla c(x_k)^T d = 0 \quad (2.20)$$

Downhill Simpleks ve Adaptif simülasyon metodu iyice şekillendirilmiş sürekli olmayan tasarım şartlarında kullanılır (Anonim 2020).

Evol Metodu da Downhill Simpleks metoduna benzer olmasına rağmen yüksek nonlinearite içermesi sebebiyle çözüm süresi uzundur (Anonim 2020).

Downhill Simpleks bir alt bölge boyunca uzayı örnekler ve en kötü noktadan simpleksin karşı yüzü yönünde daha iyi çözümlere doğru hareket eder (Anonim 2020).

Yokuş aşağı tek yönlü yöntem, geometrik olarak sezgisel bir algoritmadır. Bir simpleks, n+1 köşeden oluşan n boyutlu bir cisim olarak tanımlanır. Her tepe noktasının konumunun belirtilmesi, simpleksi tam olarak tanımlar. İki boyutta, tek yönlü bir üçgendir. Üç boyutta, bir tetrahedrondur. Algoritma ilerledikçe, tek yönlü adım serisi

aracılığıyla minimumun konumuna doğru aşağı doğru yol alır. Bu adımlar, amaç fonksiyonunun en büyük (en kötü) olduğu simpleksin tepe noktasının simpleksin karşı yüzü boyunca daha düşük (daha iyi) bir noktaya taşınmasından oluşan yansımalarla bölünebilir. Yansımalar, simpleksin hacmini korur. Mümkün olduğunda, tek yönlü boyutu artırmak ve daha büyük adımlara izin vererek yakınsamayı hızlandırmak için yansımaya bir genişletme eşlik edebilir. Tersine, kasılmalar simplex'i "küçülterek" minimuma yerleşmesine veya bir kum saatinin boynu gibi küçük bir açıklıktan geçmesine izin verir (Anonim 2020). Bu yöntem, büyük başlangıç adımları ile başlatıldığında global minimumu bulma olasılığı en yüksek olan yöntemdir. İlk simpleks daha sonra tasarım alanının daha büyük bir bölümünü kaplayacak ve yerel bir minimuma takılma şansı daha az olacaktır. Bununla birlikte, karmaşık hiper boyutlu topografyalar için yöntem bozulabilir (Anonim 2020).

İki boyutlu bir örnek tanımlamak gerekirse;

$$f(x,y) = X^2 + Y^2 \quad (2.21)$$

Denklem 2.21'de iki boyutlu bir amaç fonksiyonu gösterilmiştir.

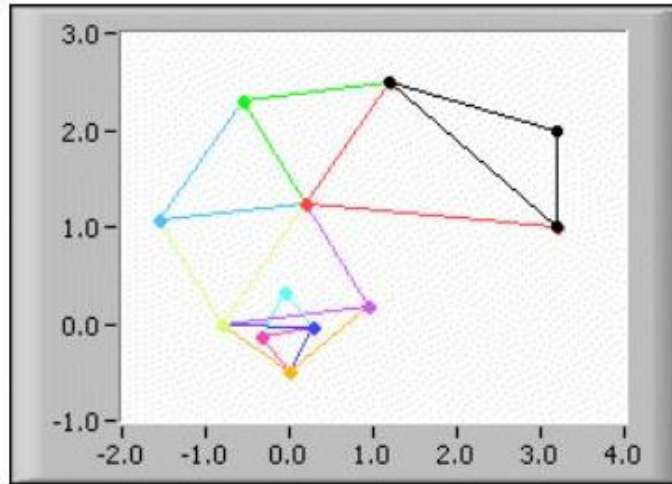
Başlangıç noktası olarak [3.2,1] seçilirse;

$$X : [x,y] \quad (2.22)$$

Denklem 2.22'de başlangıç noktasına ait denklem verilmiştir.

$$f(X) : [X*X + Y*Y] \quad (2.23)$$

Denklem 2.23'e ait grafik Şekil 2.28'de gösterilmiştir.



Şekil 2.28 2D Down Hill Simplex Grafik Örneği (Anonim 2020)

Hooke-Jeeves metodu direkt çözüme giden bir metottur. Lineer ve nonlinear tasarım şartları için uygundur. Çözümde süreklilik hâkim olması sebebiyle çözüm süresi uzundur. Kauçuk malzemelerin optimizasyonunda özellikle tercih edilirler (Anonim 2020).

Çok fonksiyonlu optimizasyon sistemi de hem sürekli optimizasyon problemleri için hem de bir veya daha fazla tasarım değişkeninin bir tamsayı alanıyla sınırlandırıldığı tamsayı veya ayrık tasarım alanı optimizasyonu için verimli bir şekilde kullanılabilir. Optimizasyon sırasında, tüm ayrık değişkenler dahili olarak 1'den izin verilen değer sayısına kadar bir değer aralığına sahip tamsayılar olarak temsil edilir (Anonim 2020). Soruna sürekli bir çözüm elde etmek için başlangıçta bir SQP (successive quadratic programming) algoritması yürütür. Bu aşamada tüm tamsayı değişkenler, minimum adım boyutu 1.0 olan sürekli değişkenler olarak ele alınır (Anonim 2020).

Herhangi bir tamsayı (veya ayrık) değişken varsa MOST, değiştirilmiş dal-sınır algoritması için başlangıç noktası olarak sürekli çözümü kullanacaktır. Bu aşamada, tamsayı değişkenleri birer birer bırakılır. İndirgenmiş sürekli optimizasyon problemi, düşürülen değişkenlerin her biri için, değerlerini daha önce bulunan optimum değerlerinin üstünde ve altında tamsayı seviyelerinde sabitleyerek çözülür. Yine, kalan tüm tamsayı değişkenleri, minimum adım boyutu 1.0 olan sürekli değişkenler olarak ele alınır (Anonim 2020).

Bu teknik, altta yatan sürekli bir tasarım alanı olduğunu varsayar ve buna göre hareket eder. Bu teknik, tamamen kombinatoriyal optimizasyon için uygun değildir (Anonim 2020).

Çoklu Ada Genetik Algoritmasında (MIGA), diğer genetik algoritmalarda olduğu gibi, her tasarım noktası, amaç fonksiyonu ve kısıtlama cezası değerine bağlı olarak belirli bir uygunluk değerine sahip bir birey olarak algılanır. Amaç fonksiyonu ve ceza değeri daha iyi olan bir bireyin uygunluk değeri daha yüksektir. Her birey, tasarım değişkenlerinin değerlerinin 0 ve 1 karakterlik bir ikili diziyeye dönüştürüldüğü bir kromozom tarafından temsil edilir. Bu dönüşüme bireyin "kodlaması" denir. Her birey popülasyonu (bir dizi tasarım noktası), "seçim", "çaprazlama" ve "mutasyon" gibi genetik işlemlerle değiştirilir. Bir popülasyonun her tasarımı daha sonra değerlendirilir ve uygunluk değeri belirlenir.

Orijinal tasarım setinden yeni bir tasarım popülasyonu seçilir: en uygun şemanın hayatta kalmasına dayalı bir süreç. Genetik çaprazlama işlemiyle yeni tasarımlar yaratılır: iki bireyin kromozomları 2 noktada çaprazlanır ve bu noktalar arasındaki genler, iki kromozomda yer değiştirerek iki yeni bireyle sonuçlanır. Mutasyonun genetik işlemi, popülasyonun değişkenliğini daha da artırmak ve evrim sürecindeki durgunluğu önlemek için bir kromozomda rastgele seçilen bir genin değerini değiştirir. Çok Adalı Genetik Algoritma, önceki nesildeki en iyi bireyleri değiştirmeden korur. Bu işleme "elitizm" denir. Elitizm, en iyi genetik materyalin çocuk nesline aktarılmasını garanti eder (Anonim 2020).

Çoklu Ada Genetik Algoritmasındaki seçim işlemi, "turnuva seçimi" denilen şemayı kullanır. Turnuva seçiminde, en iyi bireyler tüm popülasyondan değil, rastgele seçilen bireylerin daha küçük bir alt kümesinden seçilir. Bu şema, çocuk popülasyonunda yinelenen bireylere izin verir. Her bir en iyi bireyin seçildiği alt kümenin boyutu, ilgili turnuva boyutunun değeri kullanılarak hesaplanır. Göreceli turnuva boyutunu azaltmak, seçim sürecindeki rastgeleliği artıracaktır. Turnuva boyutunu artırmak, çocuk popülasyonundaki en iyi bireylerin daha fazla kopyalanmasına neden olacaktır (Anonim 2020).

Çoklu Ada Genetik Algoritmasındaki seçim işlemi, "turnuva seçimi" denilen şemayı kullanır. Turnuva seçiminde, en iyi bireyler tüm popülasyondan değil, rastgele seçilen bireylerin daha küçük bir alt kümesinden seçilir. Bu şema, çocuk popülasyonunda yinelenen bireylere izin verir. Her bir en iyi bireyin seçildiği alt kümenin boyutu, ilgili turnuva boyutunun değeri kullanılarak hesaplanır. Göreceli turnuva boyutunu azaltmak, seçim sürecindeki rastgeleliği artıracaktır. Turnuva boyutunu artırmak, çocuk popülasyonundaki en iyi bireylerin daha fazla kopyalanmasına neden olacaktır (Anonim 2020).

Çok Adalı Genetik Algoritmayı geleneksel genetik algoritmalarından ayıran temel özelliği, her birey popülasyonunun "adalar" adı verilen birkaç alt popülasyona bölünmesidir. Tüm geleneksel genetik işlemler, her alt popülasyonda ayrı ayrı gerçekleştirilir. Daha sonra her adadan bazı bireyler seçilir ve periyodik olarak farklı adalara göç eder. Bu işleme "göç"

denir. Göç sürecini iki parametre kontrol eder: her göç arasındaki nesil sayısı olan göç aralığı ve göç anında her bir adadan göç eden bireylerin yüzdesi olan göç hızı. Adaptif simülasyon yaklaşımı birçok parametreyi sabitlemiş fiziksel yaklaşımlar yardımıyla zaman hassasiyetli şekilde çözmeye yarar (Anonim 2020).

Zamana ve boyuta bağlı olarak aşağıdaki denklemlerle çözüm arayışı içindedir (Denklem 2.24).

$$\alpha_k^i \in [A_i, B_i] \quad (2.24)$$

Denklem 2.25 de görüldüğü üzere değişken bir y^i durumunda,

$$\alpha_{k+1}^i = \alpha_k^i + y^i [B_i - A_i] \quad (2.25)$$

Bu durumda genel fonksiyonu (Denklem 2.26) tanımlaması gerekirse;

$$g_T(y) = \prod_{i=1}^D \frac{1}{2^{((1y^i)+T_i) \ln\left(1+\frac{1}{T_i}\right)}} \equiv \prod_{i=1}^D g_T^i(y^i) \quad (2.26)$$

Denklem 2.26'da zamana ve boyuta bağlı g fonksiyonların birden başlayarak kısıt parametresine (D) kadar olan tümünün toplanmasını anlatmaktadır.

Hooke-Jeeves metodu direkt çözüme giden bir metottur. Lineer ve nonlineer tasarım şartları için uygundur. Çözümde süreklilik hâkim olması sebebiyle çözüm süresi uzundur. Kauçuk malzemelerin optimizasyonunda özellikle tercih edilirler (Anonim 2020). Bu sebeple tez çalışmamızda optimizasyon çözüm tekniği olarak Hooke-Jeeves metodu seçilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Malzeme Geliştirme

Bu aşamada temel olarak; yeni nesil elektrikli araçlarda kullanılmak üzere yüksek devirlerde çalışabilecek sızdırmazlık elemanına ait malzeme geliştirme ve malzeme testleri ile ilgili faaliyetlere başlanmıştır. Bu kapsamda FKM, ACM, PTFE, dolgu, aktivatör, pigment, proses kolaylaştırıcı ve vulkanizatör gibi farklı dolgu ya da matris malzemeler ile farklı karışım oranlarında yeni yapılar geliştirilmeye başlanmıştır. Bahsedilen yeni yapıların elde edilebilmesi için bu dönem içerisinde gerçekleştirilen her bir reçete tasarımı ile geliştirilen malzemelere; sürtünme katsayısı, ısı iletkenliği, ısıl genişleme, basma mukavemeti, çekme mukavemeti, sertlik değeri, yaşlandırma, aşınma, kalıcı deformasyon, gerilme-gevşeme, karbonlaşma vb. özelliklerinin belirlenmesine yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Uygulanacak testlerin sonucu olarak elde edilecek değerler malzeme karakterizasyonunun belirlenmesinde ve dinamik sızdırmazlık elemanına ait sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilecek dinamik ve statik analizler sırasında kullanılacaktır. Malzeme geliştirme aşamasında deney tasarımı yöntemi ile varyans analizi (ANOVA) yapılarak parametrelerin etkisi incelenmiştir. Deney tasarımlarına ait örnek verilerden biri Şekil 3.1' de gösterilmiştir.

Şekil 3.1' de yer alan parametreler bir döner mil keçesi hamurunun içeriğinde mevcut olan polimer, dolgu, aktivatör ve pişirici faktörleri ele alınmıştır. Dolgular, güçlendirici dolgu maddeleri ve güçlendirici olmayan dolgu maddesi olarak iki gruba ayrılır. Güçlendirici dolgu maddeleri vulkanize edilen nano kompozitlere iyi mekanik özellikler kazandırır, ancak güçlendirici olmayan dolgu maddeleri genellikle karışımın maliyetini azaltmak için kullanılır. Aktivatörler, önce kauçuk çözücü yapılar oluşturmak için hızlandırıcılarla reaksiyona girerek vulkanizasyon oranını arttıran ve vulkanizasyon süresini (kürleme süresini) azaltan kimyasallardır. Çinko oksit ve sterik asit sistemi, kükürt ile kürlenmiş karışımlarda genel olarak kullanılan aktivatör sistemidir. Genel olarak kullanılan pişirici ajanlar kükürt, peroksitler ve metal oksitlerdir. Bu malzemeler kauçuk matrisi çapraz bağlamak için kullanılır. Bu çapraz bağlar karbon-karbon, karbon-sülfür ve sülfür-sülfür bağları gibi farklı bağlar oluşturur. Bağ enerjisi aynı zamanda elastomer matrisinde oluşturulan çapraz bağlanma türüne de bağlıdır (Kasım 2018).

Std	Run	Factor 1 A:Polimer1 phr	Factor 2 B:Polimer2 phr	Factor 3 C:Dolgu1 phr	Factor 4 D:Dolgu2 phr	Factor 5 E:Dolgu3 phr	Factor 6 F:Aktivatör1 phr	Factor 7 G:Aktivatör2 phr	Factor 8 H:Pişirici1 phr	Factor 9 J:Pişirici2 phr	Response 1 R1
1	22	50	30	35	15	0	6	3	3	1,5	
2	24	70	30	35	15	0	0	0	0	0	
3	23	50	50	35	15	0	0	0	0	1,5	
4	21	70	50	35	15	0	6	3	3	0	
5	25	50	30	45	15	0	0	0	3	0	
6	27	70	30	45	15	0	6	3	0	1,5	
7	17	50	50	45	15	0	6	3	0	0	
8	9	70	50	45	15	0	0	0	3	1,5	
9	3	50	30	35	25	0	0	3	0	0	
10	11	70	30	35	25	0	6	0	3	1,5	
11	31	50	50	35	25	0	6	0	3	0	
12	18	70	50	35	25	0	0	3	0	1,5	
13	2	50	30	45	25	0	6	0	0	1,5	
14	8	70	30	45	25	0	0	3	3	0	
15	10	50	50	45	25	0	0	3	3	1,5	
16	32	70	50	45	25	0	6	0	0	0	
17	1	50	30	35	15	1	6	0	0	0	
18	4	70	30	35	15	1	0	3	3	1,5	
19	6	50	50	35	15	1	0	3	3	0	
20	26	70	50	35	15	1	6	0	0	1,5	
21	28	50	30	45	15	1	0	3	0	1,5	
22	7	70	30	45	15	1	6	0	3	0	
23	30	50	50	45	15	1	6	0	3	1,5	
24	29	70	50	45	15	1	0	3	0	0	
25	13	50	30	35	25	1	0	0	3	1,5	
26	15	70	30	35	25	1	6	3	0	0	
27	5	50	50	35	25	1	6	3	0	1,5	
28	20	70	50	35	25	1	0	0	3	0	
29	14	50	30	45	25	1	6	3	3	0	
30	19	70	30	45	25	1	0	0	0	1,5	
31	12	50	50	45	25	1	0	0	0	0	
32	16	70	50	45	25	1	6	3	3	1,5	

Şekil 3.1 Reçete Alternatifleri

Şekil 3.1’ de gösterilen ilk on reçeteye ait hamurlar 2kg kapasiteye sahip FARREL marka karıştırıcılarda oluşturulmuştur. Bu karışımlara ait testler yapılması için ASTM D12 D tipi tek eksen çekme numuneleri, iki eksen çekme numuneleri, basma numuneleri ve kayma numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelere ait boyut detaylarından daha bahsedilmiştir. Testler sonucunda FKM, ACM ve PTFE malzeme gruplarından; sürtünme katsayısı, ısı iletimi, ısı genleşmesi, gerilme-gevşeme değeri ve elastisite modülü gibi mekanik ve fiziksel değerler açısından optimum olan reçete seçimi yapılmıştır. Deney tasarımının optimize edilmesi sonuçlarının kontrol edilmesi esnasında en önemli parametrelerden biri olan kuru sürtünme katsayısı üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Bu kapsamda yüksek devirli keçelerde kullanılacak malzemenin en önemli parametre olması sebebiyle elastomer geliştirme aşamasında bize yön göstermiştir.

3.2. Malzeme Karakterizasyonu

FKM, ACM, PTFE, dolgu, aktivatör, pigment, proses kolaylaştırıcı ve vulkanizatör gibi farklı dolgu ya da matris malzemeler ile farklı karışım oranlarında yeni yapılar geliştirilmiştir. FKM,ACM,PTFEgruplarının birbirine karşı maliyet ilişkileri incelendiğinde ilk deneme sırasında ACM malzeme kullanılmıştır. ACM malzemedan dört adet farklı reçete geliştirilmiştir. İkinci sırada deneme yapabilmek adına oniki adet farklı FKM reçetesi geliştirilmiştir. Her iki ana kategori malzemelerinin numune testleri yapılmış olup mekanik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özellikleri benzer olan malzemelerden kuru sürtünme deneyi yaparak en iyi olan dört tanesi seçilmiştir. Bahsedilen yeni yapıların elde edilebilmesi için bu dönem içerisinde gerçekleştirilen her bir reçete tasarımı ile geliştirilen malzemelere; sürtünme katsayısı, ısı iletkenliği, ısıl genişleme, basma mukavemeti, çekme mukavemeti, sertlik değeri, yaşlandırma, aşınma, kalıcı deformasyon, gerilme-gevşeme, karbonlaşma vb. özelliklerinin belirlenmesine yönelik aşağıdaki testler uygulanmıştır. Şekil 3.2’de basma deneylerine ait numune görselleri mevcuttur. Şekil 3.3’de tek eksen çekme deneylerinde kullanılan numunelerin oluşturulmasına ait görsel mevcuttur.



Şekil 3.2 Tez Kapsamında Hazırlanan Numunelere Ait Görsel (Basma Deneyi)



Şekil 3.3 Tez Kapsamında Hazırlanan Numunelere Ait Görseller (Tek Eksen Çekme Deneyi)

3.2.1.Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk Ölçümü: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelere ait yoğunluğun elde edilebilmesi için yapılmıştır. 6 adet farklı numune ölçülüp ortalama değer kabul edilmiştir. Test için çapı 16 mm ve yükseklik 13 mm olacak silindirik numuneler hazırlanmıştır. Şekil 3.4'te yoğunluk ölçümü görülmektedir. Yoğunluk ölçümü ağırlık hacim ilişkisi prensibine göre yapılmıştır (ASTM D297). Test için FLY marka hassas terazi kullanılmıştır. Kullanılan terazinin hassasiyeti ± 0.0001 gramdır. R00 reçetesi 1,1133 g/cm³ , R01 reçetesi 1,1208 g/cm³ , R04 reçetesi 1,1158 g/cm³ , R07 reçetesi 1,1169 g/cm³ , R10 reçetesi 1,1177 g/cm³ , R13 reçetesi 1,1187 g/cm³ ve R16 reçetesi 1,1165 g/cm³ olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.4 Yapılan Yoğunluk Ölçümüne Ait Bir Örnek

3.2.2. Tek Eksen Çekme Deneyi

Tek Eksenli Çekme Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelerin tek eksende çekilmesi durumundaki; kopma mukavemeti, akma değeri, kopma uzaması, elastisite modülünün elde edilebilmesi ve gerilme-şekil değiştirme davranışının tespiti için yapılmıştır. 6 adet farklı numune ölçülüp ortalama değer kabul edilmiştir. Tez için kullanılan numuneler ASTM D412 standardında yer alan D tipi numunelerdir. ZWICK marka tensometrenin altı ayda bir kalibrasyonu yapılmakta olup 0.01 N değerinde ihmal edilebilir seviyede sapması mevcuttur. Test hızı 500 mm/dk olarak uygulanmıştır. Şekil 3.5'te test esnasında alınmış bir görsel bulunmaktadır. Optimize malzeme sonucu EK-16'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.5 Yapılan Tek Eksenli Çekme Deneyine Ait Bir Örnek

3.2.3.Çift Eksen Çekme Deneyi

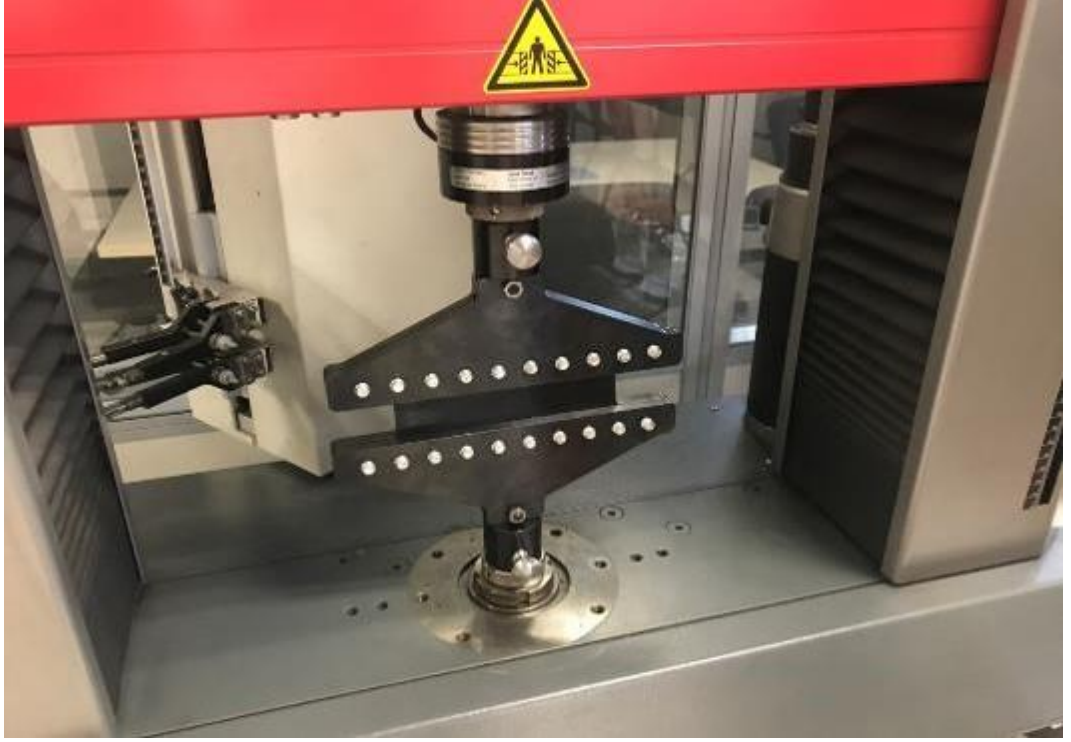
Çift Eksenli Çekme Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelerin tek eksenle çekilmesi durumundaki; kopma mukavemeti, akma değeri, kopma uzaması, elastisite modülünün elde edilebilmesi ve gerilme-şekil değiştirme davranışının tespiti için yapılmıştır. 6 adet farklı numune ölçülüp ortalama değer kabul edilmiştir. Çift eksen çekme deneyi SKT firmasının kendi iç standartlarına göre belirlenmiş olup numune ebatları Şekil 2.24'te gösterilmişti ve numune ölçüleri mm cinsinden belirlenmiştir. Testler yapılırken ZWICK marka tensometrenin hızı 100 mm/dk olarak belirlenmiştir. Örnek bir görsel Şekil 3.6'da verilmiştir. Optimize malzeme sonucu EK-17'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.6 Yapılan Çift Eksenli Çekme Deneyine Ait Bir Örnek

3.2.4. Düzlemsel Kayma Deneyi

Düzlemsel Kayma Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelerin düzlemsel olarak çekilmesi durumundaki; kayma mukavemeti, kayma modülü, kayma birim şekil değiştirme ve asal birim şekil değiştirme değerinin tespit edilebilmesi için Zwick 10kN tensometrede yapılmıştır. Kayma deneyi esnasında tasarımı tez esnasında geliştirilmiş aparatlar kullanılmıştır. Test cihazı olarak ZWICK marka tensometre kullanılmıştır. Standart sapması 0,01 N olarak ölçülmüştür. Test esnasında kullanılan numunelere ait oluşturulan resim Şekil 2.27’de daha önce paylaşılmıştı. Şekil 3.7’de test esnasında alınmış görüntü bulunmaktadır. Optimize malzeme sonucu EK-19’da paylaşılmıştır.



Şekil 3.7 Yapılan Düzlemsel Kayma Deneyine Ait Bir Örnek

3.2.5.Basma Deneyi

Basma Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelere ait; bası mukavemeti, bası gerilmesi, kopma gerilmesi değerlerinin elde edilebilmesi ve birim şekil değiştirme enerjilerinin tespiti için İnova markalı cihazda yapılmıştır. İnova markalı 250 kN test cihazımızın standart sapması 0.1 N olarak ölçülmüştür. Hacimsel basma deneyi esnasında piston hızı 100 mm/dk olarak seçilmiştir. Optimize malzeme sonucu EK-18'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.8 Yapılan Düzlemsel Kayma Deneyine Ait Bir Örnek

3.2.6. Isıl Uzama Katsayı Saptama Deneyi

Isıl Uzama Katsayısının Saptanması Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelere ait ısıl uzama katsayısı değerinin elde edilebilmesi için yapılmıştır. 6 adet farklı numune ölçülüp ortalama değer kabul edilmiştir.

Çizelge3.1 Isıl Uzama Ölçümü

Termal Uzama Katsayısı		01-KFD-415	02-KFD-428	03-FR-04_017	04-KFD-283
Değer	Sıcaklık	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Gerçek Alpha	60 °C	103,1474	97,4104	79,0239	44,3028
Ortalama Alpha	59,5-60,5 °C	103,1118	99,7897	74,3679	40,3383
Ortalama Alpha	25-60 °C	79,535	76,0312	71,9464	47,6984

3.2.7. Isıl İletkenlik Katsayı Saptama Deneyi

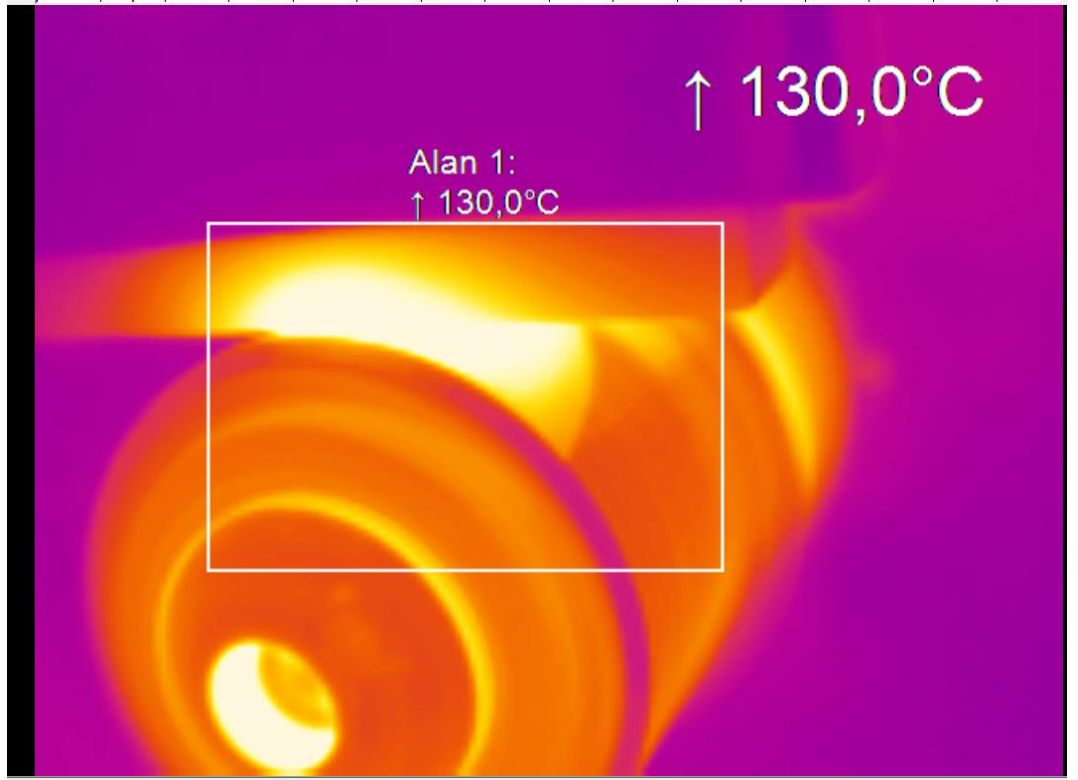
Isıl İletkenlik Katsayısının Saptanması Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelere ait ısıl iletkenlik katsayısı değerinin elde edilebilmesi için yapılmıştır. 6 adet farklı numune ölçülüp ortalama değer kabul edilmiştir.

TEST SONUÇLARI (DTC - 300)			
Hamur -1-			
Sıcaklık (°C)	Kalınlık (mm)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Toplam Termal Direnç (m.K/W)
61.22	2	0.229	0.00873
100.66	2	0.228	0.00878
133.91	2	0.224	0.00893
Hamur -2-			
Sıcaklık (°C)	Kalınlık (mm)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Toplam Termal Direnç (m.K/W)
61.08	2	0.222	0.00902
100.65	2	0.222	0.00903
133.92	2	0.224	0.00894

Şekil 3.9 Isıl İletkenlik Deney Sonuçları

3.2.8. Kuru Sürtünme Katsayı Saptama Deneyi

Kuru Sürtünme Katsayısının Saptanması Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelere ait kuru ortamdaki sürtünme katsayısı değerinin elde edilebilmesi için Bruker Cetr marka tribometrede yapılmıştır. 6 adet farklı numune ölçülüp ortalama değer kabul edilmiştir. Bruker marka test cihazında kullanılan yük hücresi her test öncesi kalibre edilebilmektedir. Yük hücresi 100 ±0.1 N hassasiyetlidir. Testler esnasında standart sapma ihmal edilebilir seviyededir. Test esnasında kullanılan numune ölçüleri 40 x 24 x 60 mm olarak belirlenmiştir. Test esnasında F_z doğrultusunda 15 N kuvvet, 60 dakika sürede uygulanmaktadır. Test esnasında sıcaklık Samsung marka SCU 2370 model termal kamera yardımıyla kontrol edilmektedir. Termal kameranın hassasiyeti ±1 °C olarak katalogunda belirtilmektedir. Milin dönüş hızı olarak Bruker marka cihazın maksimum hızı olan 7 000 Rpm seçilmiştir. Test sonunda kauçuk malzemelerin birbirleri üzerindeki farkları araştırılmıştır. Şekil 3.10'da kuru sürtünme deneyine ait bir görsel paylaşılmıştır.



Şekil 3.10 Kuru Sürtünme Deneyi

Deneyle sonuçunda optimize edilmiş malzemeye ait sürtünme katsayısı 100 °C de 0,5 olarak ölçülmüştür.

3.2.9.Yağlı Sürtünme Katsayı Saptama Deneyi

Yağlı Sürtünme Katsayısının Saptanması Deneyi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelere ait yağlı ortamdaki sürtünme katsayısı değerinin elde edilebilmesi için yapılmıştır. 6 adet farklı numune ölçülüp ortalama değer kabul edilmiştir. Bruker marka test cihazında kullanılan yük hücresi her test öncesi kalibre edilebilmektedir. Testler esnasında standart sapma ihmal edilebilir seviyededir. Test esnasında kullanılan numune çapı 32 mm olarak belirlenmiştir. Test esnasında F_z doğrultusunda 15 N kuvvet, 60 dakika sürede uygulanmaktadır. Test esnasında sıcaklık Samsung marka SCU 2370 termal kamera yardımıyla kontrol edilmektedir. Milin dönüş hızı olarak Bruker marka cihazın maksimum hızı olan 7 000 Rpm seçilmiştir. Yağ dolum haznesi çalışma yerini simule etmesi adına yarıya kadar 5W/30 değerinde yağ ile doldurulmuştur. Test sonunda

kauçuk malzemelerin birbirleri üzerindeki farkları araştırılmıştır. Şekil 3.11’de yağlı sürtünme deneyine ait bir görsel paylaşılmıştır.

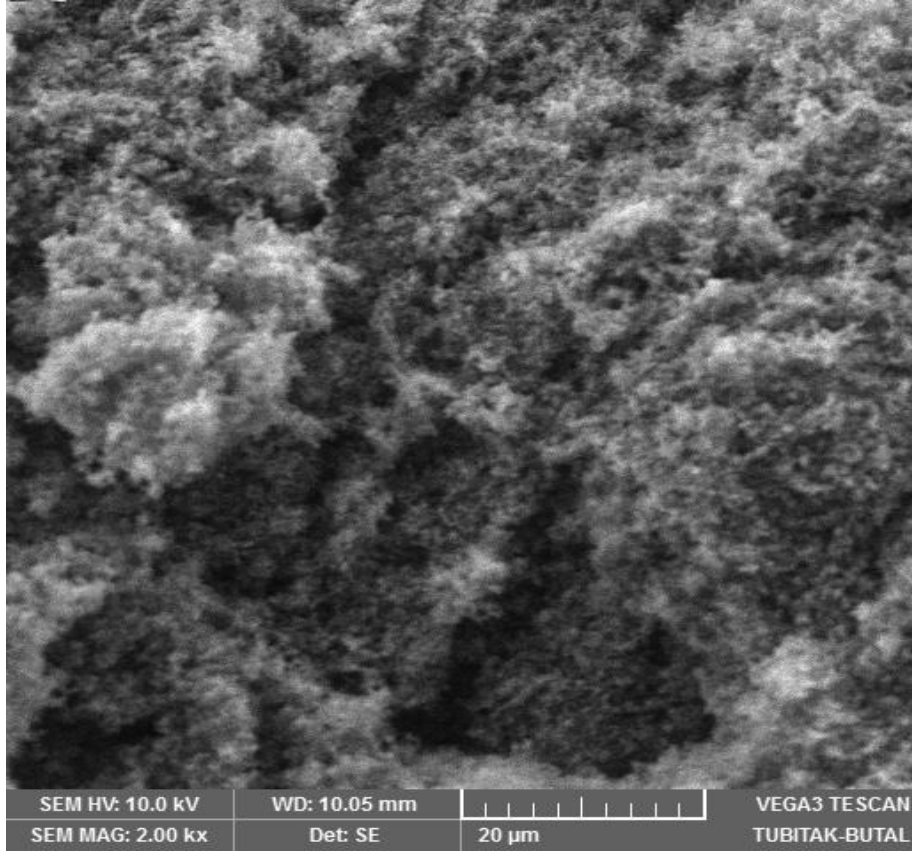


Şekil 3.11 Yağlı Sürtünme Deneyi

Deney sonucunda 160°C’de 7 000 Rpm sürtünme katsayısı 0,05 olarak ölçülmüştür. Sonlu elemanlar çalışmalarında bu veri girdi olarak kullanılacaktır. Test parametrelerinin F_z doğrultusunda 7 N kuvvet, 7 000 Rpm ve 60 dakika sürede uygulanması durumunda test sıcaklığı 130 °C olarak ölçülmüştür. Test sonunda sürtünme katsayısı 0,03 olarak ölçülmüştür.

3.2.10.SEM Testi

SEM Testi: Sızdırmazlık elemanlarının imalatında kullanılan malzemelere ait SEM testi için yapılmıştır. Bu testin yapılması esnasında Vega 3 Tes-Can cihazıyla 10kV uygulanmıştır. Finalize edilmiş kauçuk malzemeye ait SEM görseli Şekil 3.12’de paylaşılmıştır. Şekil 3.12’de mikro asperasyon açısından pozitif etkiye sahip gözenek yapısı paylaşılmıştır.



Şekil 3.12 SEM Görüntüsü

Testler sonucunda FKM, ACM ve PTFE malzeme gruplarından; sürtünme katsayısı, ısı iletimi, ısıl genleşmesi, gerilme-gevşeme değeri ve elastisite modülü gibi mekanik ve fiziksel değerler açısından optimum olan aşağıdaki reçete seçimi yapılmıştır. Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’ de reçetelere ait örnek detaylar bulunmaktadır. Çizelge 3.3’de verilen FKM malzemenin yağlı sürtünme katsayısı 7 000 Rpm’de 0.05 olarak ölçülmüştür. Yağlı sürtünme deneyi test sıcaklığı 160 °C olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.4’de verilen ACM malzemenin yağlı sürtünme katsayısı 7 000 Rpm’de 0.07 olarak ölçülmüştür. Yağlı

sürtünme deneyi test sıcaklığı 160 °C olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda yağlı sürtünme deneyleri karşılaştırıldığında en iyi sonucu veren FKM ve ACM reçeteleri seçilmiştir. Bu seçilen malzemelere ait malzeme karakteristik testleri yapılmış olup sonlu elemanlar için girdi oluşturulmuştur.

Çizelge3.3 FKM Reçetesi

FKM Reçetesi			
	Phr		
Polimer 1	70	60	50
Polimer 2	30	40	50
Dolgu 1	35	40	45
Dolgu 2	15	20	25
Dolgu 3	1	1	1

Çizelge3.4 ACM Reçetesi

ACM			
	Phr		
Polimer 1	70	60	50
Polimer 2	30	40	50
Dolgu 1	35	40	45
Dolgu 2	30	35	40
Dolgu 3	5	5	5
Antioksidan 1	2	2	2
Antioksidan 2	1	1	1
Proses Kolaylaştırıcı 1	1,5	1,5	1,5
Proses Kolaylaştırıcı 2	1,5	1,5	1,5
Pişirici 1	4	4	4

3.3.Ürün Tasarım

Döner mil keçelerinin tasarımları esnasında çeşitli tasarım kriterleri dikkate alınmaktadır. Bu kriterler aşağıdaki gibi listelenmiştir (Türkel 2016).

1. Yuva çapı ve yuva yüzey pürüzlülüğü
2. Mil çapı ve mil yüzey pürüzlülüğü
3. Yuva derinliği
4. Mil veya yuva dönüş hızı
5. Döner mil keçesinin çalışacağı sistemin maksimum çalışma sıcaklığı
6. Sistemde kullanılacak yağ bilgisi
7. Döner mil keçesi dudaklarına gelecek basınç bilgisi
8. Çalışacağı ortam bilgisi

Döner mil keçelerinin boyutlarının belirlenmesinde yuva çapı en önemli parametrelerden biridir. İstenilen sıkı geçmeyi sağlayabilmek adına döner mil keçesinin dış çapı ölçüsü yuva iç çapı ölçüsünden büyük olarak tasarlanır. Arzu edilen demontaj kuvvetlerinin sağlanabilmesi adına dış çaplarda tamamen metal yüzey, tamamen kauçuk veya kısmen kauçuk kısmen metal yüzey kullanılabilir. Tasarım aşamasında keçe yuvasının yüzey pürüzlülüğü değerinin düşük olması durumunda keçe çalışma yerinde hareket eder ve sistemde kaçak vermeye sebep olur. Eğer yuva yüzey pürüzlülüğü istenilen değerden daha yüksek olarak işlenirse montaj esnasında keçe üzerinde yamulmalar meydana gelir.

Döner mil keçelerinin dudak sıklıklarının belirlenmesinde en önemli etmenlerden biri mil çapıdır. Her üretici firma kendi elastomer malzemelerine ve mil çaplarına göre standart bir sıklık tablosu oluşturmuştur. Tasarımcı dudak yapısını o standarda uygun şekilde oluşturur. Mil yüzey pürüzlülüğü sızdırmazlık sisteminde kaçak oluşmasını önleyen en önemli parametrelerden biridir. Mil yüzey pürüzlülüğü uygun olmayan sistemlerde erken kaçak meydana gelir.

Döner mil keçelerin yükseklik parametresini belirleyen en önemli parametre yuva derinliğidir. Keçe yüksekliğinin belirlenme işlemi yuvanın tüm yüksekliğinden yuvanın

pah yüksekliği çıkarılarak yapılır. Uygun yükseklikte olmayan keçeler sistemde kaçak problemlerine sebep olur.

Döner mil keçelerinde standart olarak 7m/s hıza kadar herhangi bir ilave yapıya ihtiyaç yoktur. Fakat bu hız aşıldığı durumda dönüş yönü göz önüne alınarak dudakın hava tarafına ilave tırtıl yapıları eklenir. Eklenen tırtıllar sayesinde pompalama oranı artarak keçenin sızdırmazlığı sağlanır. Tek yönlü dönüşlerde yönlü tırtıl yapısı ve çift yönlü dönüşlerde sinüsoidal tırtıl yapısı kullanılır.

Döner mil keçelerinin tasarım kriterlerinin en önemlilerinden biri de çalışma sıcaklığıdır. Çalışma sıcaklığı kullanılabilir elastomer bilgisi hakkında yorum yapmaya olanak sağlamaktadır. Örneğin 100°C'ye kadar NBR malzeme kullanılırken 150 °C'de FKM malzeme kullanılmaktadır.

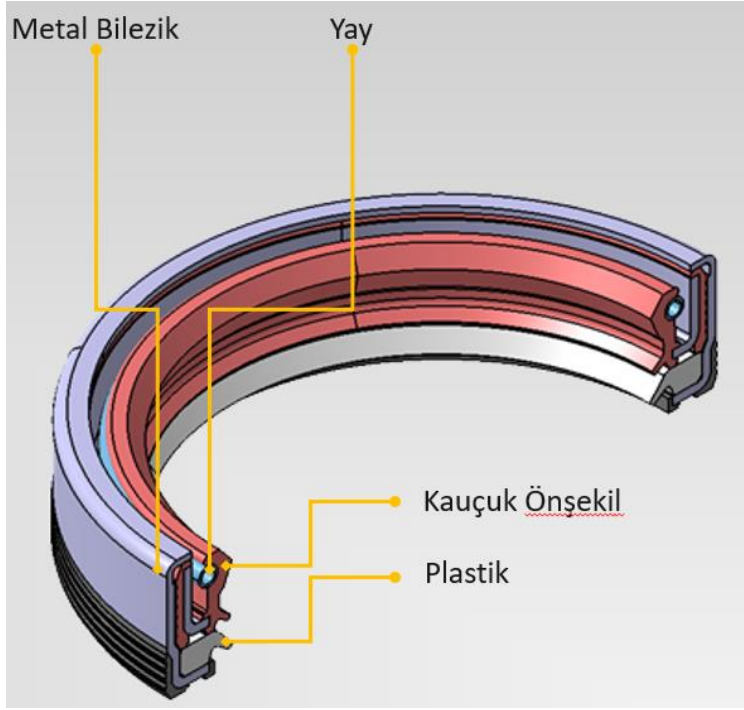
Ürün tasarımının prototip üretim aşamasına geçilmeden öncesinde malzeme testlerinin yapılması gerekmektedir. Yağ–elastomer kimyasal ilişkisinin uyumu mutlaka kontrol edilmelidir. Bazı durumlarda yağda kullanılan ilave katkıları sebebiyle elastomer kimyasal tepkiye girerek özelliklerini kaybetmektedir. Bu durumda keçede belirli bir süre sonra kaçak meydana gelmektedir.

Döner mil keçelerinin dudaklarına gelen basınç keçenin dudak boyu ve dudak yüksekliği parametresini etkilemektedir. Bu kapsamda eğer 0.5 MPa üzerinde bir basınçta çalışacak bir keçe tasarlanacaksa dudak yapısının kısa ve dudak kalınlığının fazla olması gerekmektedir.

Son olarak tasarım kriterlerinin en önemlilerinden biri de döner mil keçesinin çalışacağı ortam bilgisidir. Ortamda ağır şartlar mevcutsa ilave toz dudaklar eklenmesi gerekecektir. İlave edilen her toz dudak mil ve keçe arasındaki iletilen güç kaybını arttıracaktır. Bu sebeple ortama uygun dudak tasarımı hem keçe üreticisi firma açısından çok önemlidir.

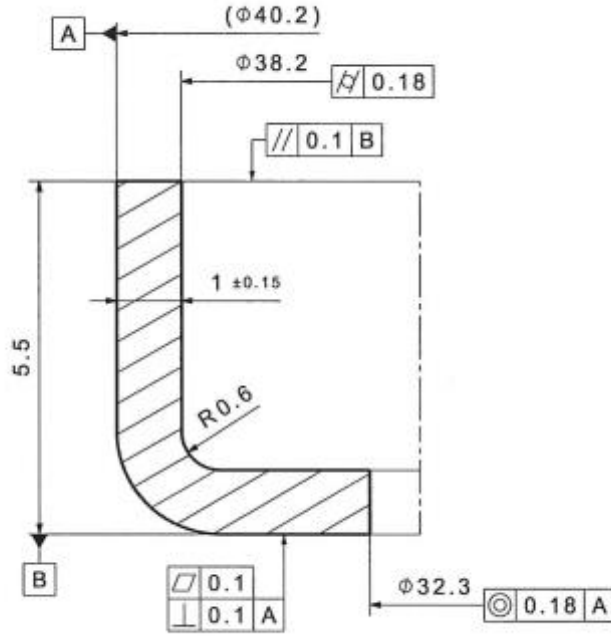
3.3.1.Prototip Üretim

Standart döner mil keçeleri 4 farklı alt mamulden oluşmaktadır. Metal bilezik, elastomer ön şekil, garter yayı ve ihtiyaç olursa plastik destek elemanıdır. Alt mamulleri gösteren detaylar Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Keçe Bileşenleri

Metal bilezik üretimi sac kalıplarında ham sac malzemeden basılarak üretilir. Bilezik şekline göre L tipi, L13 tipi ve U tipi olanları mevcuttur. Keçe tasarımına uygun şekilde bilezik tasarımı tamamlanmış olur. Bilezik tasarımına ait teknik resim Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14 Bilezik Resmi

Metal bileziklerin dış çap toleransları ± 0.2 mm olarak belirlenmektedir. Kalıp merkezleme problemi olmaması adına 0.18 civarında ovallik toleransı tanımlanmıştır. Keçe boyunu etkileyen parametrelerden birisi de bilezik boyu olması sebebiyle tolerans ± 0.1 mm olarak belirlenmektedir. Metal bilezikler basıldıktan sonra üzerlerinde oluşan yağ tabakasının kaldırılması için ilave operasyonlar yapılmaktadır. Fosfat kaplama operasyonuna tabi tutulması gereken bilezikler sonrasında yapıştırıcı kaplama operasyonuna tabi tutulurlar. Fosfatlama operasyonuna ait görsel Şekil 3.15'te paylaşılmıştır. Fosfatlama operasyonundan sonra uygulanan yapıştırıcı operasyonuna ait görsel Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.15 Fosfat Hattı



Şekil 3.16 Yapıştırıcı Hattı

Bir sonraki aşamada ise plakalar şeklinde imal edilen hamurların kalıplarda kullanılmak üzere şekillendirilme ihtiyacı mevcuttur. Hamur üretimine ait görsel Şekil 3.17’de paylaşılmaktadır.



Şekil 3.17 Hamur Üretim Hattı

Plaka şeklinde basılmış hamurlar belirli bir yumuşatma programına tabi tutularak halka halinde önşekil durumuna getirilirler. Önşekil üretim hattına ait görsel Şekil 3.18’de paylaşılmaktadır.



Şekil 3.18 Ön-Şekil Üretim Hattı

Son olarak standart bir keçede bulunması gereken yay etimi yapılır. Yay etimi tamamlandıktan sonra bütün alt komponentler üretilmiş olur. Tel olan hammaddeden eklenmiş yay haline gelene kadar yapılan tüm operasyonlar Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de görülmektedir.



Şekil 3.19 Yay retim Hattı



Şekil 3.20 Yay Ekleme Hattı

Alt komponentler uygun saklama koşullarının sağlanması adına yarı mamul ambarlarında saklanır. İş emri sırası geldiğinde kompresyon presi bölgesine getirilerek üretime başlanır. Şekil 3.21’de vulkanizasyon hattında yer alan kompresyon presler görülmektedir.



Şekil 3.21 Kompresyon Presler

Vulkanizasyon işlemi ortalama 120 s içerisinde tamamlanır. Eğer postkür operasyonu ihtiyacı varsa postkür fırınlarında uygun programda operasyona tabi tutulurlar. Postkür operasyonuna ait Votsch marka fırın Şekil 3.22’de görülmektedir.



Şekil 3.22 Postkür Fırını

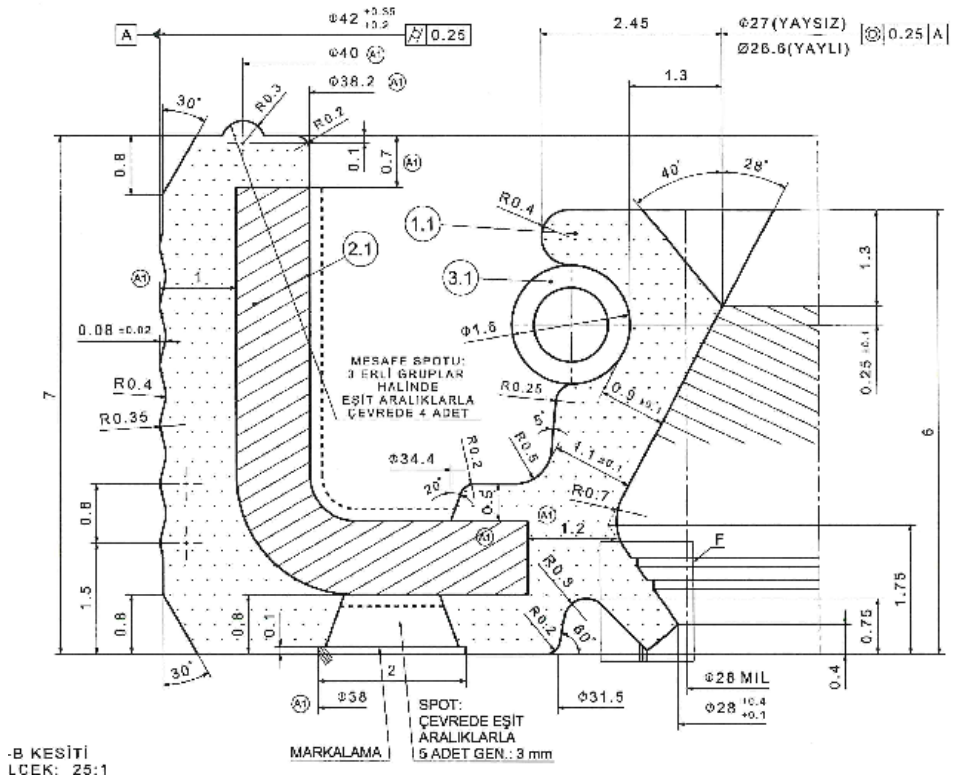
Postkür operasyonu tamamlandıktan sonra dudak kesme ve yay takma operasyonu sonrası ürün finalize edilmiş olur. Şekil 3.23'te manuel olarak beslenen bir kesme tezgahı görseli paylaşılmıştır.



Şekil 3.23 Kesme Operasyonu

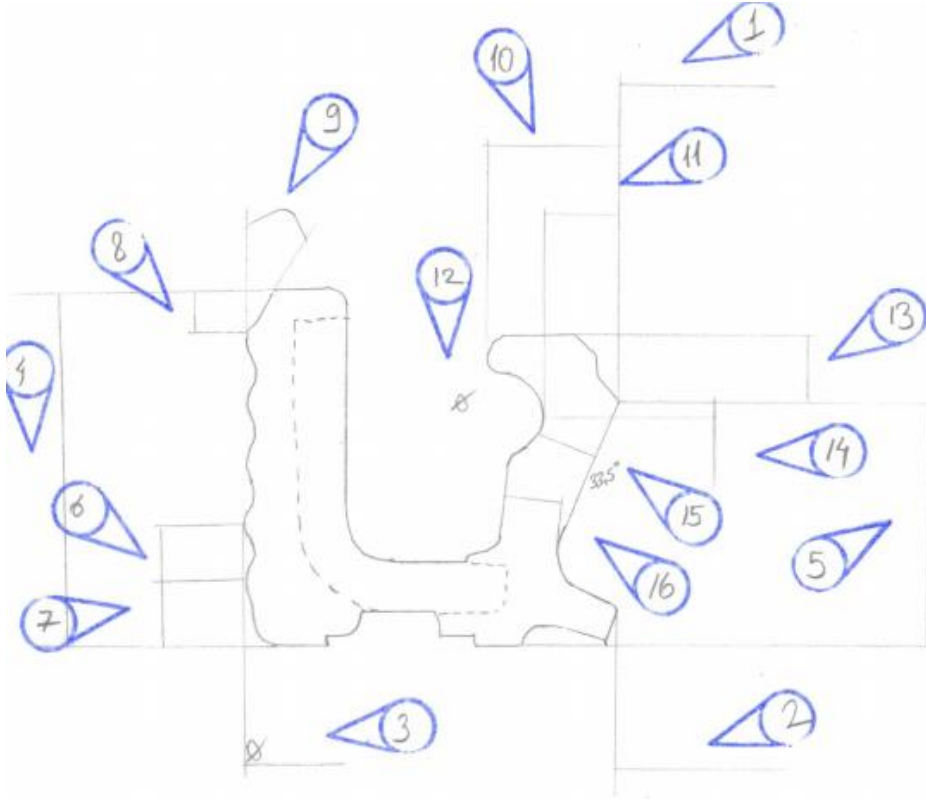
3.3.2.Tasarım Doğrulama ve Test

Prototip ürünlerin basılmasından sonra ürünlere ölçüsel kontroller yapılmalıdır. Ürüne ait ölçüsel kontrollerin uygun olmaması durumunda teknik resme uygun şekilde revizyon yapılmalıdır. Örnek olacak şekilde kullanılan teknik resim Şekil 3.24'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.24 Teknik Resim

Teknik resimlerde kritik tüm ölçüler toleranslarıyla birlikte yer alır. Kalite departmanları bu ölçülerin uygunluğunu profil üzerinden kontrol ederler. Ölçülerin kontrolü Nikon Firmasının ürettiği Nexiv model cihazda yapılmıştır. Nexiv Cihazının ölçüm hassasiyetinin sapması 0.001 mm olarak saptanmıştır. Cihaz yarı otomatik veya full otomatik olarak kullanılabilir. Nexiv cihazında ölçülen değerlerin işlenebilmesi adına Şekil 3.25'te olduğu gibi profil kontrol formu oluşturulur.



Şekil 3.25 Profil Kontrol

Tüm ölçülerin toleranslar dahilinde olmasından sonra radyal kuvvet kontrolü yapılmaktadır. Radyal kuvvet kontrolü şekil 3.26'da gösterilen düzenek yardımı ile yapılmaktadır. Radyal kuvvet ölçülmesi esnasında aşağıda belirtilen işlemler sırasıyla yapılır.

1. Keçenin çalışma miline uygun olacak şekilde iki parça halinde hareketli çenelerin imal edilmesi.
2. Hareketli çenelerin yarım ay halinde bulunan sabit çenelere bağlanır.
3. Oluşturulan yapıya 100 N olacak şekilde kalibrasyon ağırlığı yerleştirilir.
4. 100 N ağırlığa göre kalibrasyon yapılmasından sonra kalibrasyon ağırlığı kaldırılır.
5. 100 N ağırlık tekrardan cihaza bağlanır ve 30 sn sonrasında kuvvet kontrol edilir.
6. Kuvvet değişiminin 0.1 N altında olması durumunda testlere geçilir.
7. Test süresi kauçuk türüne göre değişmektedir.
8. Tasarım esnasında teknik resimlerde radyal kuvvet $F_R \pm \%20$ olacak şekilde tanımlanmaktadır.



Şekil 3.26 Radyal Yük Ölçüm Cihazı

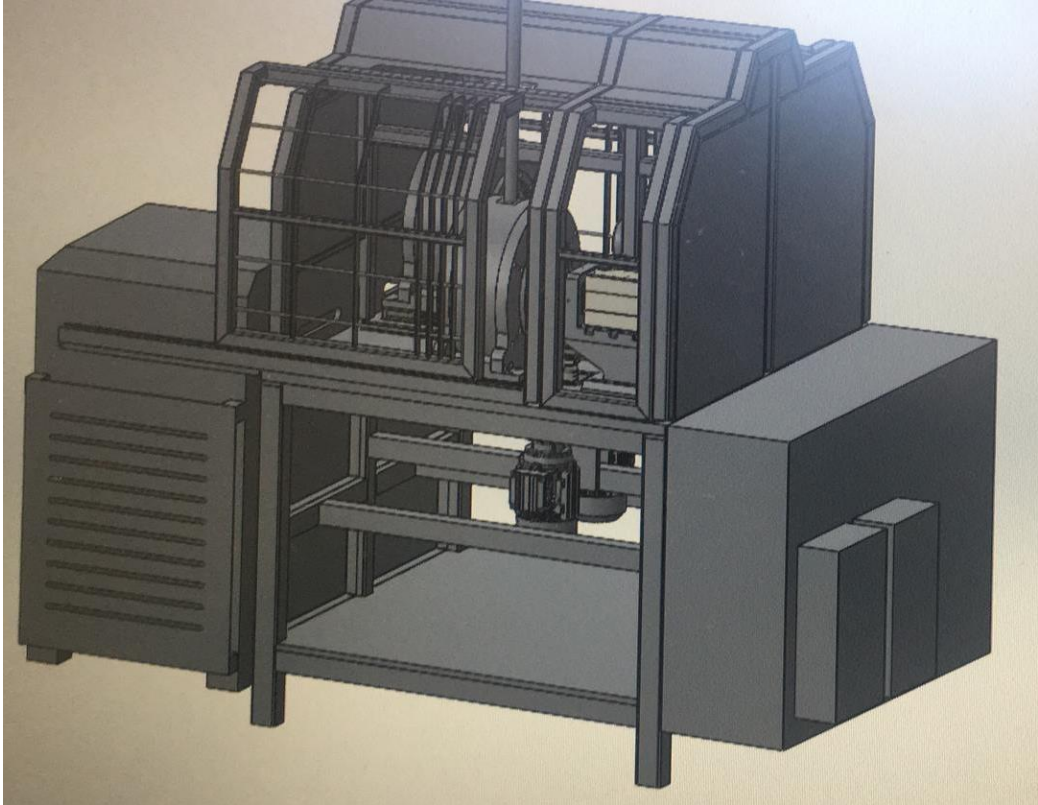
Radyal kuvvet kontrolünde de olumlu sonuç alınması durumunda keçe validasyon testine tabi tutulur. Validasyon test şartları iki şekilde belirlenir. Birincisi müşterinin istekleri göz önünde bulundurularak oluşturulur. Bir diğer metot ise standartlara göre test şartı belirlenir. DIN 3761 validasyon testleri için şart belirleme de en çok kullanılan şartnamedir. Firmaların bünyesinde çeşitli test cihazları tasarlanıp imal edilmiştir. Standart tip test cihazları Şekil 3.27’de görülmektedir.



Şekil 3.27 Test Benchleri

Şekil 3.27’de görülen test makineleri maksimum 10 000 Rpm dönüş hızına sahiptir. Tez konusu ürünün test edilebilmesi için yeni bir test makinesi tasarlanması gerekmektedir. Bu test makinesinin özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır.

20 000 Rpm e kadar dönüş hızı, sürekli tork kontrolü, sürekli dudak sıcaklığı kontrolü ve indirek ısıtma sistemine sahip olmalıdır. Bu sebeple Şekil 3.28’de tasarlanan yüksek devirli test cihaz tasarımının görseli paylaşılmaktadır.



Şekil 3.28 Yüksek Devirli Test Bench Tasarımı

Tasarım aşaması tamamlandıktan sonra malzeme siparişleri açılmış olup imalat aşamasına geçilmiştir. Tasarımı tamamlanmış makineye ait görsel Şekil 3.29’da gösterilmiştir.



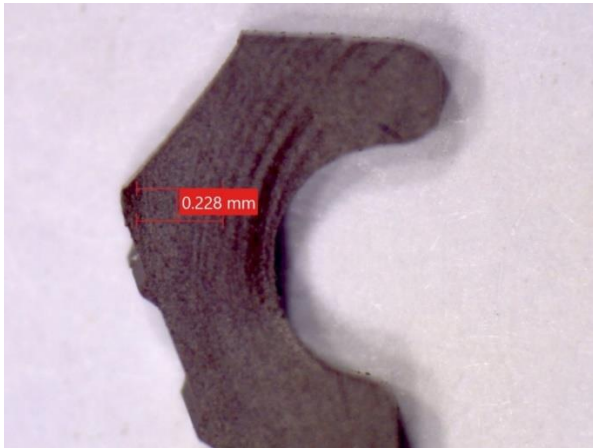
Şekil 3.29 Yüksek Devirli Test Cihazı

Validasyon testleri esnasında her gün keçede kaçak olup olmadığı kontrol edilir. DIN 3761 ve ISO 6194'e göre 10 gün sonunda 3 gram kaçağı geçmeyen durum varsa keçenin fonksiyon testi sonucunun uygun olduğu değerlendirilir. Fakat keçe dudak yapısının ve aşınmanın da test sonrası incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla profil kesiti alınarak temas bandı genişliği ve temas yüzeyinde meydana gelen değişimler incelenmektedir. Şekil 3.30 da şu şekilde kesilmiş profil görülmektedir.



Şekil 3.30 Profil Kesimi

Profil genel olarak değerlendirildikten sonra yağ dudak aşınması kontrol edilmektedir. Şekil 3.31' de gösterilen profile ait ölçüm ZEISS marka 300X özeliğine sahip optik mikroskopla ölçülmüştür.



Şekil 3.31 Aşınma Ölçümü

Dudak aşınmasının maksimum 0.4 mm olması gerektiğini daha önceki bölümlerde açıklamıştık. Şekil 3.31'den görüldüğü üzere keçenin aşınmaları da uygun olarak değerlendirilmektedir. Aşınma kontrolünden sonra sonra keçe dudağına hava tarafından bakılarak görsel kontrol yapılmaktadır (Şekil 3.32)



Şekil 3.32 Test Sonrası Keçe Dudak Görseli

Şekil 3.32'de sıcaklık artışının fazla olması sebebiyle yağın karbonlaştığı görülmektedir. Test edilen keçenin radyal kuvvetinin düşürülerek sürtünme kaynaklı dudak sıcaklığının azaltılması gerekmektedir.

SKT		DÖNER MİL KEÇELERİ DENEY FORMU				RAPOR NO:	RTM220569		
						SAYFA NO:	1/4		
						STANDART :	DIN-3761/10		
SKT NO	TİPİ	GÖZ NO	MÜŞTERİ	MÜŞTERİ NO	KULLANIM YERİ	ELASTOMER			
040738-V		1,1	PIYASA		DÖNER MİL KEÇESİ	FR-04			
GERÇEKLEŞEN TEST SÜRESİ (GÜN / SAAT)	BAŞLAMA TARİHİ	BİTİŞ TARİHİ	TEST MAK. NO	TEST NEDENİ	PARÇA LOT NO				
10 / 240	19.07.2022	29.07.2022	132302 / 4. Göz	YENİ PROJE	1				
TESTİN YAPILIŞ SEBEBİ									
YENİ ÜRÜN FONKSİYONEL DOĞRULUK KONTROLÜ. 1 NOLU TEST									
MİL		YUVA		TEST SIVISI					
Mil Çapı (mm)	28	Yuva Çapı (mm)	42	Marka		CASTROL			
Malzeme	1.2842	Yuva Derinliği (mm)	7	Tip / Standart		5W / 30			
Sertlik (HRC)	52 HRC	Malzeme	1.4140			EDGE			
Salgı	0,01	Mile Göre Kaçıklık	0,02						
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	0,33	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)		Min Çalışma Sıcaklığı (°C)					
Yüzey Pürüzlülüğü (Rz)	2,36	Yüzey Pürüzlülüğü (Rz)		Tel ø	Sarım ø	Ek.Çapı/Sarım Boy			
Yay Malzemesi	EN 10270-1		Yay Ölçüsü	0,30	1,52	29			
TEST PROGRAMI									
Adım No	Adım Zamanı (Dak.)	Sıcaklık(°C) ± 3 °C	Devir (rpm)	Devir m \ sn.	Mil Dönüş Yönü	Çevrim Sayısı			
1	840	130	7000	10,3	Sağ	10			
2	360	130	7000	10,3	Sağ	10			
3	240	23	0	0,0	Sağ	10			
				0,0					
				0,0					
Adım Süreleri Toplamı (Dakika)	1440	Toplam Çevrim Sayısı	10	Hedeflenen Toplam Çalışma (Dk/Saat/Gün)	14400	240	10		
TEST ÖNCESİ VE SONRASI ÖZELLİKLER									
ÖZELLİKLER	ÖNCE	SONRA	ÖZELLİKLER			SONRASI			
Yaysız İç Çap (mm)	26,78	27,24	Sürtünme Yüzey Genişliği (mm)			0,20 - 0,25			
Yaylı İç Çap (mm)	26,62	26,76	Dudakta Çatlama (Var / Yok)			YOK			
Vul.2 Yaysız İç Çap (mm)			Tırtıl uygun mu (Evet/Hayır)			EVET			
Vul.2 Yaylı İç Çap (mm)			Dudakta Sertleşme (Var / Yok)			YOK			
Toz Dudak İç Çap (mm)	28,41	28,42	Sızan Yağ Miktarı			0,0 Gr.			
Kauçuk Dış Çap (mm)	42,27	42,2	Yuvadan Sızma			0,0 Gr.			
Metal Dış Çap (mm)			Çapta Daimi Kalıcılık – Yaysız (%)			1,69%			
Ovalik	0,02	0,02	Çapta Daimi Kalıcılık – Yaylı (%)			0,52%			
Dudağın Dış Çapa Göre Kaçıklığı	0,02	0,07	Dudakta Karbonlaşma (Var / Yok)			VAR			
Konkavlık Ölçüsü (mm)	0,01		Yayda Bozulma (Var / Yok)			YOK			
Çapsal Yük – Yaysız (N)	12,5	10,4	Dış Çap Deformasyon (Var / Yok)			YOK			
% Çapsal Yük Kaybı - Yaysız		17%	Dudakta Deformasyon (Var / Yok)			YOK			
Çapsal Yük – Yaylı (N)	28,1	24,3	Milde Aşınma (Var / Yok)			YOK			
% Çapsal Yük Kaybı - Yaylı		14%	Mil Yüzeyinde Deformasyon (Var / Yok)			YOK			
PTFE Kalınlık - Derinlik (mm)			Mil Yüzeyinde Çalışma İzi			YOK			
%10 Uzamada Yay Yüğü (g)	260	247	Parçada Gres Var mı (Var / Yok)			YOK			
DUDAK SICAKLIĞI BİLGİLERİ									
Gün	Adım No	Dakika	Devir (Rpm)	Sıcaklık (°C)	Gün	Adım No	Dakika	Devir (Rpm)	Sıcaklık (°C)
1	360	180	7000	128	3	360	180	7000	126
2	360	180	7000	125	4	360	190	7000	128
İLAVE BULGU VE DEĞERLENDİRMELER									
* 240 saat fonksiyon testi sonunda kaçak görülmedi.									
* Test sonunda yapılan incelemede; parçada yarıлма, kopma, görülmemiştir.									
* Parçanın yağ dudak çalışma bölgesinde karbonlaşma olduğu görülmüştür.									
Deneyi Yapan			Sonuç (OK / RED)			ONAY			
Sadık EREN			OK			Meral TEKİN Kalite Müdürü			

F-FR-219 Rev.003 31/07/2017

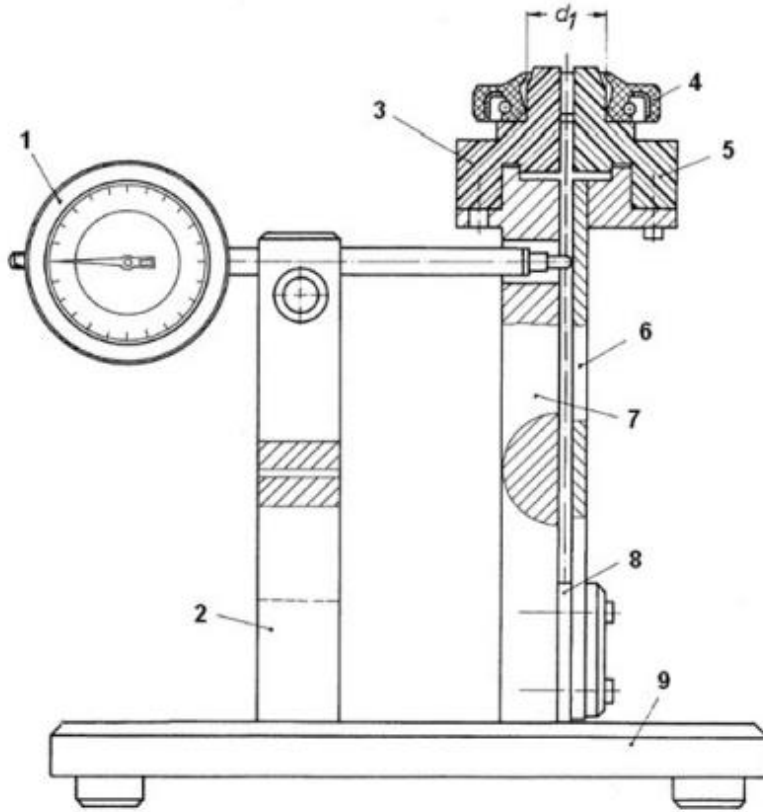
Şekil 3.33 Örnek Test Raporu

Genel bulgularında kontrol edilmesinden sonra Şekil 3.33'teki gibi test rapor sayfası oluşturulur.

4. BULGULAR

4.1. Garter Yaylı Keçeye Ait Sonlu Elemanlar Çalışması

Standart döner mil keçeleri yay, kauçuk ön şekil ve metal bilezik olmak üzere üç farklı alt malzemeden oluşmaktadır. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi döner mil keçesinin fonksiyonelliğinin incelenmesi için önemli parametrelerden biri de radyal yüküdür. Döner mil keçelerinin radyal yükleri bu işe özgü olarak geliştirilmiş hidrolik, pnömatik veya mekanik cihazlarla yapılır. Bu cihazlara ait teknik özellikler DIN 3761 içerisinde açık belirtilmiş ve şemasal olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Radyal Yük Ölçüm Cihaz Şeması (ISO 6194)

- 1- Yük Ölçer
- 2- Tabla
- 3- Yarım ay şeklinde sabit mandrel
- 4- Keçe
- 5- Yarım ay şeklinde hareketli mandrel

- 6- Yaprak Yay
- 7- Mandrel Taşıyıcı
- 8- Film
- 9- Ana Tabla

Standart ölçüm yapılabilmesi için malzeme tiplerine göre keçenin cihazda tutulması gereken süre belirlenir. Bu süre 30-60 s arasında değişmektedir.

Radyal yük altında keçe dudağına etkiyen tüm kuvvetlerin toplanması olarak adlandırılır. Radyal yük Denklem 4.1-4.4 verilen ifadeler yardımcı olarak hesaplanabilir (Dekker 1996).

Yay Kuvveti:

$$F_s = 2\pi \left[1 - \frac{R_r}{L}\right] \cdot F \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de F_s (N) yaydan kaynaklanan radyal kuvveti ifade etmektedir. R_r (mm) ise yay merkezi ve dudak ucundaki mesafeyi ifade etmektedir.

Kauçuk Kiriş Kuvveti:

$$F_B = \frac{\pi}{8} E_W D_1 (D_S - D_L) \left(\frac{t}{L}\right)^3 C \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'de F_B (N) kiriş hareketinden kaynaklanan radyal yüküdür. E_W (N/mm²) %5 gerilme altındaki elastite modülüdür. D_S (mm) mil çapıdır. D_L (mm) dudak çapıdır. t (mm) ise esneme bölgesi kalınlığıdır.

Kauçuk Radyal Kuvveti:

$$F_R = 2\pi E_A A \left(\frac{D_S - D_L}{D_C}\right) \left(\frac{L_C}{L}\right)^2 C \quad (4.3)$$

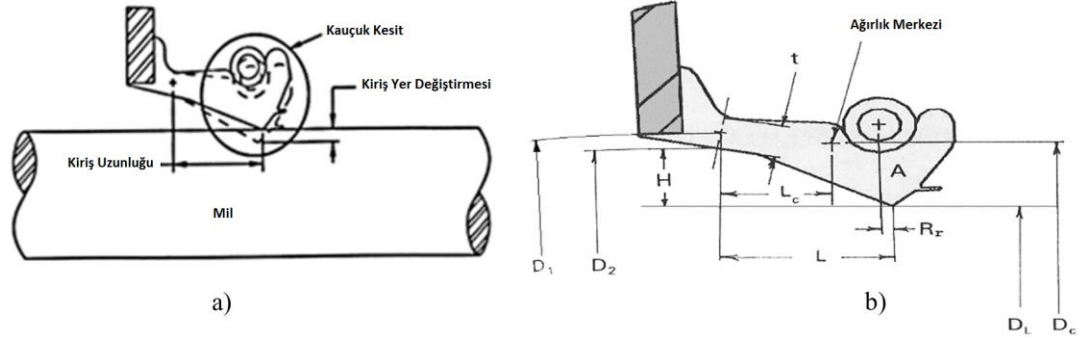
Denklem 4.3'de F_R (N) çember hareketinden kaynaklanan radyal yüküdür. D_C (mm) dudak kesitinin ağırlık merkezinin çapıdır. L (mm) esnek nokta ve dudak ucu arasındaki mesafedir.

Buradan Toplam Radyal Yük :

$$F_T = F_s + F_B + F_R \quad (4.4)$$

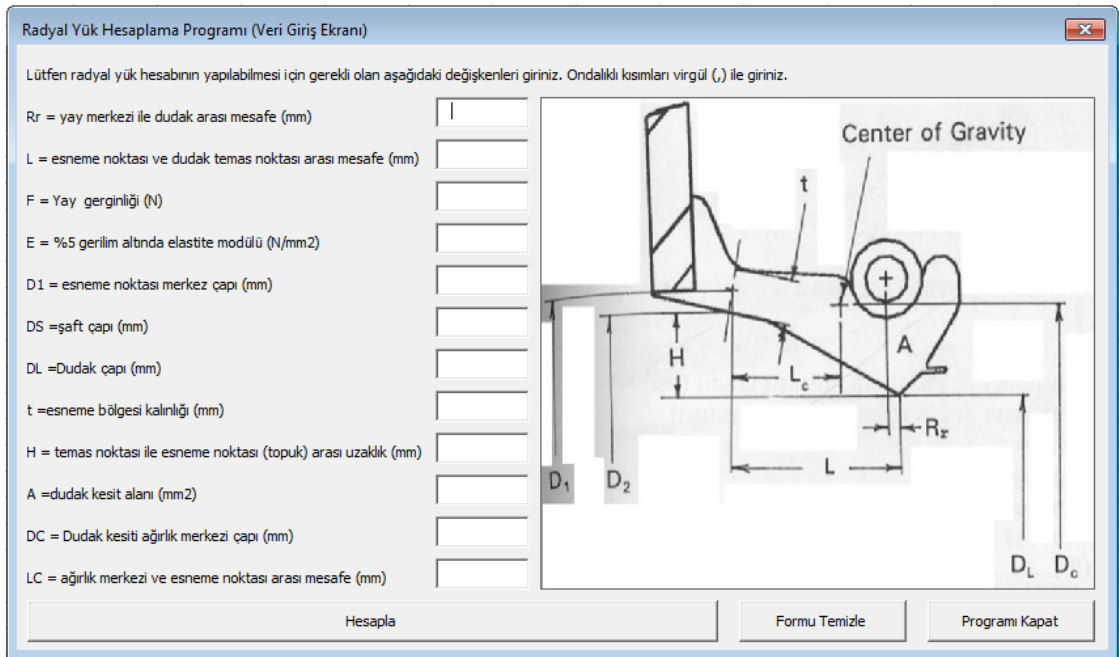
Şeklinde yazılabilir.

Bu denklemlerde, A dudağın kesit alanını ve C elastomer faktörünü içermektedir. Şekil 4.3'te radyal kuvvet hesaplanması için gerekli tüm ölçüler detaylı şekilde gösterilmiştir (Dekker 1996).



Şekil 4.3 a) Kiriş Hareketi b) Keçe Kritik Ölçüleri

Hesaplamaların hızlı şekilde yapılabilmesi adına radyal yük hesaplama makrosu yazılmış olup Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Makro yazılırken Denklem 4.1 -4.4 de verilen formüller kullanılarak Microsoft Visual Basic programında kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur.



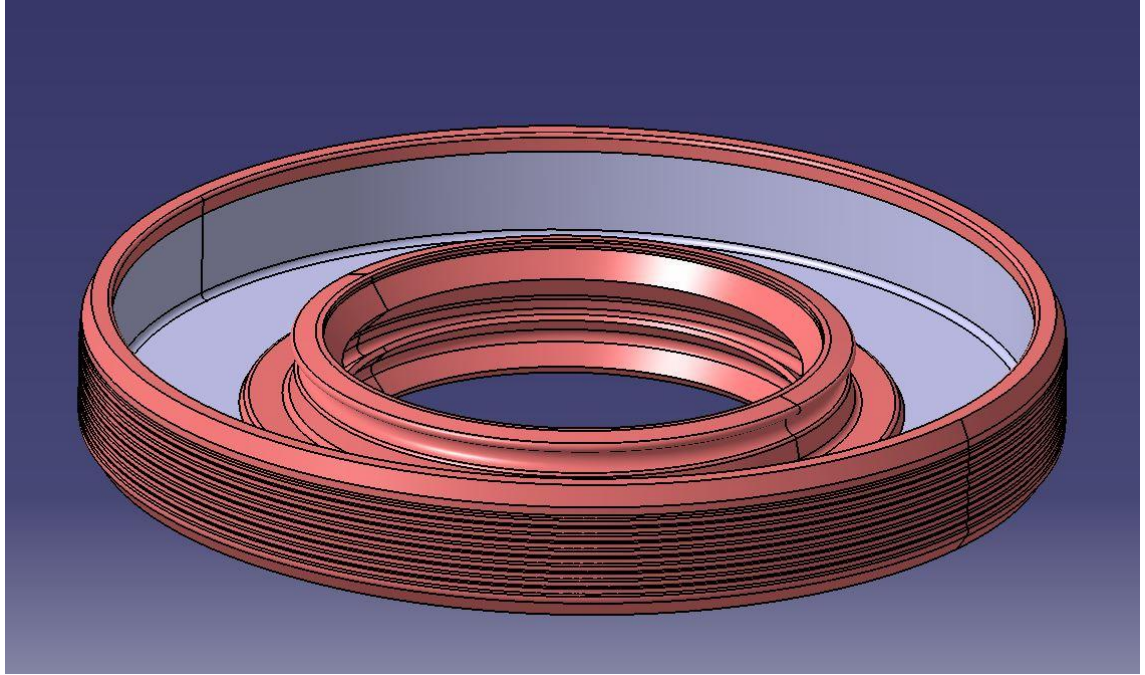
Şekil 4.4 Makro Görüntüsü

DeneySEL verilerin, test ekipmanın üzerinden alınan veriler ve FEA sonuçlarının kıyaslanması doğru FEA modelinin oluşturulması için mükemmel bir girdi oluşturacaktır.

Bu amaçla öncelikle keçenin 3D katı modeli ve ardından sonlu elemanlar modeli oluşturularak radyal kuvvet hesaplaması yapılmıştır. Aynı zamanda radyal yük hesaplaması adına yazılmış makro kullanılarak radyal yük teorik olarak hesaplanmıştır. Sanal doğrulamalara ait veriler test verileriyle kıyaslanmadıkça bir anlam ifade etmez. Bu sebeple prototip ürünler üretilerek veriler kıyaslaması çalışması yapılmıştır.

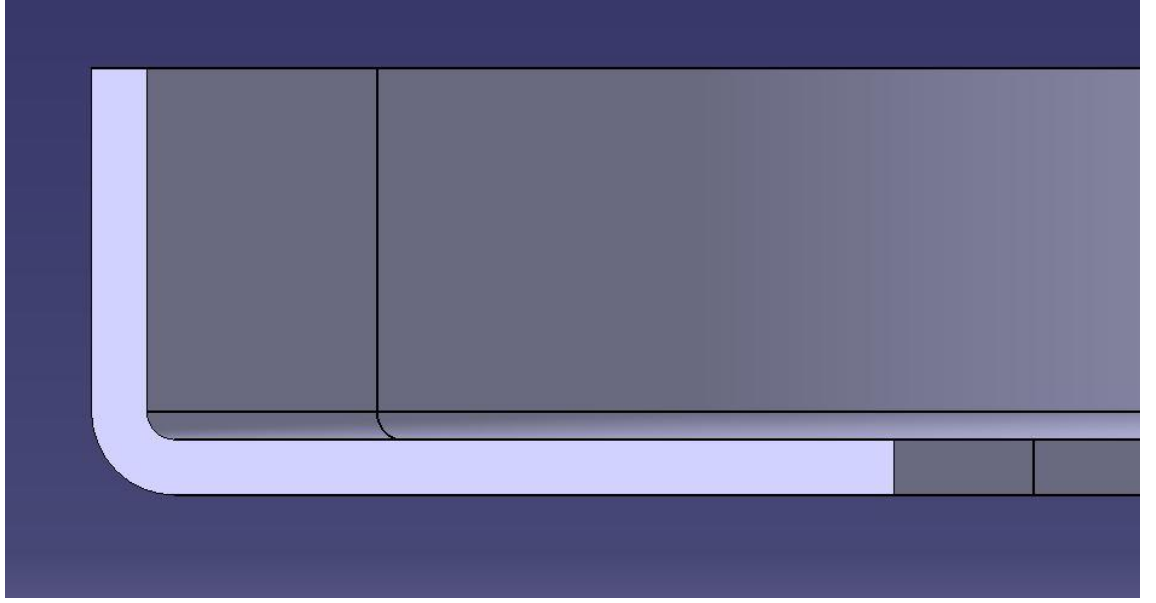
4. 1.1.Ürün Tasarım

Ürün tasarımın yapılması için tasarım kriterlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda keçemize ait anma ölçüleri 35x72x10-12 (mil çapı x yuva çapı x yükseklikler) olarak belirlenmiş ve keçe 3D modeli Şekil 4.5'te paylaşılmaktadır. Ürüne ait bilezik ve kauçuk form tasarım çalışmaları yapılmıştır.



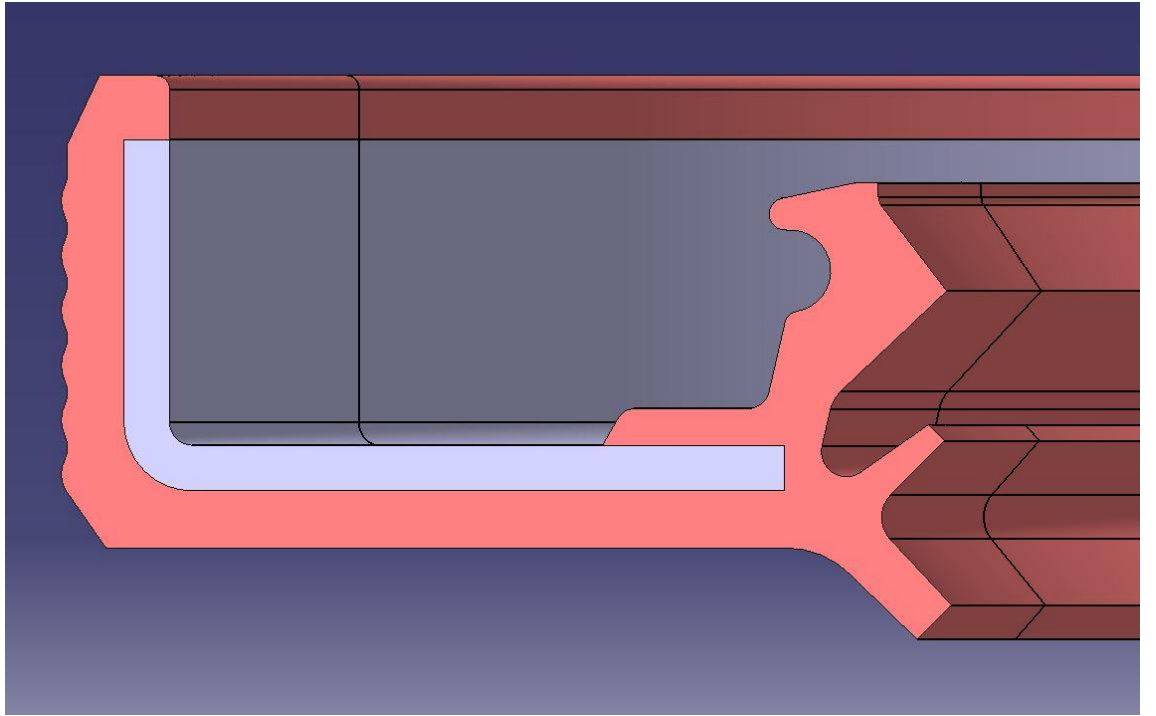
Şekil 4.5 Keçenin 3-D Görüntüsü

Döner mil keçesinin komple tasarımı bittikten sonra alt komponent tasarımları yapılmış olup Şekil 4.6'da bilezik tasarımı görülmektedir.



Şekil 4.6 Bilezik Kesit Görüntüsü

Döner mil keçelerinin kesitleri alındığında bilezik ve kauçuk form rahatlıkla görülmekte olup Şekil 4.7’de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.7 Kesit Görüntüsü

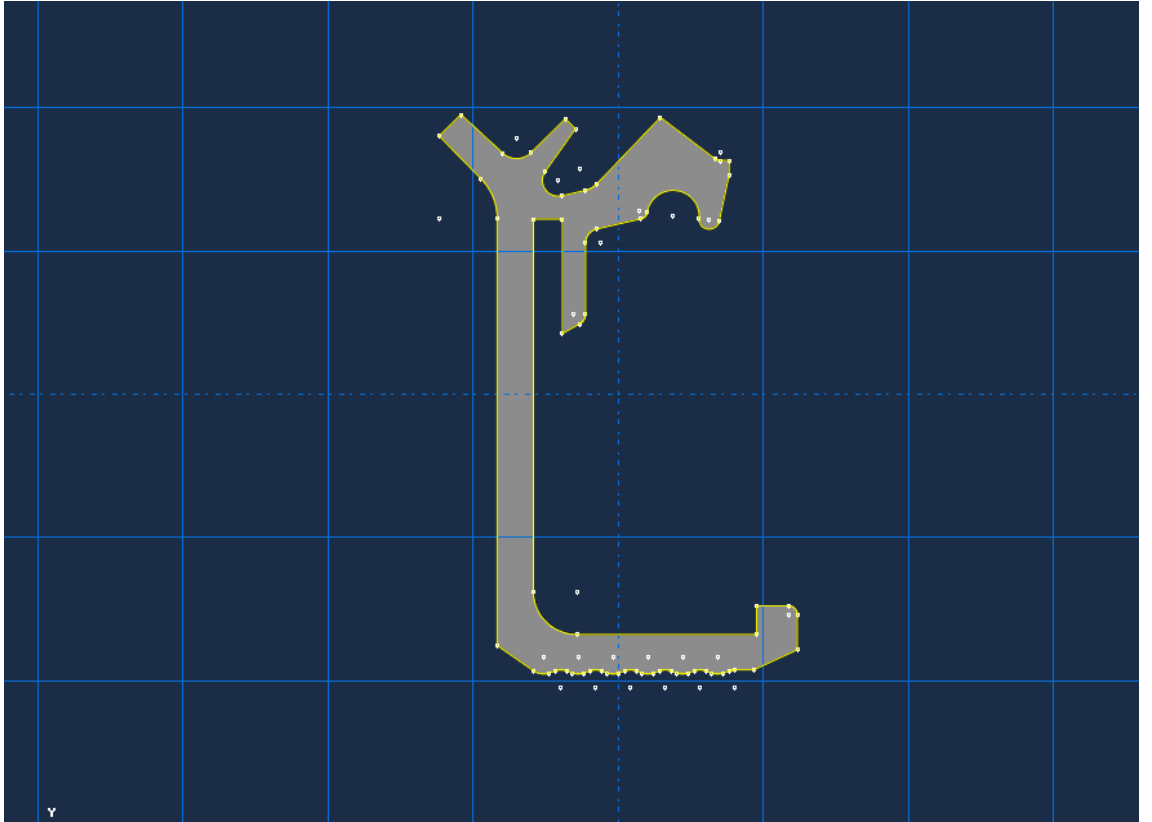
Ürüne ait 3-D tasarımlar tamamlandıktan sonra ürüne ait teknik resimler oluşturularak kalıp tasarımı aşamasına geçilmiştir. Ürüne ait teknik resim Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

4. 1.2.Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Ürüne ait 3-D datalar ve teknik resimler oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar analizi çalışmalarına başlanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde çözüm süresini kısaltmak adına alternatif model arayışları yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda 2-D aksenal simetrik model kullanılması kararlaştırılmıştır. Metal bileziğin rijit olduğu kabul edilerek bilezik analiz çalışmasında ihmal edilmiştir. Döner mil keçelerinin analiz sürelerinin kısaltılması adına aksenal simetrik modeller kurulmaktadır. Döner mil keçelerinin 360 ° lik bir dairenin 1° lik dilimi gibi değerlendirebiliriz. Analiz çalışması sonucunda arzu ettiğimiz kontak kuvvetleri ve dudak yapısı 3D boyutlu analizle uyum göstermektedir (Yavuz 2016). Tez çalışmasında analiz sürelerinin kısaltılması adına aksenal simetrik 2D model kurulmuştur.

4. 1.3.Analiz Modelinin Oluşturulması

İlk olarak kauçuk Şekil 4.10 daki gibi kauçuk formu oluşturulmuştur.

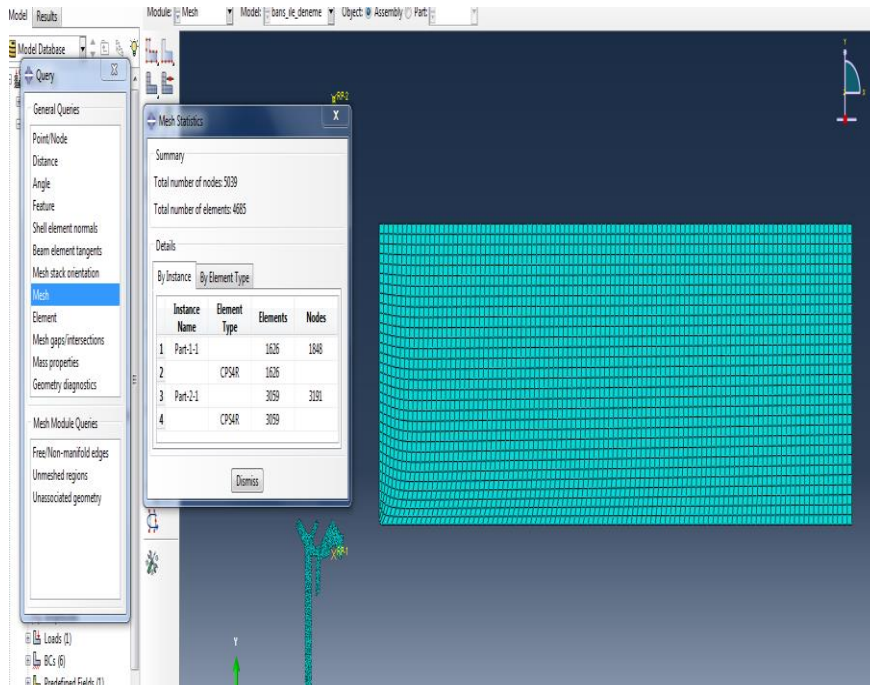


Şekil 4.10 Kauçuk Form

Kauçuk form oluşturulduktan sonra mil çapına uygun kesit oluşturulmuş ve 2-D Shell olarak tanımlanmıştır. Ürün geometrisine ait datalar tamamlandıktan sonra adım tanımlaması yapılmıştır. Analiz esnasında kauçuk hiperelastik malzeme kullanılması sebebiyle dinamik-explicit analiz basamağı tanımlanmıştır.

4. 1.4.Mesh Yapısı

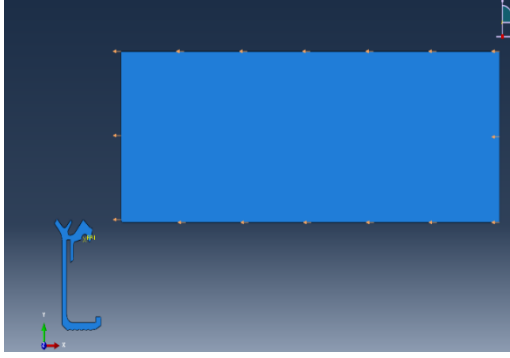
Toplamda 5039 adet düğüm noktası ve 4685 adet lineer dörtgen CPS4R tipi eleman kullanılmıştır. Hiperelastik malzemelerin 2D aksel simetrik analizleri için CPS4R eleman kullanılması zorunludur. Ağ yapısına ait görsel Şekil 4.11’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.11 Ağ Yapısı

4. 1.5.Sınır Şartlar

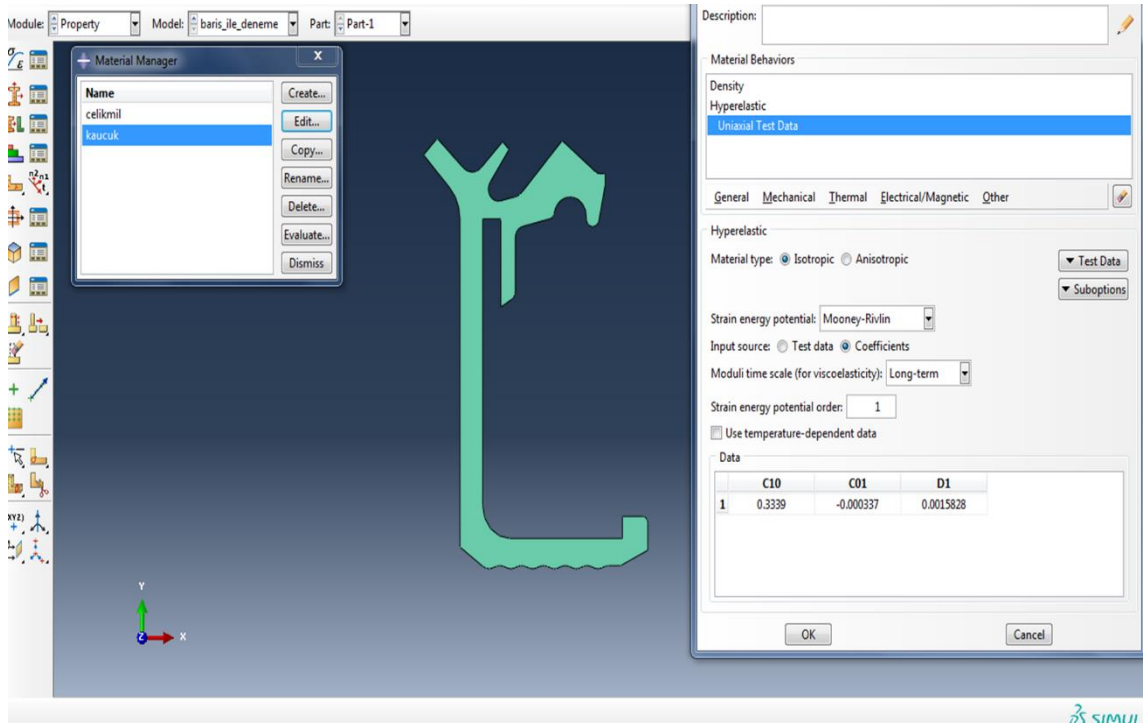
İlk olarak montaj miline çok düşük bir değerde çizgisel hız tanımlanır. Daha sonra milin sağa sola hareket ederek eksen kaçıklığını önlemek için yer değiştirme şartından Y ekseninde hareket sıfırlanır. Montaj durumuna ait görsel Şekil 4.12’de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.12 Montaj

4. 1.6.Malzeme Modeli

Metal malzeme için standart olarak kullanılan DIN EN 10139/DC04 seçilmiştir. Kauçuk malzeme için daha önce bahsedilmiş testler yapılmış olup malzeme katsayıları Abaqus yardımıyla tespit edilmiştir. Malzeme modeline ait görsel Şekil 4.13'te paylaşılmaktadır.

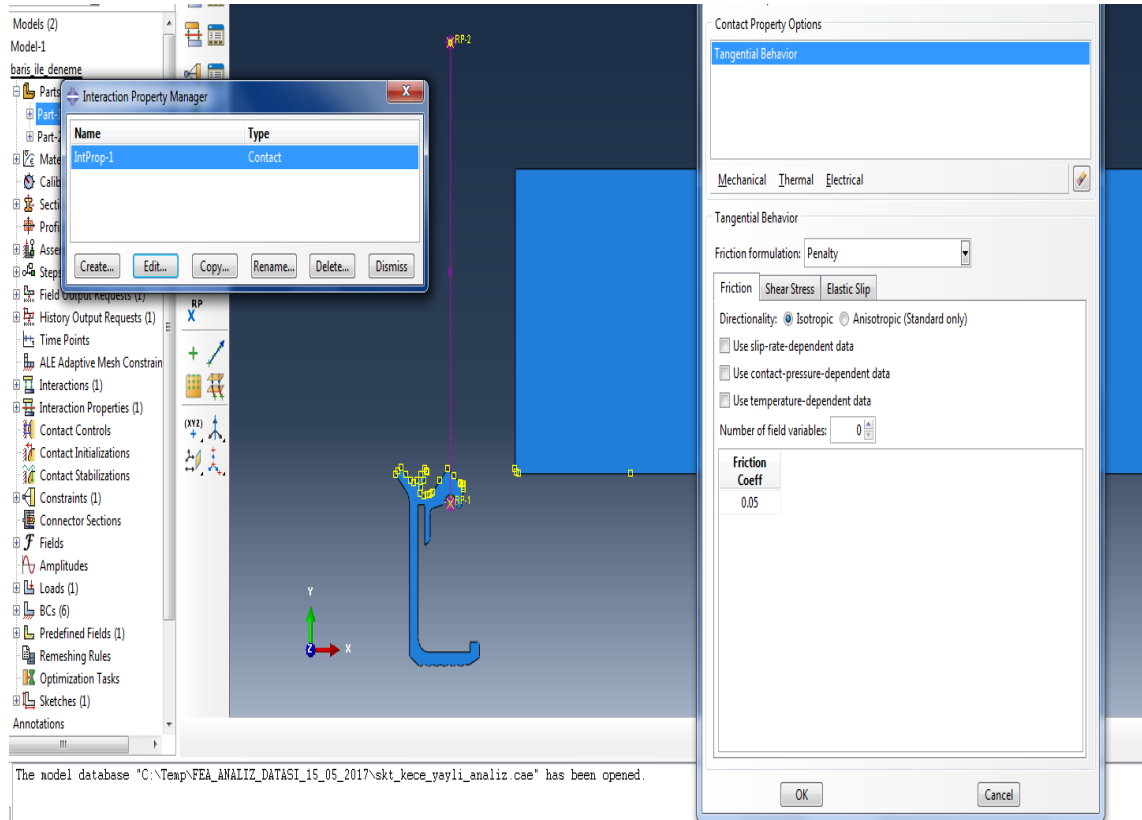


Şekil 4.13 Malzeme Modeli

4. 1.7.İlişkilerin Tanımlanması

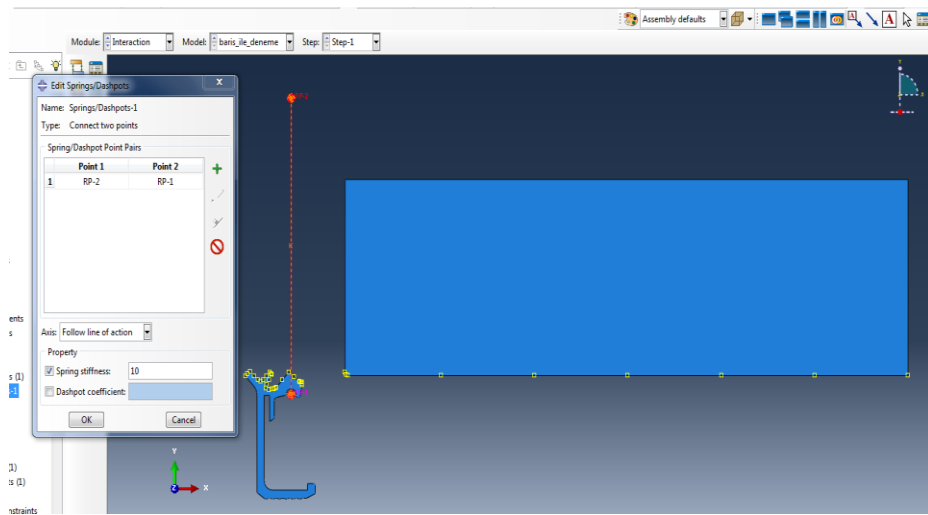
İlk olarak yüzeyler arası sürtünmenin tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda triboloji testleri yapılarak sürtünme katsayısının 0.05 civarında olduğu tespit edilmiş olup

programa bu şekilde tanımlanmıştır. Kontak tanımlamasına ait program görseli Şekil 4.14'te paylaşılmaktadır.



Şekil 4.14 Kontak Tanımlaması

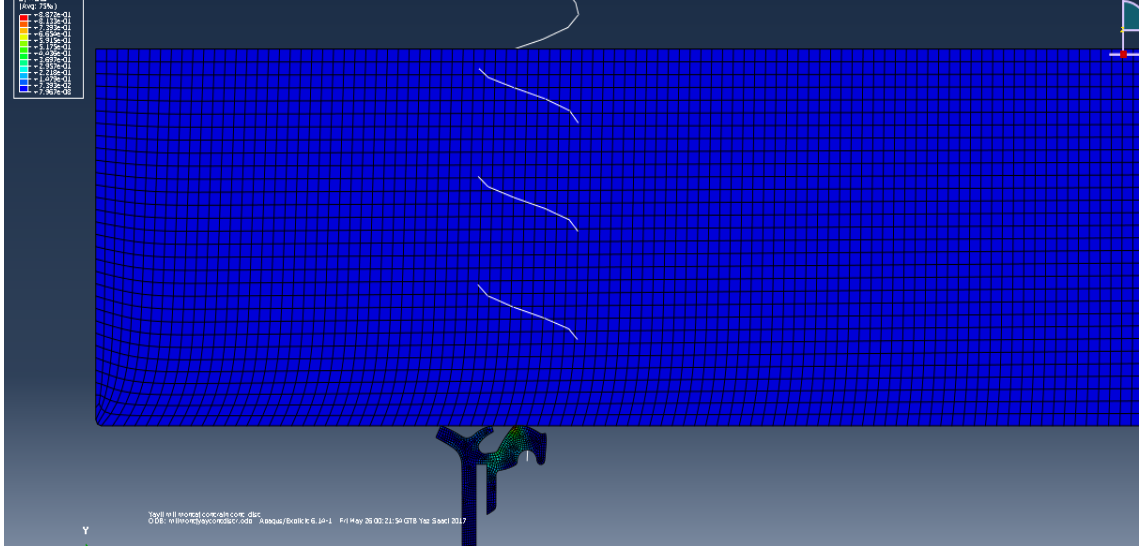
İlave olarak radyal yük hesabında kritik olan yay bilgisi sisteme girilmiş olup Şekil 4.15'te paylaşılmaktadır.



Şekil 4.15 Yay Tanımlaması

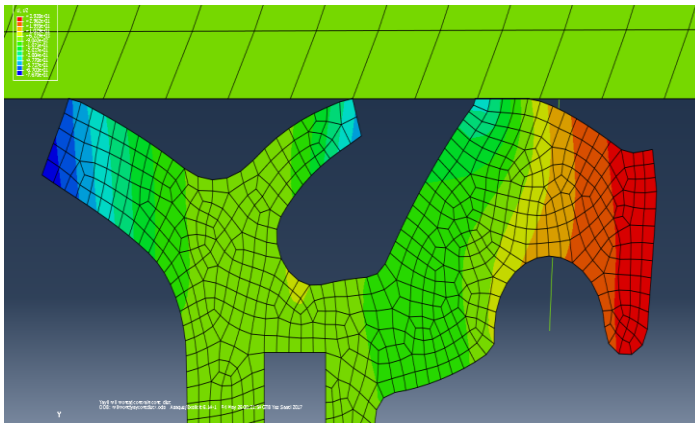
4. 1.8.İşin Oluşturulması

İş oluşturulduktan sonra çözüm için çalıştırılması işlemi başlanmıştır. Yaklaşık 420 sn sonrasında Şekil 4.16’da görülen çözüm elde edilmiştir.



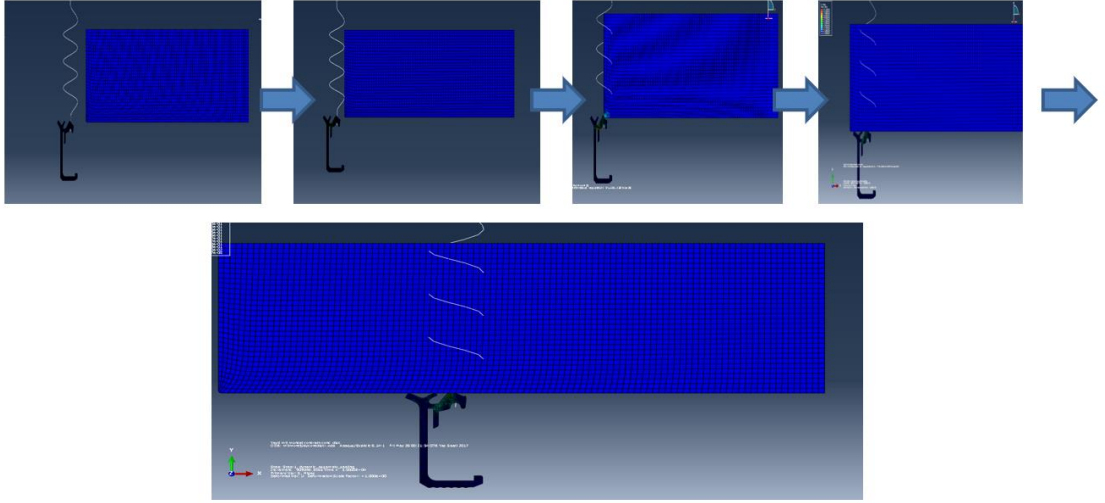
Şekil 4.16 Çözüm

Görüleceği üzere montajın ilk anlarında (kauçuk ve milin ilk temas 0.275 MPa gerilme oluşurken montajın tamamlandığı zaman 0.802 MPa eşdeğer gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilme değerleri kritik gerilme değerlerinin çok uzağındadır. Dudak temas durumları Şekil 4.17’den net şekilde görülmektedir.



Şekil 4.17 Montaj Durumu

Yapılan analiz sonucunda 0.4 mm deplasman z doğrultusunda gerçekleşmiştir. Şekil 4.18’de de montajın akışı Şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18 Montaj Akışı

4. 1.9.Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan analiz çalışması sonucunda yaylı dudakta radyal kuvvet 18.0 N olarak bulunmuştur. Yazılan makro programı yardımıyla yaylı dudakta hesaplanan radyal yük 18.25 N olarak hesaplanmıştır. Deneysel olarak radyal kuvvet sonuçları on adet döner mil keçesinin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge4.1 Radyal Yük Değerleri

Test No	Radyal Yük (N)	Test No	Radyal Yük (N)
1	18,50	6	18,36
2	18,00	7	18,31
3	17,93	8	18,43
4	17,89	9	18,25
5	17,98	10	17,87

Çizelge 4.1'den yapılan hesaplamalara göre ortalama 18,15 N olarak hesaplanmıştır. Radyal kuvvetin her üç metotla da yakınsaması aşıkardır. Buradan yola çıkarak kurduğumuz sonlu elemanlar yaklaşımının doğrulandığı görülmektedir.

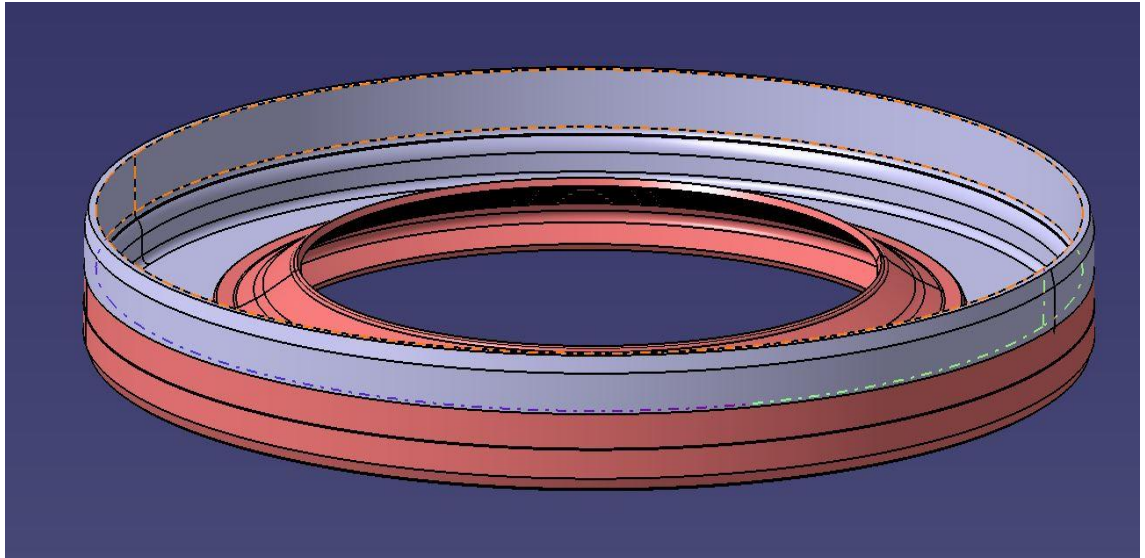
4.2.Yüksek Devirli Keçe Tasarımı ve Sayısal Doğrulaması

2020 li yılların başında itibaren elektrikli araçlarda trend artış yönündedir. Elektrikli araçların artmasıyla birlikte kullanılan döner mil keçelerinin yapısı da değişmektedir. Elektrik motorlarının devirlerinin 17 000 Rpm civarında olduğu bilinmektedir. Bu dönüş

hızlarında çalışabilecek döner mil keçesi tasarımı da zorlaşmaktadır. Garter yayına sahip keçelerin oluşturduğu radyal yük yüksek olması sebebiyle sürtünmeden kaynaklı ısı da yüksek olmaktadır. Bu sebeple alternatif dudaklı ve malzemeli keçe tasarım çalışmaları devam etmiştir. Aynı zamanda enerji tasarrufu sağlanması amaçlandığı için yeni tasarım keçeler ETS keçeler olarak anılmaya başlanmıştır. ETS keçenin malzeme seçimi yapılırken Şekil 2.12’de yer alan “Elastomer Seçim Grafiği” kullanılarak FKM malzeme seçimi yapılmıştır. Çapı 45 mm olan garter yaylı bir keçenin radyal yükü yaklaşık olarak makro yardımıyla 21 N hesaplanmaktadır (Dekker 1996). 21 N radyal yüke sahip bir keçenin maksimum 7 000 Rpm’e kadar çalıştığı Şekil 2.12’den açıkça görülmektedir. Elastomer malzemenin limitleri düşünüldüğünde 16 000 Rpm’de çalışacak keçenin radyal kuvvetinin yaklaşık olarak 2,5 kat düşürülmesi gerekmektedir. Yaysız radyal yükün toplam radyal yüke oranının %50 olduğu bilinmektedir (Dekker 1996). Bu sebeple yeni tasarımda radyal kuvvetin 2,5 kat aşağıya düşürülmesi ancak ve ancak yaysız bir tasarımla sağlanabilmektedir.

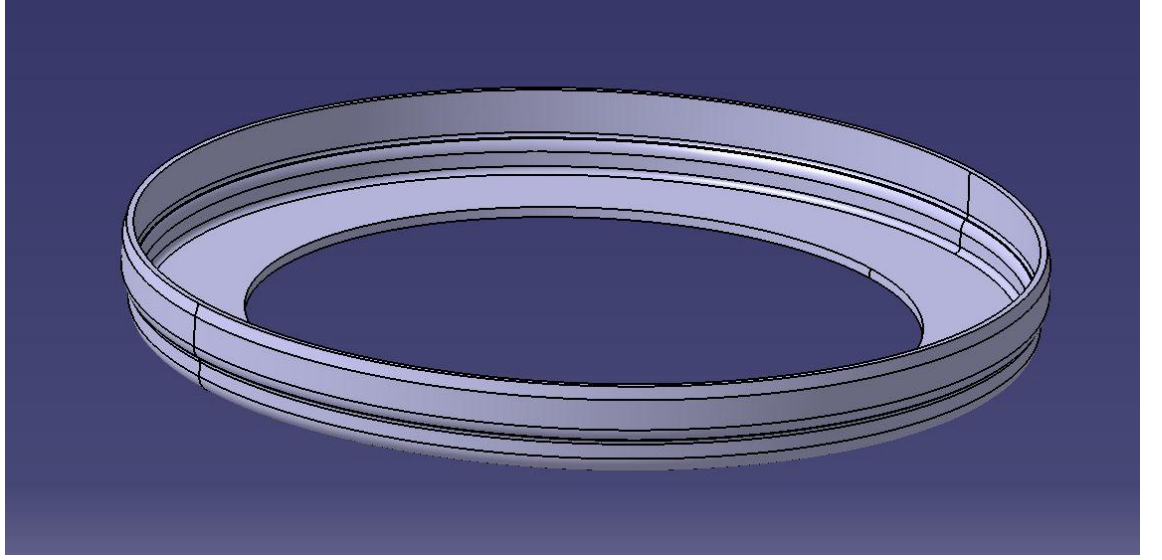
4.2.1.Ürün Tasarım

Ürün tasarımının yapılması için tasarım kriterlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda keçemize ait anma ölçüleri 45x70x8 (mil çapı x yuva çapı x yükseklik) olarak belirlenmiştir. Keçe görseli Şekil 4.19’da paylaşılmaktadır. Ürüne ait bilezik ve kauçuk form tasarım çalışmaları yapılmıştır.



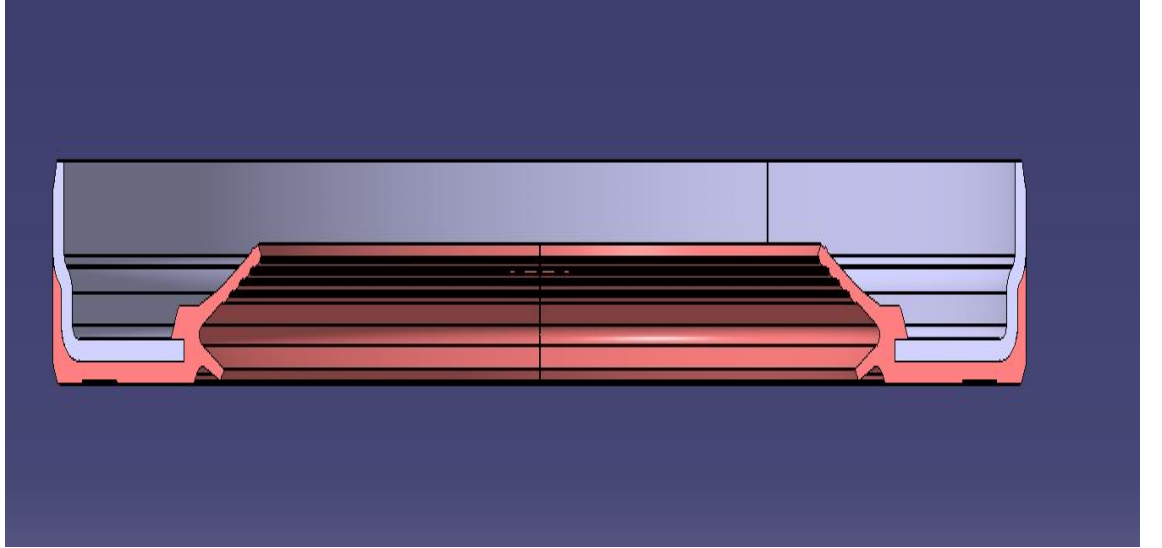
Şekil 4.19 Keçenin 3D görüntüsü

Döner mil keçesinin komple tasarımı bittikten sonra alt komponent tasarımları yapılmış olup Şekil 4.20’de bilezik tasarımı görülmektedir.



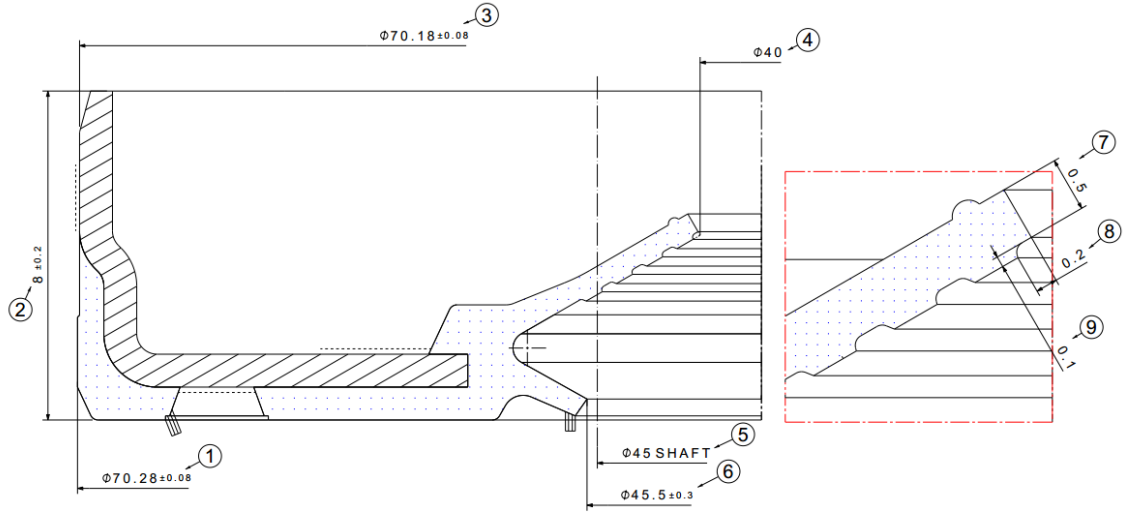
Şekil 4.20 Bilezik Kesit Görüntüsü

Döner mil keçelerinin kesitleri alındığında bilezik ve kauçuk form rahatlıkla görülmektedir. Şekil 4.21’de kesit görseli paylaşılmaktadır.



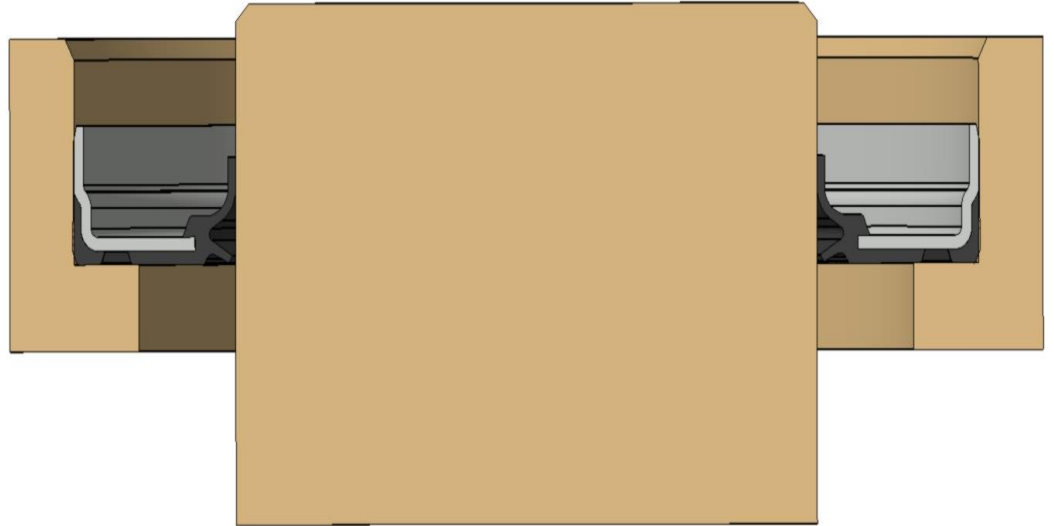
Şekil 4.21 Keçenin Kesit Görseli

Ürüne ait 3-D tasarımlar tamamlandıktan sonra ürüne ait teknik resimler oluşturularak kalıp tasarımı aşamasına geçilmiştir. Ürüne ait teknik resim Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



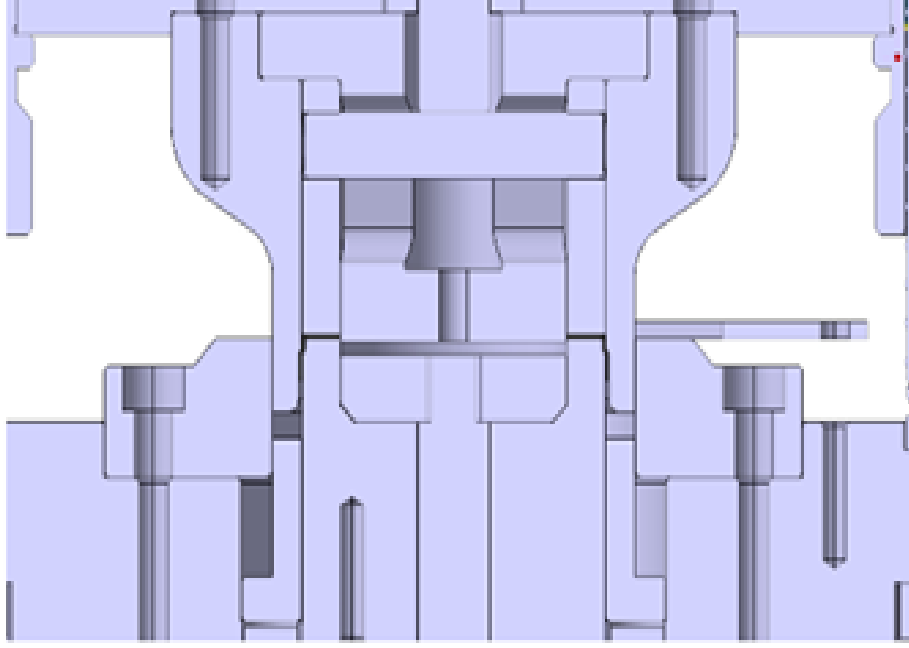
Şekil 4.22 Teknik Resim

Yapılan tasarıma ait keçenin hangi mantıkla çalışacağını görmemiz adına yuva, keçe ve mil ilişkisini gösteren data çalışması yapılmıştır. Mil, yuva ve keçe ilişkisini gösteren görsel Şekil 4.23'te paylaşılmaktadır.

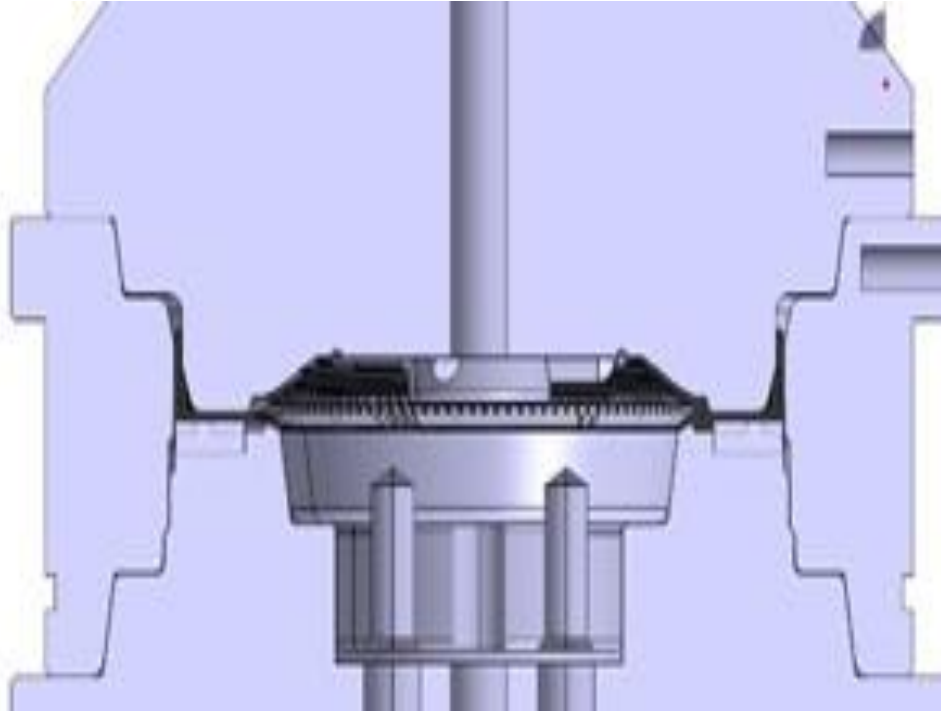


Şekil 4.23 Montajlı Durum

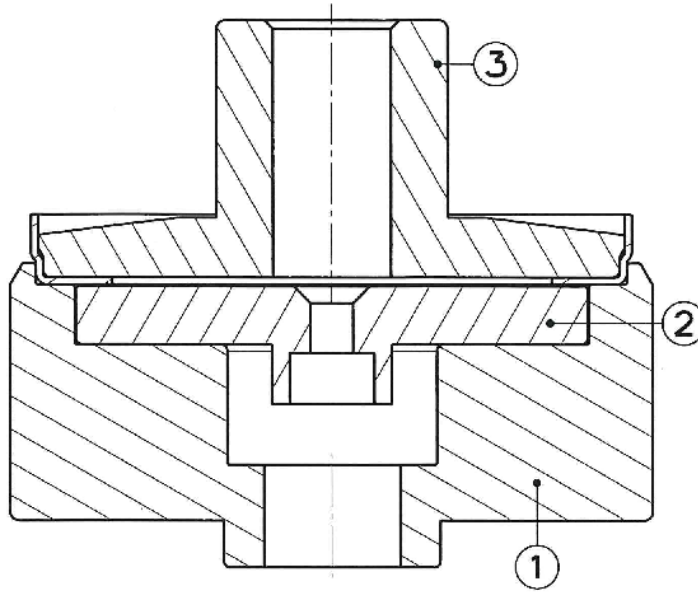
Hazırlanan teknik resim ve 3-D datalara göre kalıp tasarımları yapılmış olup imalat resimleri oluşturulmuştur. Şekil 4.24'te sac kalıbı görseli paylaşılmaktadır. Şekil 4.25'te kauçuk kalıbı görseli paylaşılmaktadır.



Şekil 4.24 Sac Kalıp Teknik Resim Kesiti



Şekil 4.25 Kauçuk Kalıp Kesiti



Şekil 4.26 Kesme Aparatı

Kesme aparatında bir numara tampon, iki numara çıkarıcı ve üç numara da gövde olarak adlandırılmaktadır. Kesme aparatına ait 2-D çizim Şekil 4.26'dadır.

4.2.2.Sonlu Elemanlar Modeli Oluşturulması

Ürüne ait 3-D datalar ve teknik resimler oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar analizi çalışmalarına başlanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde çözüm süresini kısaltmak adına alternatif model arayışları yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda 2-D eksenel simetrik model kullanılması kararlaştırılmıştır. Metal bileziğin rijit olduğu kabul edilerek bilezik analiz çalışmasında ihmal edilmiştir.

4.2.3.Analiz Modelinin Oluşturulması

İlk olarak kauçuk Şekil 4.27' deki gibi kauçuk formu oluşturulmuştur. Daha sonra Şekil 4.28'deki gibi sac bilezik formu oluşturulmuştur.



Şekil 4.27 Kauçuk Form



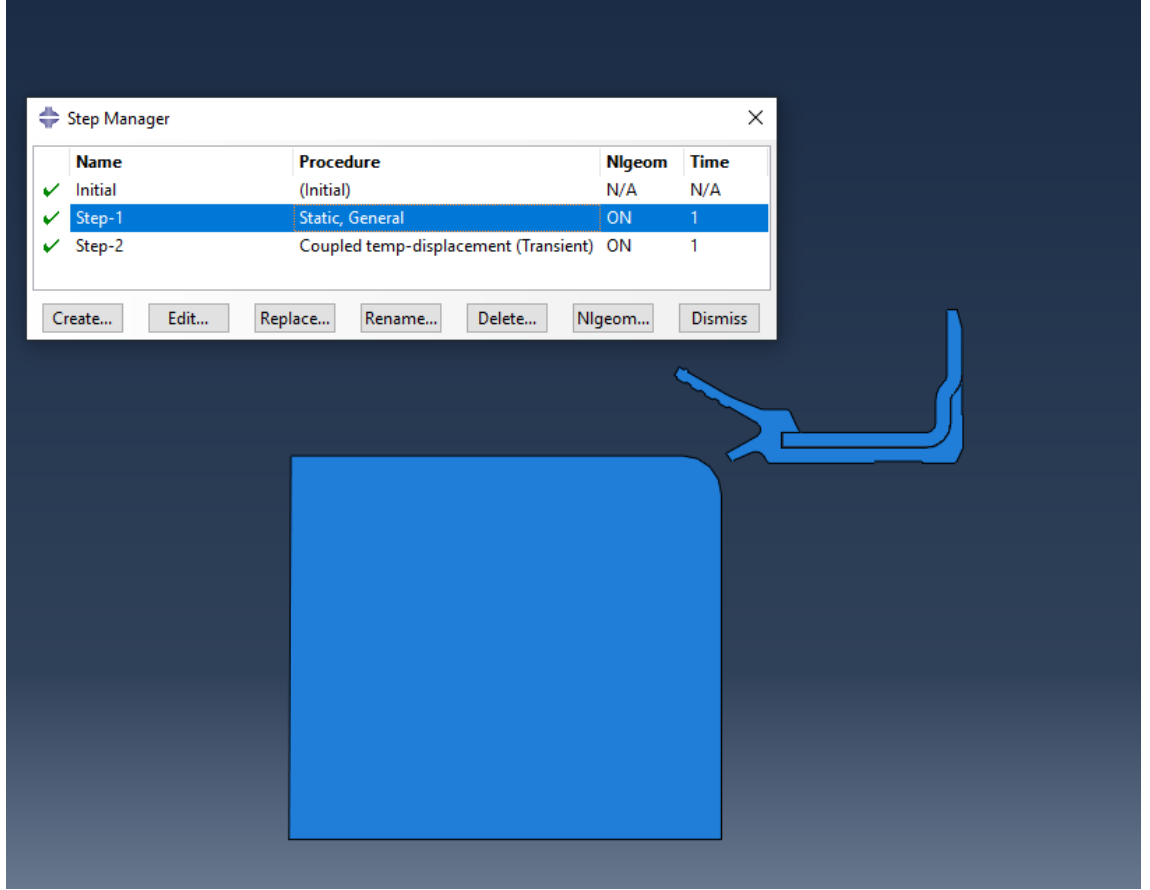
Şekil 4.28 Metal Form

Kauçuk form oluşturulduktan sonra mil çapına uygun kesit oluşturulmuş ve 2-D Shell olarak tanımlanmış olarak Şekil 4.29’da gösterilmektedir.



Şekil 4.29 Milin Eksenel Simetrik Modeli

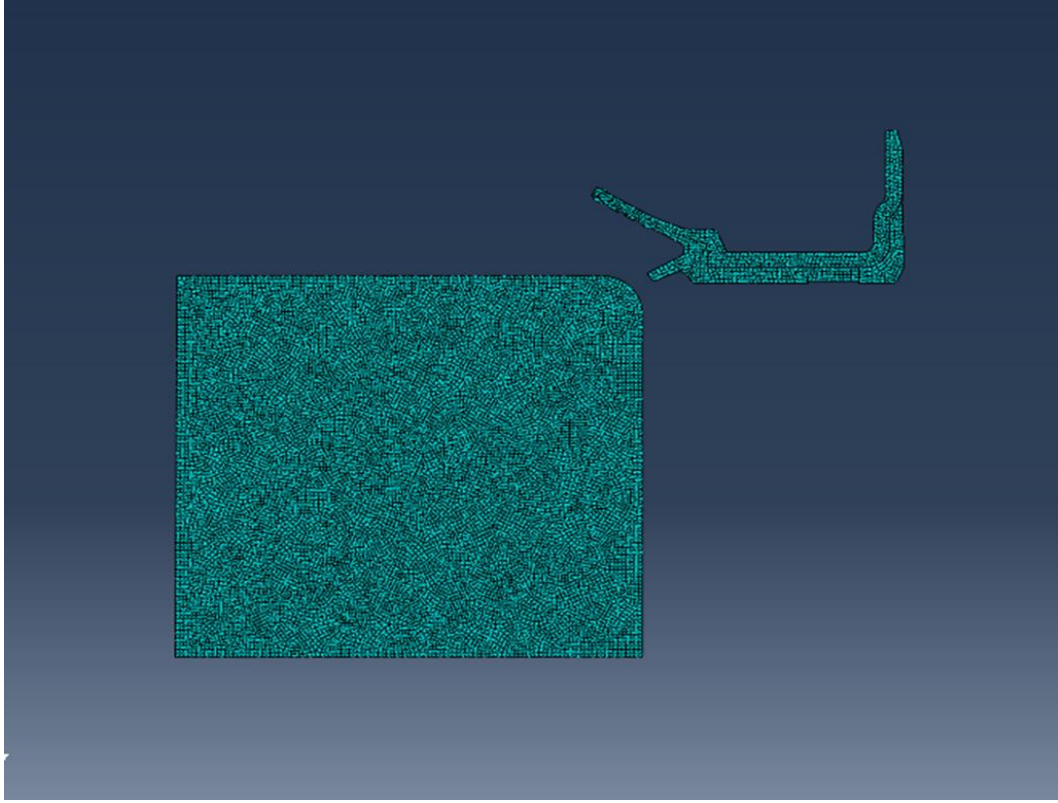
Ürün geometrisine ait datalar tamamlandıktan sonra adım tanımlaması yapılmıştır. Analiz esnasında kauçuk hiperelastik malzeme kullanılması sebebiyle statik analiz basamağı tanımlanmıştır. Daha sonrasında termal analiz yapılabilmesi için ikinci adım olarak coupled analiz seçilmiştir. Analiz adımlarına ait görsel Şekil 4.30'da paylaşılmaktadır.



Şekil 4.30 Analiz Adımlarının Tanımlanması

4.2.4.Mesh Yapısı

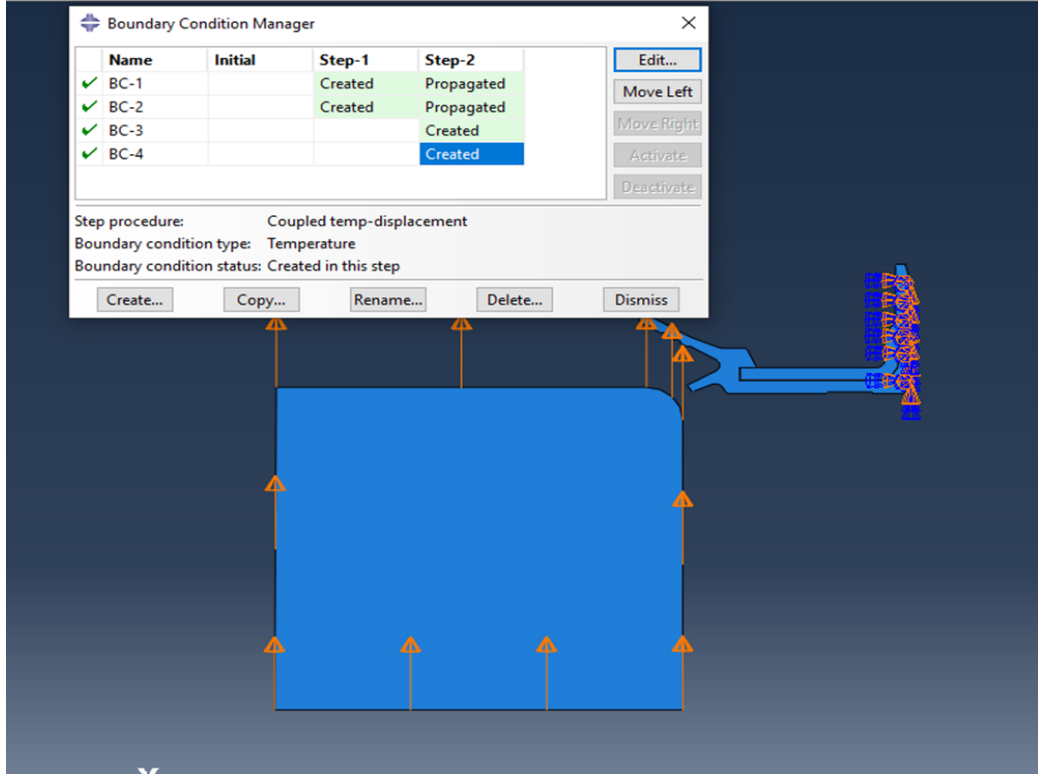
Toplamda 50 045 adet düğüm noktası ve 59 965 adet lineer dörtgen CPS4R tipi eleman kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ağ yapısı görseli Şekil 4.31’de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.31 Sonlu Eleman Modeli Ağ Yapısı

4.2.5.Sınır Şartlar

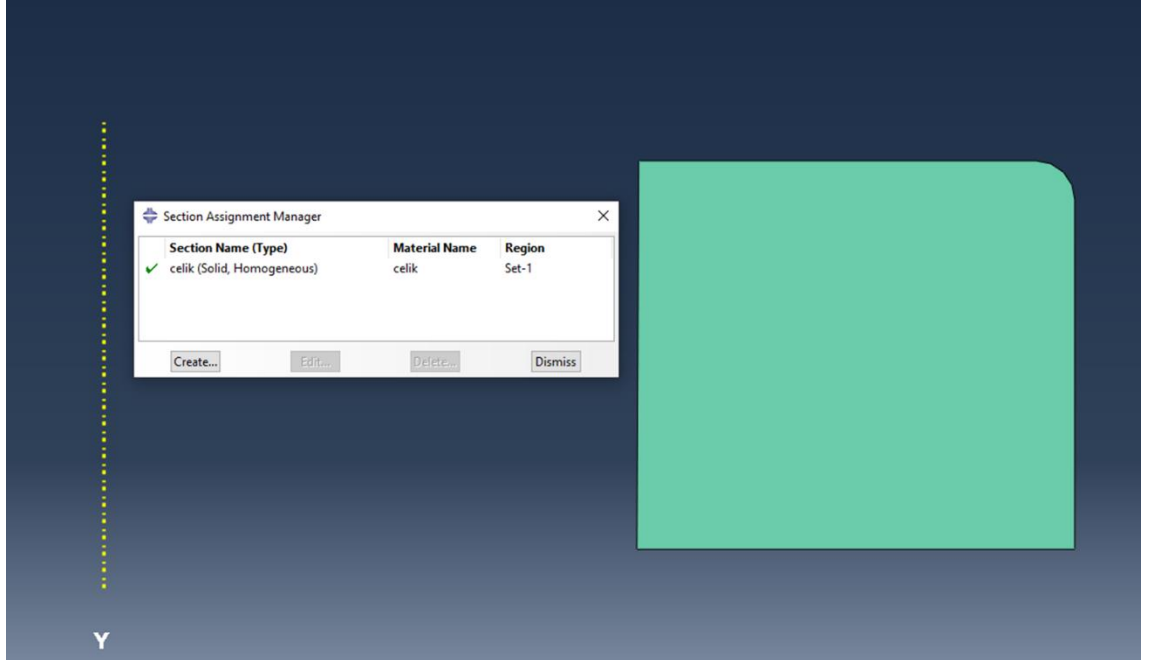
İlk olarak montaj miline çok düşük bir değerde çizgisel hız tanımlanır. Daha sonra milin sağa sola hareket ederek eksen kaçıklığını önlemek için yer değiştirme şartından Y ekseninde hareket sıfırlanır. Yer değiştirme şartına ait görsel Şekil 4.32’de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.32 Yer Değiştirme Şartı

4.2.6.Malzeme Modeli

Metal malzeme için standart olarak kullanılan DIN EN 10139/DC04 seçilmiştir. Kauçuk malzeme için daha önce bahsedilmiş testler yapılmış olup malzeme katsayıları Abaqus yardımıyla tespit edilmiştir. Metal malzeme atamasına ait görsel Şekil 4.33'te paylaşılmaktadır.



Şekil 4.33 Metal Malzeme Atanması

Kauçuk malzeme testlerinin deneysel verileri Abaqus programına Şekil 4.34’te gösterilen şekilde yüklenmiştir.

Test Data Editor

Uniaxial Test Data

Apply smoothing: 3

Marlow Options

Include lateral nominal strain

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Nominal Stress	Nominal Strain
1	0	0.089050557
2	0.012018383	0.089703863
3	-5.54328E-06	0.088903975
4	-5.54328E-06	0.088977091
5	-5.54328E-06	0.088176275
6	-5.54328E-06	0.089049118
7	-5.54328E-06	0.086794831
8	-5.54328E-06	0.087230877
9	-5.54328E-06	0.089994811
10	0.047912598	0.13231257
11	0.132141113	0.15510649
12	0.180236816	0.167117657
13	0.264221191	0.178855843
14	0.360412598	0.191412962
15	0.468811035	0.20369711
16	0.577209473	0.215981259
17	0.721740723	0.227992426

Şekil 4.34 Malzeme Verilerinin Abaqus Ekranına Girilmesi

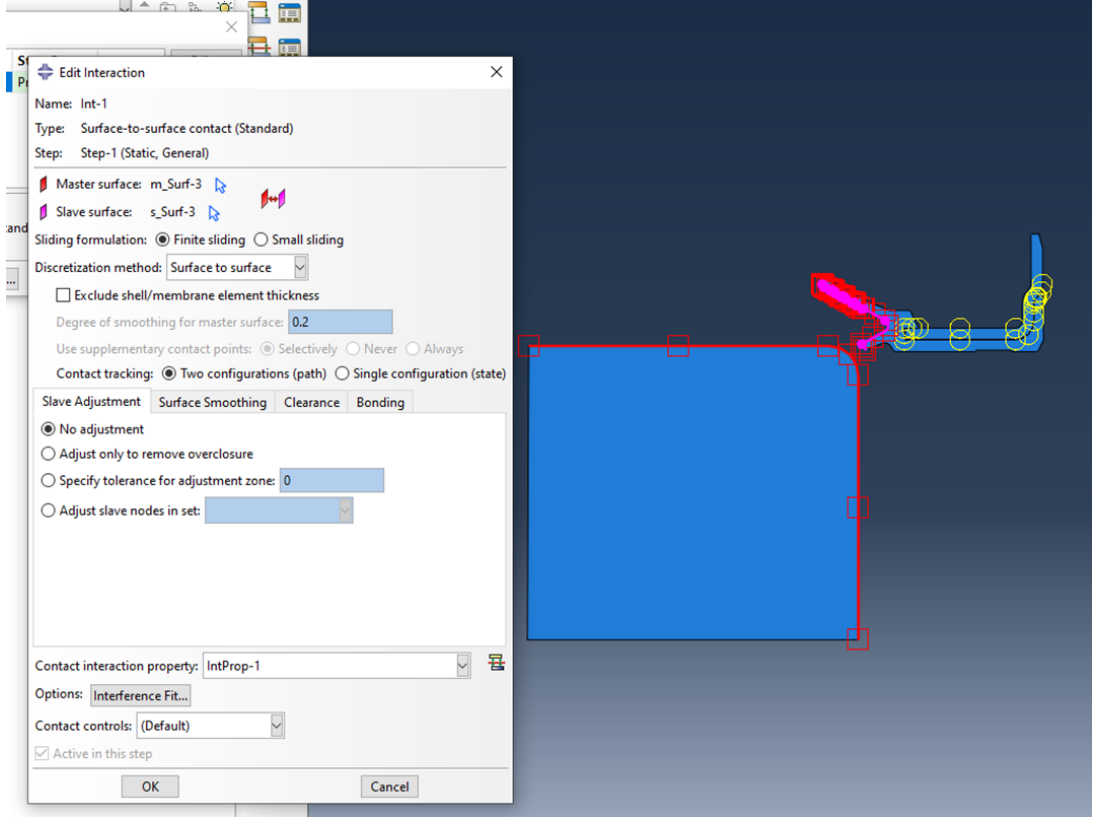
Hiperelastik davranış sergileyen malzeme tipi isotropik olarak seçilerek girişler yapılmıştır. Elde edilen tüm excel verileri programa girildikten sonra Şekil 4.35'te gösterildiği şekilde malzeme değerlendirmeleri yapılarak stabilizasyon sağlanmıştır. Yapılan deneyler üzerinden alınan veriler Abaqus sisteminde eşleştirilerek Mooney-Rivlin malzeme katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen katsayılar aşağıdaki Şekil 4.35'te verilmiştir. Mooney-Rivlin malzeme modeli kullanılmasının sebebi döner mil keçelerinin maksimum %5 deformasyon altında çalışmasıdır.

	C10	C01	D1
1	0.47	2.15	0

Şekil 4.35 Malzeme Katsayıları

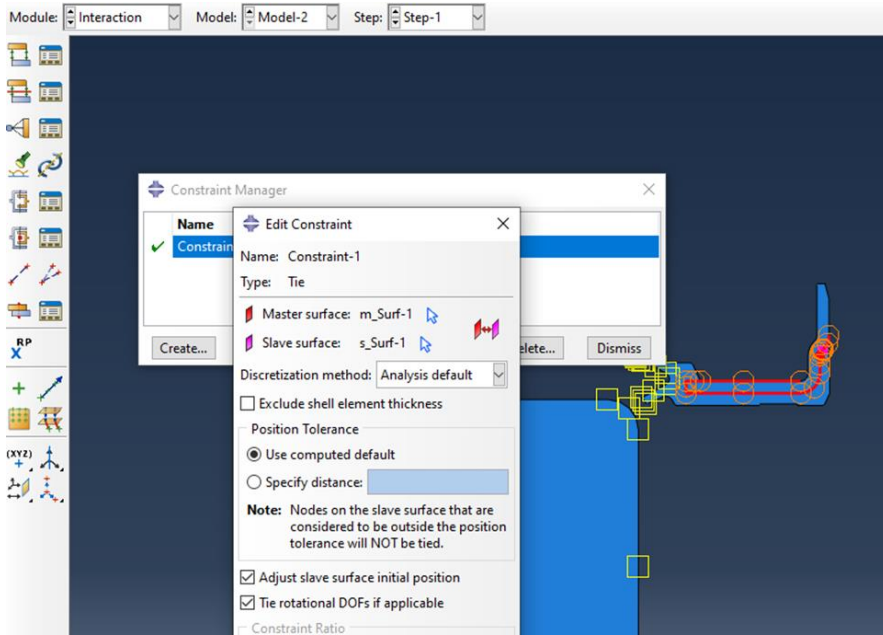
4.2.7.İlişkilerin Tanımlanması

İlk olarak yüzeyler arası sürtünmenin tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda triboloji testleri yapılarak sürtünme katsayısının 0.05 civarında olduğu tespit edilmiş olup programa bu şekilde tanımlanmıştır. Tanımlamaya ait görsel Şekil 4.36'da paylaşılmaktadır.



Şekil 4.36 Kontak Bilgisi Tanımlama Ekranı

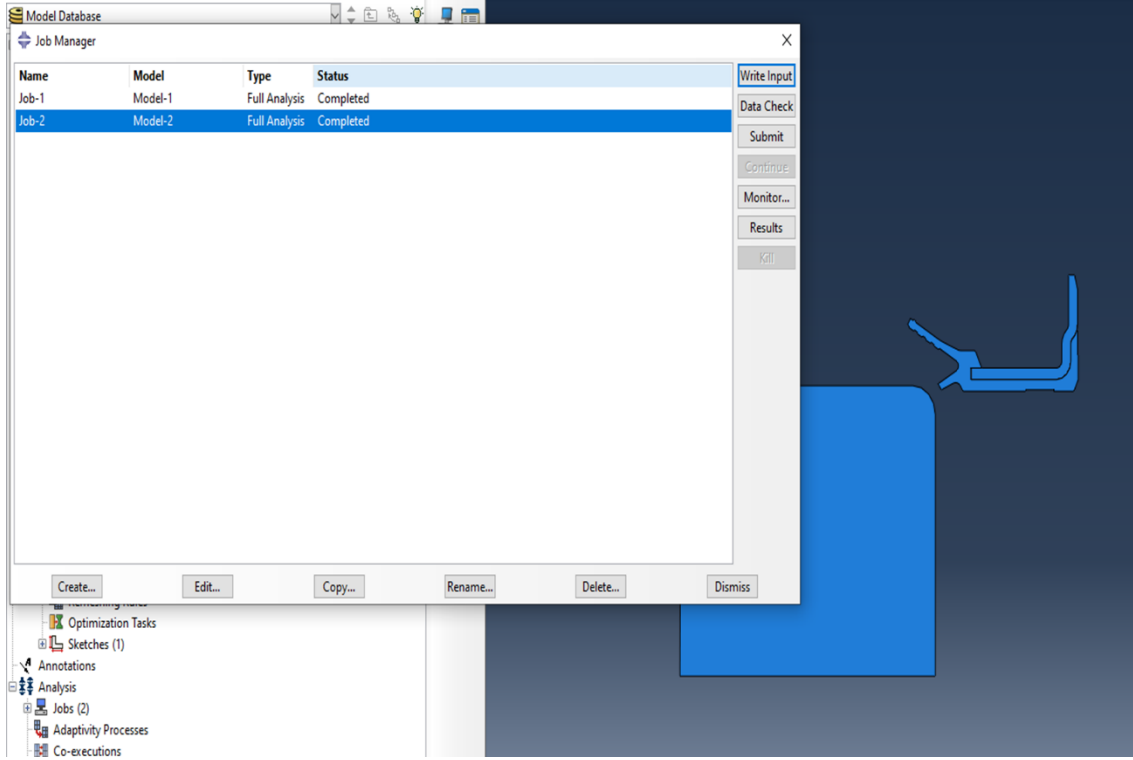
İlave olarak elastomerle bilezik ilişkisi sisteme girilmiş olup Şekil 4.37’de paylaşılmaktadır.



Şekil 4.37 Elastomer-Bilezik İlişkisi

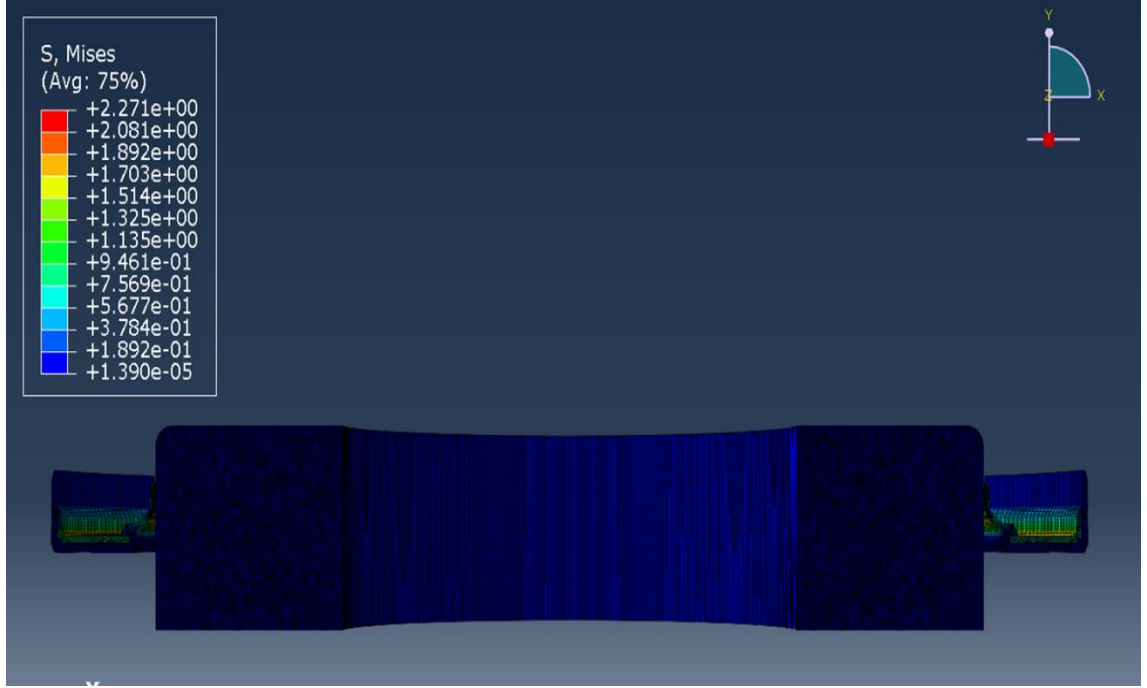
4.2.8.İşin Oluşturulması

İş oluşturulduktan sonra çözüm için çalıştırılması işlemi başlanmış olup Şekil 4.38’de paylaşılmaktadır. Yaklaşık 420 s sonrasında Şekil 4.39’da görülen çözüm elde edilmiştir.



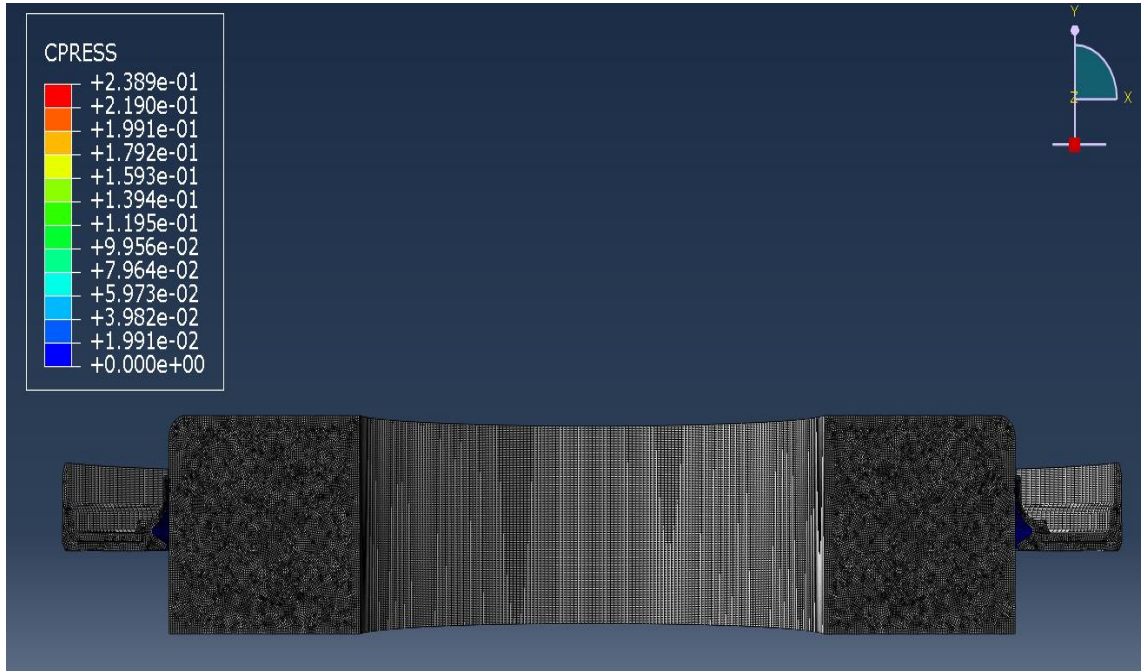
Şekil 4.38 Çözüm

Görüleceği üzere maksimum gerilme 2.271 MPa ve bilezik bölgesinde meydana gelmektedir. 210 MPa’dan çok küçük değer olması sebebiyle herhangi bir problem görülmemektedir.



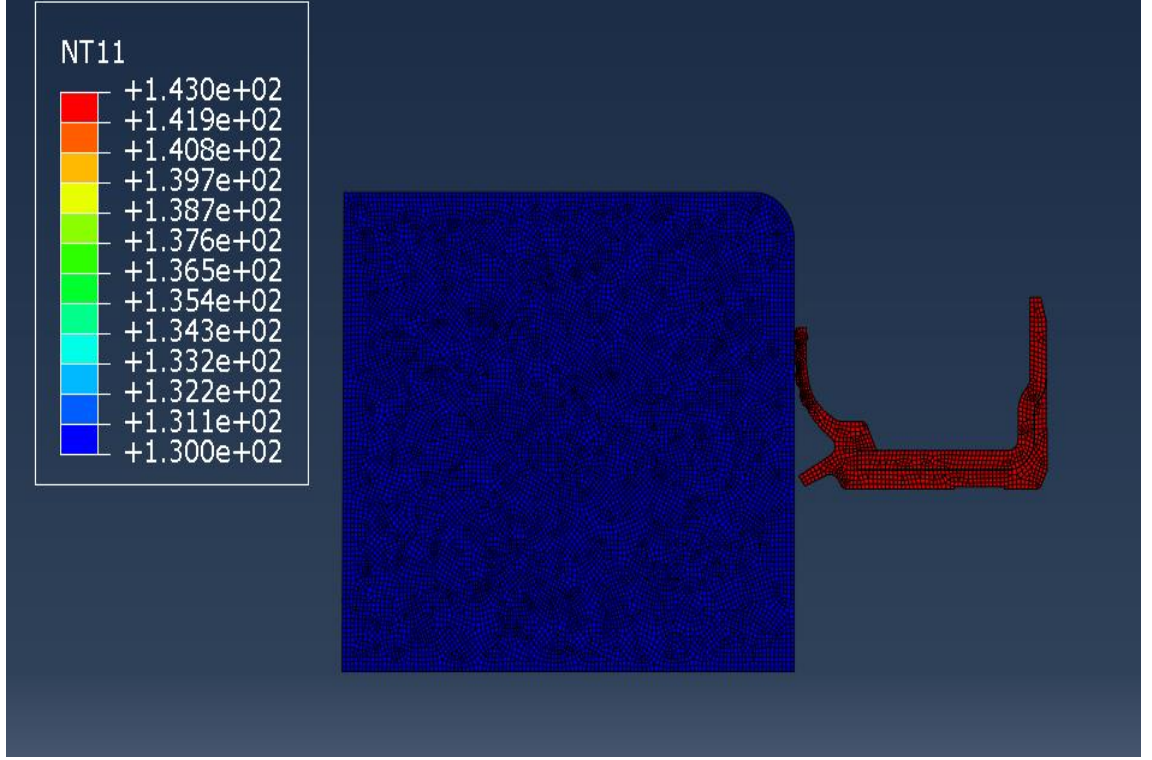
Şekil 4.39 Montaj Durumu

Görüleceği üzere Maksimum Kontak Basıncı 0.23 MPa'dır. SKT standartlarında 0.2 MPa kontak basıncı olduğu durumda aşınma 0.2 mm civarında oluşmaktadır. Kontak basınç dağılımını Şekil 4.40'ta paylaşılmaktadır.



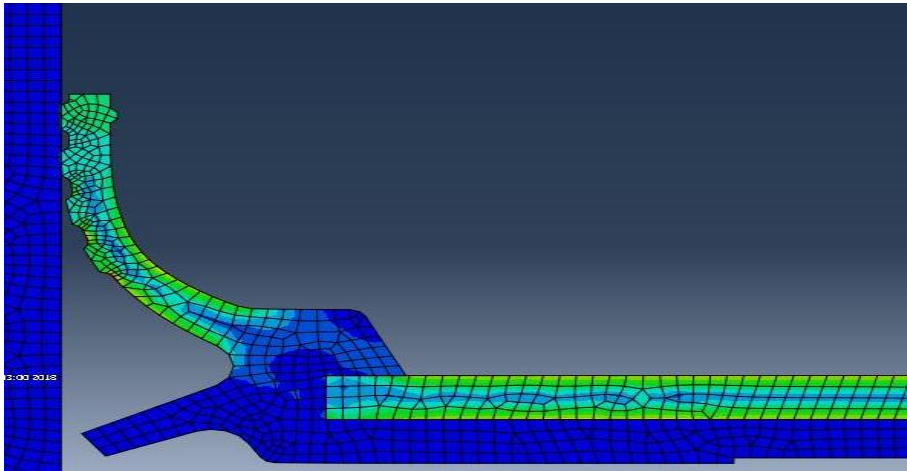
Şekil 4.40 Kontak Basınç Dağılımı

Müşteri şartnameleri dolayısıyla 130°C maksimum çalışma sıcaklığı verilerek analiz başlatılmıştır. Dudak bölgesinde 143°C lerde analiz sonucu elde edilmiş olup Şekil 4.41’de paylaşılmaktadır. FKM malzeme maksimum çalışma sıcaklığı 180°C olduğu için herhangi bir problem beklenmemektedir.



Şekil 4.41 Sıcaklık Durumu

Dudağı yakınlılaşarak alınan analiz görüntüsü Şekil 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4.42 Tırtıl Görünümü

4.2.9.Prototip Üretimi

Yüksek devirli olarak çalışacak keçemizin tasarımı aşamasında iki farklı alt üründen oluşacağını belirlemiştik. Bunlardan birincisi metal bilezik diğeri ise kauçuk ön şekildir. Prototip sac kalıbından basılan parça sonrasında yapıştırıcı kaplama operasyonuna tabi tutulur. Tüm operasyonları tamamlanmış prototip bileziğe ait görsel Şekil 4.43'teki gibidir.



Şekil 4.43 Destek Bileziği

Prototip bilezik üretimi tamamlandıktan sonra diğeri alt mamul kauçuk ön şekil üretimi yapılması gerekmektedir. Şekil 4.44'te ürüne ait kauçuk ön şekil görseli yer almaktadır.



Şekil 4.44 Kauçuk Ön-şekil

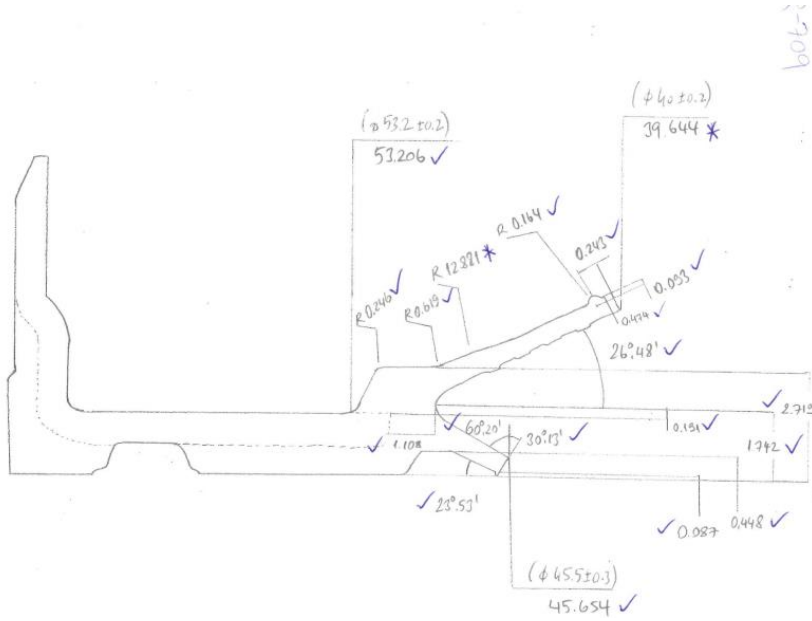
Tüm alt mamuller tamamlandıktan ürün kompresyon kalıplarında basılarak vulkanize ürün haline getirilir. Vulkanize ürüne ait görsel Şekil 4.45'tedir.



Şekil 4.45 Vulkanize Ürün

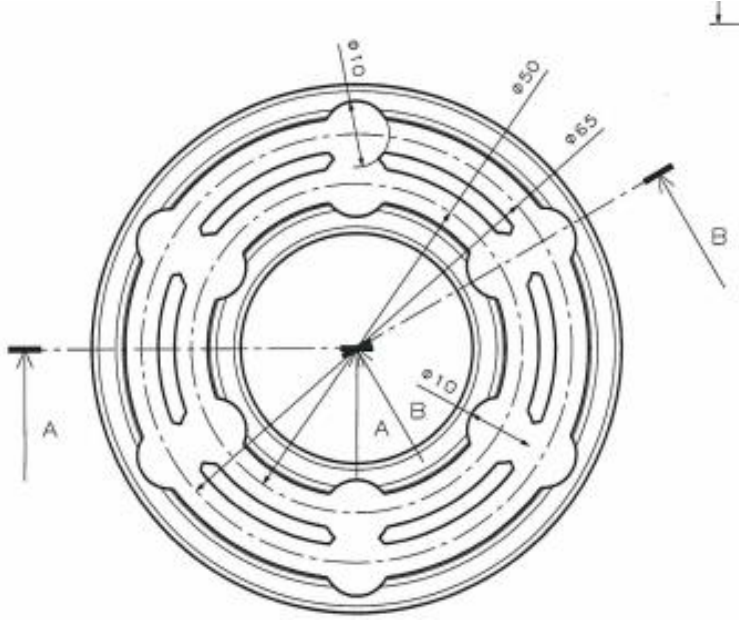
Vulkanize ürün tamamlandıktan sonra parçalar çapraz bağların tamamlanması için postkür operasyonuna tabi tutulmuştur.

Postkür operasyonu tamamlandıktan sonra ürün nihai hale ulaşmış ve ölçüme hazır hale gelmiştir. Örnek ölçüm raporu Şekil 4.47'de gösterilmiştir.



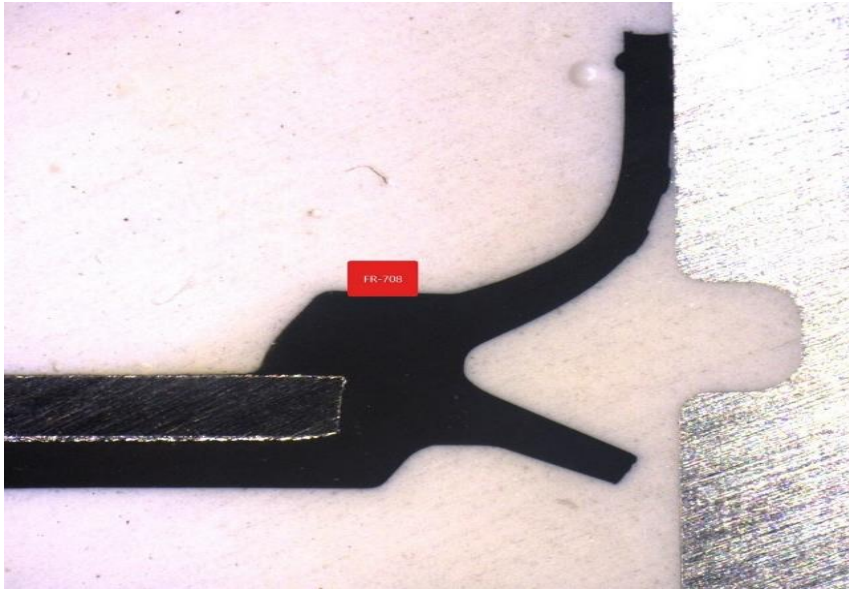
Şekil 4.47 Ölçüm Raporu

Döner mil keçelerinin dudaklarının pozisyonlarının görülebilmesi geliştirilmiş özel bir metot mevcuttur. Bu metoda literatürde araldit metodu adı verilmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarını değerlendirebilmemiz adına yüksek devirli keçe tasarımı için de bu aparat geliştirilmiş olup sonuç değerlendirilmesi yapılmıştır. Araldit aparatına ait görsel Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.48 Araldit Aparatı

Araldit aparatına montaj edilmiş keçeye ait görsel Şekil 4.49’da verilmiştir.



Şekil 4.49 Araldite Montajlı Keçe

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiş ve araldit aparatından yapılmış ölçümlerin kıyaslaması Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge4.2 Karşılaştırma

	Temas Eden Tırtıl Sayısı (adet)	Temas Genişliği (mm)	Son Tırtılın Temas Etmesi İçin Gerekli Mesafe (mm)
<i>Prototip</i>	2	1,43	0,04
<i>FEA</i>	2	1,40	0,02

Sonlu elemanlar analizi ve radyal yük ölçümü kıyaslaması yaparak modelin güvenilirliği araştırılmaya devam edilmiştir. Prototip olarak üretilen keçelerin DIN 3761-9 standardına göre radyal yük ölçümleri yapılmıştır. Ardışık altı numunenin ölçülen radyal kuvvet değerlerinin ortalaması alınmıştır. Deneysel olarak yapılan ölçümlerde radyal kuvvet değeri ortalama 6,30 N, sonlu elemanlar analizi sonucunda is 7,00 N bulunmuştur. Sonuçlar arasındaki %9 fark oluşmuştur.

4.2.10.Fonksiyon Testi

Önceki bölümlerde bahsettiğimiz üzere yüksek devirli döner mil keçeleri yaklaşık olarak 16 000 Rpm de çalışmaktadır. Ortalama sıcaklık 110°C derece olarak tanımlanmaktadır. Maksimum çalışma sıcaklığı 130°C derece olarak tanımlanmaktadır. DIN 3761-10 şartnamesine göre Çizelge 4.3’te verilen test programı oluşturulmuştur.

Çizelge 4.3 Test Programları

TEST PROGRAMS							
Step No	Step Duration (min)	Temperature (± 3 °C)	Rotation per min. (rpm)	Velocity (m/s)	Shaft Rotating Direction	Cycle Number (Days)	
1	600	110	8000	18,8	Right	10	
2	360	110	10000	23,6	Right	10	
3	180	130	13000	30,6	Right	10	
4	60	130	16000	37,7	Right	10	
5	240	23	0	0,0		10	
Total Duration of Steps (min)	1440	Total Cycle	10	Targeted Total Work (Min/Hour/Day)	14400	240	10

Test programı kapsamında prototip ürün teste alınmıştır. Test esnasında 4 gün herhangi bir kaçak veya sızıntı meydana gelmemiştir. Sekizinci günden itibaren döner mil keçesi kaçak vermeye başlamıştır. Test esnasında Samsung marka SCU 2370 model termal kamerayla ölçülen dudak sıcaklığı 165 °C'dır. Yüksek devirli test cihazının 16 000 Rpm hız değerinde sürtünme torku 0,12 Nm olarak ölçülmüştür.

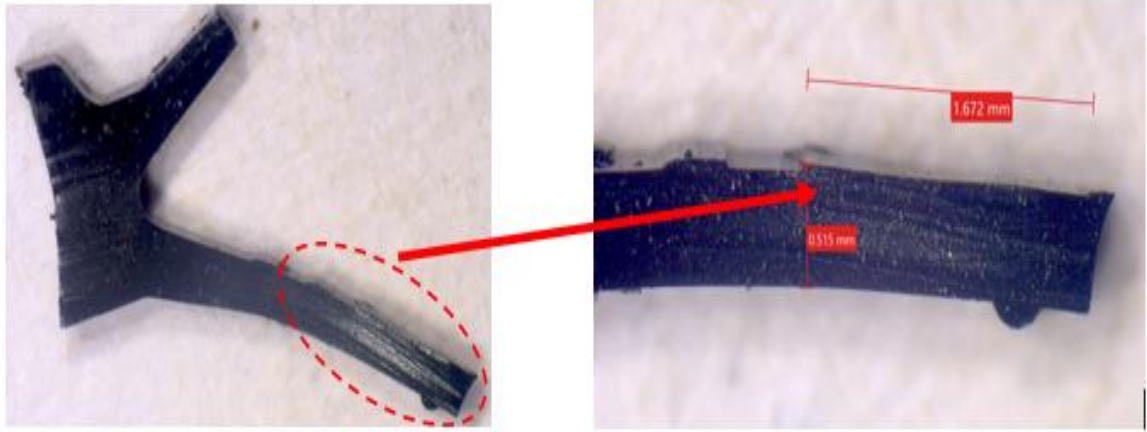
TEST PROGRAMS							
Step No	Step Duration (min)	Temperature (± 3 °C)	Rotation per min. (rpm)	Velocity (m/s)	Shaft Rotating Direction	Cycle Number (Days)	
1	600	110	8000	18,8	Right	10	
2	360	110	10000	23,6	Right	10	
3	180	130	13000	30,6	Right	10	
4	60	130	16000	37,7	Right	10	
5	240	23	0	0,0		10	
Total Duration of Steps (min)		1440	Total Cycle	10	Targeted Total Work (Min/Hour/Day)	14400	240 10
TESTS PROPERTIES (BEFORE AND AFTER)							
PROPERTIES		BEFORE	AFTER	PROPERTIES		AFTER	
Internal Dia. without spring (mm)		39,86	44,53	Friction Surface Width (mm)		0,1	
Internal Dia with spring (mm)				The crack at lip (Yes / No)		NO	
2. Internal Dia. without spring (mm)				Is contact patern correct (Yes / No)		NO	
2. Internal Dia with spring (mm)				Lip Hardening (Yes / No)		NO	
Protective Lip Internal Dia. (mm)		45,56	45,75	Leakage oil quantity (g)		5,07 Gr.	
Rubber Outer Dia. (mm)		70,33	70,15	Leakage from test slot (g)		0,0 Gr.	
Metal Outer Dia. (mm)		70,24	70,08	Permanent Deformation in Dia – w/o Spring (%)		10,49%	
Ovality		0,02/0,02	0,02/0,03	Permanent Deformation in Dia – with Spring (%)			
Coaxiality of seal lip acc. to external dia.		0,08	0,07	Carbonization on lips (Yes / No)		NO	
ADDITIONAL RESULTS AND EVALUATIONS							
* At the end of 7 days 5 gr leakage.							
Result							
Test Operator			Results (OK / NOK)			APPROVAL	

Şekil 4.50 Test Raporu

DIN 3761-10'a göre 240 saat sonunda yağ kaçağının 3 gramın üzerinde olması durumunda keçenin fonksiyon testi red olarak değerlendirilmektedir. Bu sebeple ürün üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılması kararı alınmıştır. Test raporu görseli Şekil 4.50'deki gibidir.

4.3.Tasarım Optimizasyonu

Önceki bölümlerde de belirttiğimiz üzere döner mil keçelerinin tasarım kriterlerinin başında radyal yük geldiğini belirtmiştik. Döner mil keçelerinin radyal yükü DIN3761-8'e göre ölçülmektedir. Döner mil keçelerinin kaçak sebeplerinden biri de yüksek radyal yük sebebiyle meydana gelen aşırı aşınmalardır. Bunun tespit edilmesi için fonksiyonel testin tamamlanmasından sonra profil kesilerek ölçüsel kontrol yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda yüksek devirli keçemizin fonksiyon testi kaçak vermesi sebebiyle profil kesilme işlemi yapılmış olup Zeiss Optic cihazında detaylandırılmış olarak Şekil 4.51' de görülmektedir. Şekil 4.51'de görüldüğü üzere dudak üzerindeki radyal yükün fazla olması sebebiyle tırtıllar aşınma meydana gelmiş. Aşınmanın başlamasıyla birlikte sızıntı başlamış olup yedinci gün sonunda kaçağa dönüşmüştür.

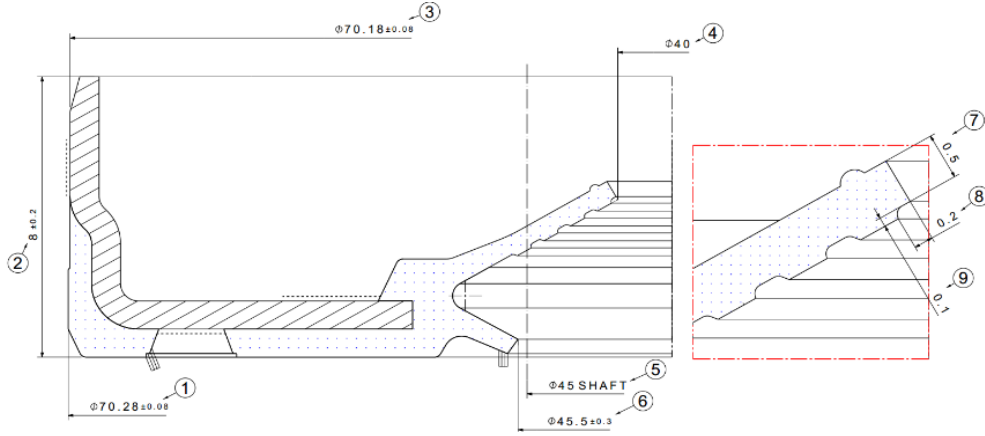


Şekil 4.51 Dudak Aşınmaları

Dudak aşınmalarından da görüleceği gibi yüksek devirli keçemizin tasarım optimizasyonuna ihtiyaç duyduğu görülmüştür.

4.3.1.Optimizasyon Çalışmaları

Optimizasyon çalışmalarının yapılabilmesi için yüksek devirli keçemizin ölçülerinin numaralandırılması gerekmektedir. Bu sebeple teknik resim üzerinde ölçüler Şekil 4.52'deki gibi numaralandırılmıştır.



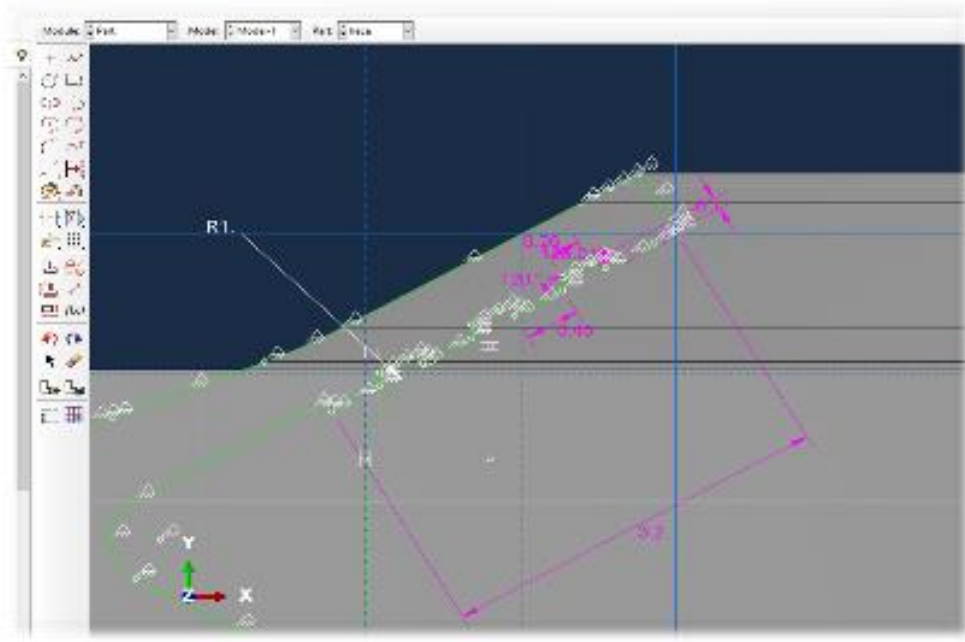
Şekil 4.52 Yüksek Devirli Keçe Ölçülerinin Numaralı Hali

Bilindiği üzere her zaman teknik resimdeki ölçülerle prototip numune üzerindeki ölçüler birebir aynı olamaz. Teknik resim ve numune üzerindeki ölçüleri kıyaslama yapabilmemiz için Çizelge 4.4'te oluşturulmuştur.

Çizelge4.4 Ölçüm Sonuçları

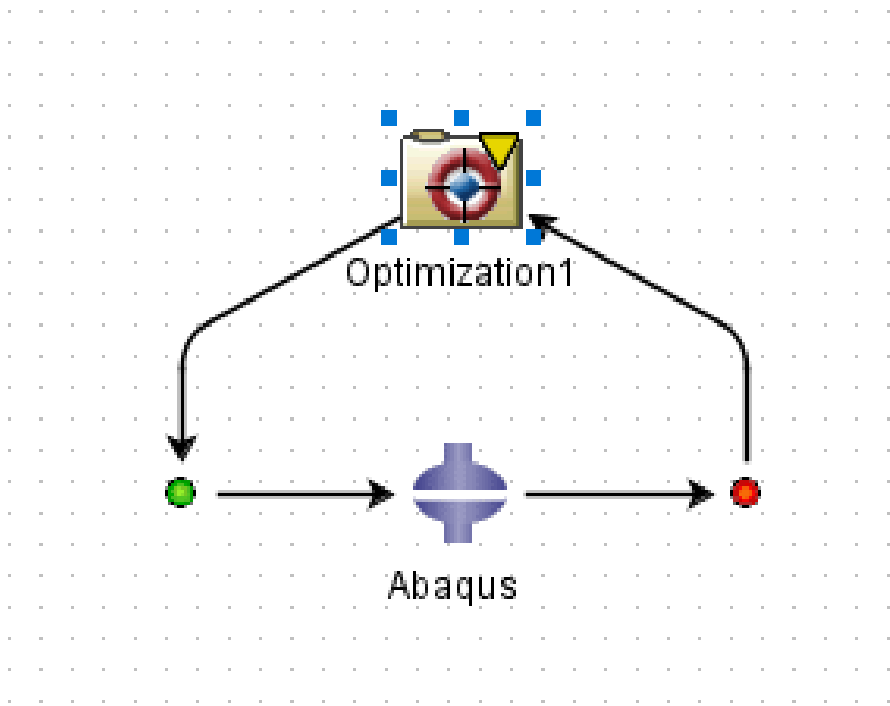
Ölçü No	Teknik Resim Ölçüsü	Prototip Parça Ölçüsü	Durum
1	$\varnothing 70,28 \pm 0,08$	$\varnothing 70,33$	OK
2	$\varnothing 70,18 \pm 0,08$	$\varnothing 70,24$	OK
3	$8,00 \pm 0,20$	7,97	OK
4	$\varnothing 40,00 \pm 0,20$	$\varnothing 39,86$	OK
6	$\varnothing 45,50 \pm 0,30$	$\varnothing 45,56$	OK
7	$0,50 \pm 0,20$	0,65	OK
8	$0,20 \pm 0,10$	0,18	OK
9	$0,10 \pm 0,05$	0,08	OK

Optimizasyon çalışması öncesinde FEA modeli oluşturulurken parametrik model çalışması yapılmamıştı. Yüksek devirli keçenin validasyon testi esnasında kaçak meydana gelmesi ve dudak aşınmasının fazla olması sebebiyle optimizasyon çalışması yapılması kararlaştırılmıştır. Optimizasyon çalışması yapılması için parametrik model çalışması yapılmış olup Şekil 4.53'te detaylı olarak görülmektedir.



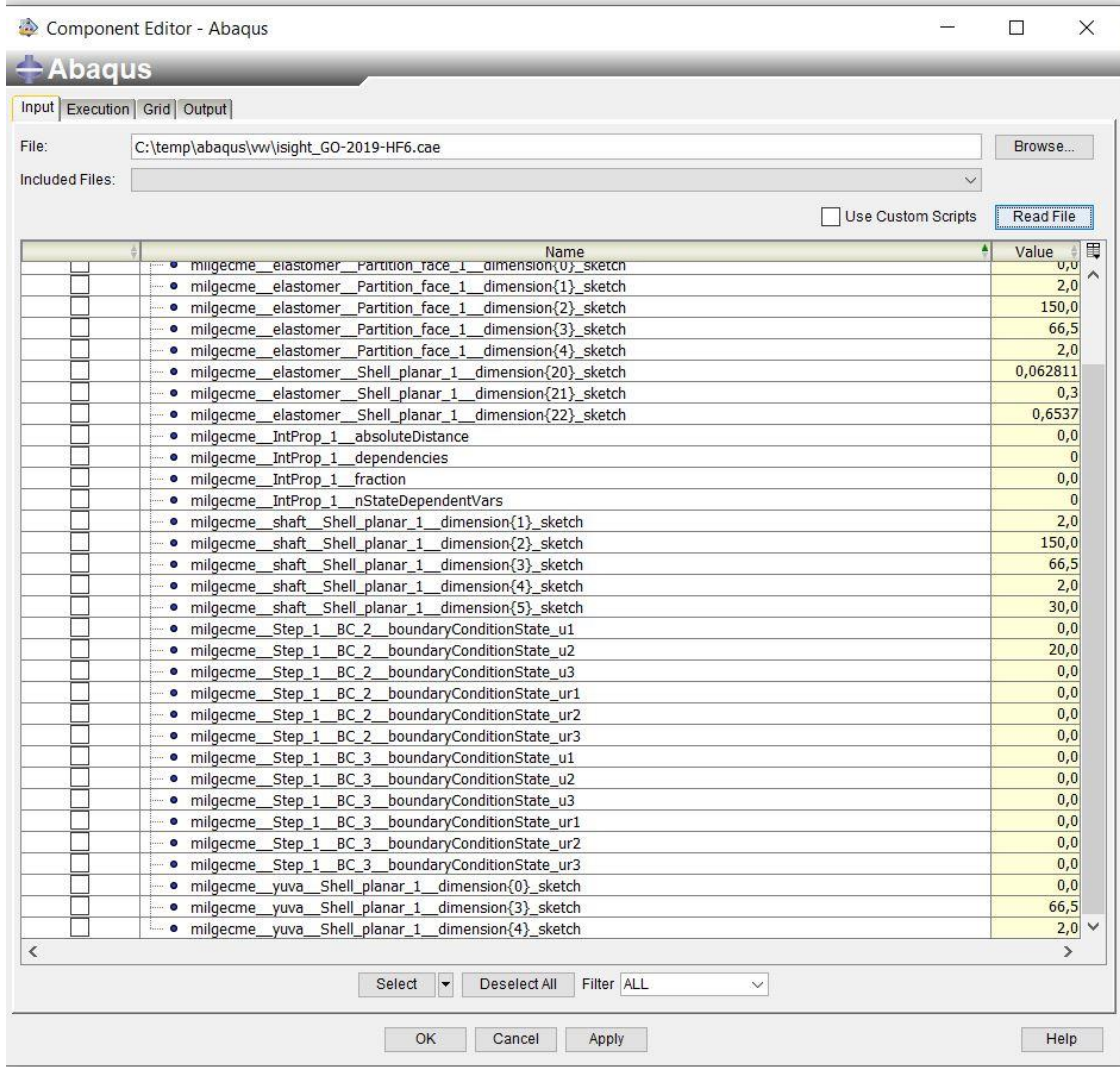
Şekil 4.53 Parametrik Model

Abaqus programında parametrik model oluşturulduktan sonra analiz çalışması tekrardan yapılmıştır. Analiz çalışmasının tamamlanmasından sonra İ-sight programında optimizasyon döngüsünün kurulmuş olup Şekil 4.54'te gösterilmiştir.



Şekil 4.54 Optimizasyon Döngüsü

Optimizasyon döngüsünün tamamlanmasından sonra girdi verilerinin tanımlama işlemi yapılmış olup Şekil 4.55'te gösterilmiştir.



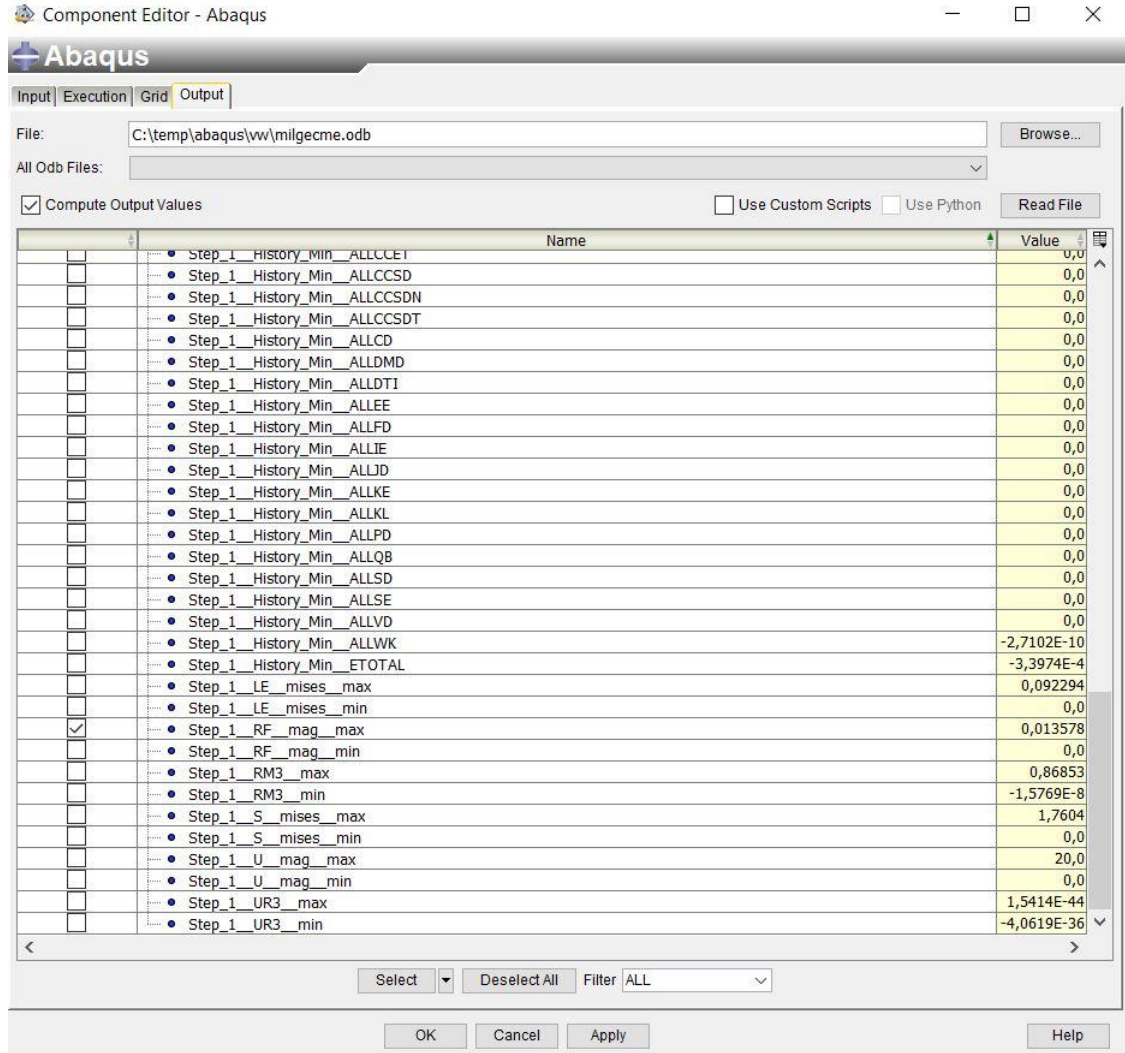
Şekil 4.55 Girdi Parametrelerin Seçilmesi

Girdi olarak seçilen verilerin detaylı bilgisi Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 Parametreler

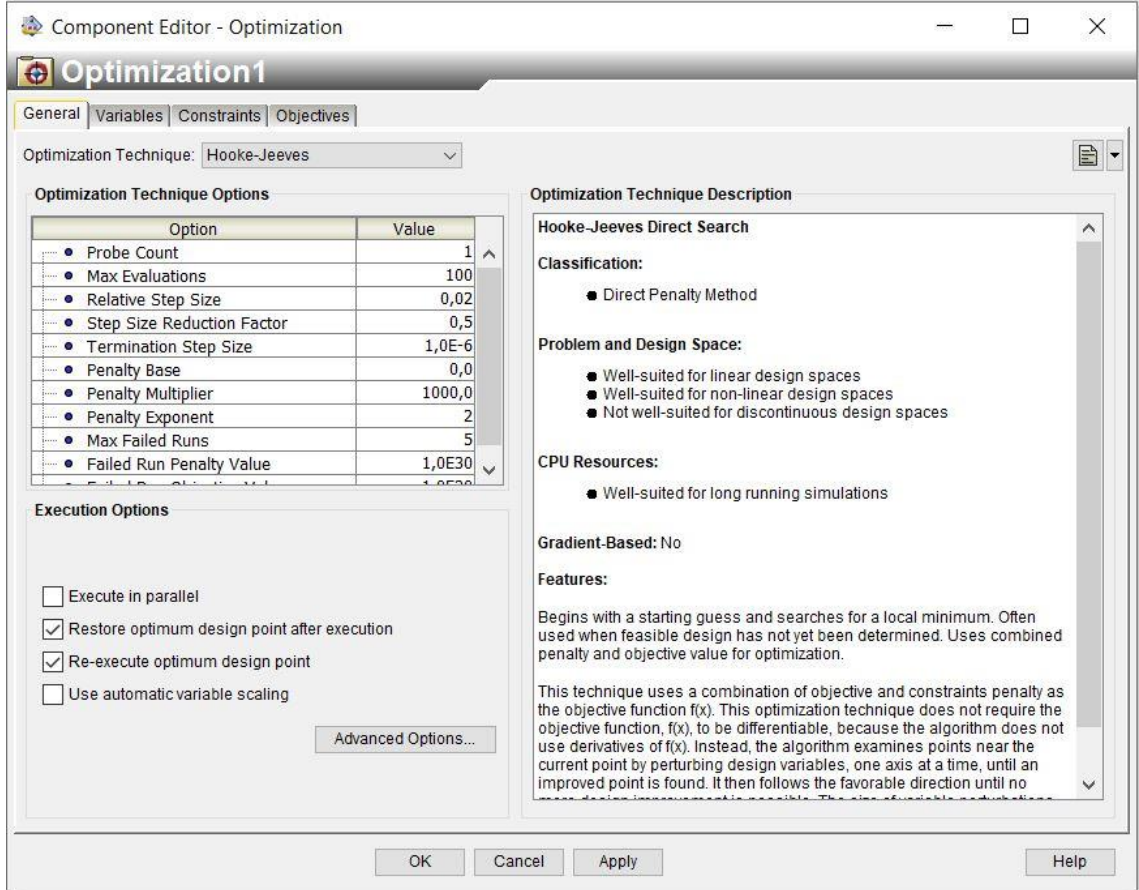
Sınır Koşullar	Amaç Fonksiyonu
$0,30 < \text{Ölçü } 7 < 0,70$	Toplam Kontak Kuvvetini Minimum Yapmak
$0,10 < \text{Ölçü } 8 < 0,30$	
$0,05 < \text{Ölçü } 9 < 0,15$	

Sınır koşullarının tanımlanmasından sonra çıktılar üzerinden amaç fonksiyonunun uygulanacağı veri seçilmelidir. Çıktı verilerinin seçilme ekranına ait görsel Şekil 4.56'da verilmiştir.



Şekil 4.56 Çıktı Verilerinin Ekranı

Optimizasyon algoritması olarak Hooke-Jeeves algoritması seçilmiş olup yakınsama faktörü 0.01 olarak seçilmiştir. Şekil 4.57'de optimizasyon algoritmasının seçildiği ekrana ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 4.57 Optimizasyon Algoritma Ekranı

Optimizasyon çevriminin başlatılmasından yaklaşık otuz dakika sonrasında Çizelge 4.6'da gösterilen veriler elde edilmiştir.

Çizelge4.6 Sınır Şartları ve Sonuçlar

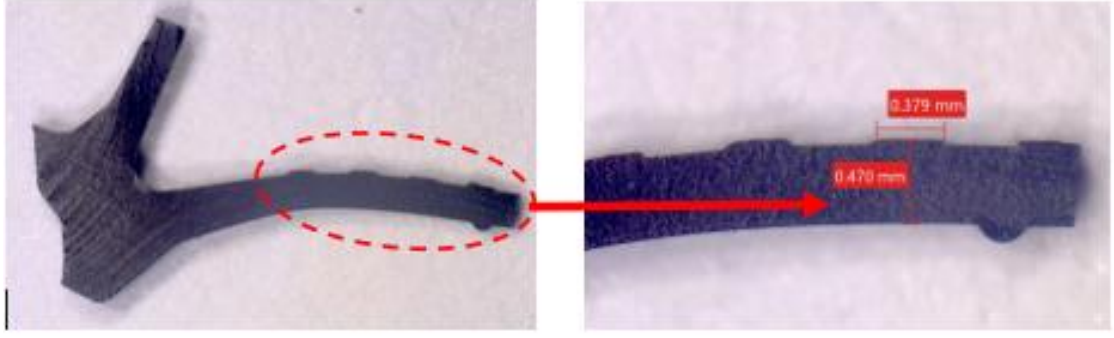
Sınır Şartları	Amaç Fonksiyonu	Sonuçlar
$0,30 < \text{Ölçü 7} < 0,70$	Toplam Kontak Kuvvetini Minimum Yapmak	Ölçü 7 = 0,41
$0,10 < \text{Ölçü 8} < 0,30$		Ölçü 8 = 0,30
$0,05 < \text{Ölçü 9} < 0,15$		Ölçü 9 = 0,11

Optimizasyon çalışması sonrasında kalıp revizyon çalışmaları yapılarak yeni seviye prototip ürün üretilme çalışmaları yapılmıştır. Üretilen ikinci seviye prototip ürünün ölçüleri kontrol edilmiş olup Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge4.7 Optimize Parça Ölçüleri

Ölçü No	Optimize Parça Ölçüleri	Statü
1	Ø70,30	OK
2	Ø70,22	OK
3	7,93	OK
4	Ø39,95	OK
6	Ø45,76	OK
7	0,40	OK
8	0,30	OK
9	0,11	OK

Amaç fonksiyonumuzun tutarlı olup olmadığını kontrol etmemiz için radyal yük kontrolü yapılmıştır. Birinci seviye numunelerin radyal yükü yaklaşık olarak 7,00 N civarındadır. İkinci seviye numunelerin radyal yük ölçümü yapılmış olup 5,00 N civarında okunmuştur. Yapılan kıyaslama sonucunda radyal kuvvette %28 olarak iyileşme görülmüştür. Radyal kuvvette meydana gelen iyileşmenin yüksek devirli keçenin testine olumlu fayda sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Önceki bölümlerde belirlenmiş ve Çizelge 4.3' de verilen test programına göre parçalar teste alınmıştır. Teste alınan parçanın her gün verileri kontrol edilmiş olup kaçağın başladığı gün kayıt altına alınmıştır. Testin on üçüncü Gününün sonunda 3,81 gram kaçak meydana gelmiştir. Test esnasında görülen maksimum dudak sıcaklığı 150°C' dir. Yüksek devirli test cihazının 16 000 Rpm hız değerinde sürtünme torku 0,07 Nm olarak ölçülmüştür. DIN 3761-10'a göre on gün sonunda kaçak olmaması durumunda keçenin test sonucunun olumlu olduğunu söylemektedir. İkinci seviye parçanın test sonra görsel incelemesinin yapılması için profil kesilme işlemi yapılmış olup Şekil 4.58'de gösterilmiştir. Şekil 4.58' de görüldüğü dudak üzerindeki radyal kuvvetin düşmesiyle aşınma miktarı da düşmüş olup keçe dudağı üzerindeki tırtıllar açık şekilde görülmektedir.



Şekil 4.58 Test Sonrası Profil Ölçümü

Birinci seviye ve ikinci seviye parçaların test sonrası profillerin kıyaslanması yapıldığında ikinci seviye parçanın profilinde aşınmanın neredeyse yok denecek düzeyde olduğu görülmüştür. Yapılan optimizasyon çalışmasının etkileyici bir sonuç verdiği görülmüştür.

5.TARTIŞMA ve SONUÇ

Günümüzde çevre kirliliğinin azaltılması amacıyla elektrikli araç kullanımının arttırılması amaçlanmaktadır. İçten yanmalı araçların motor devirleri maksimum 8 000 Rpm civarındadır. Elektrikli araçlarda kullanılan motorların devirleri maksimum 16 000 Rpm civarındadır. Elektrikli araçlarda güç kaybını önlemek adına sürtünmenin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple konvansiyonel garter yaylı bir keçenin kullanılması imkansızdır. Yüksek devirde keçe tasarımının fonksiyonelliğinin sağlanabilmesi için mutlak ve mutlak surette FEA metodunun kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda yeni bir tasarım yapılmadan önce sonlu elemanlar metoduyla konvansiyonel bir keçenin analiz çalışmasının yapılması gerekmektedir. İlk olarak iki toz dudağa ve yaylı bir dudağa sahip bir keçenin sonlu elemanlar analizi çalışması yapılmıştır. Yapılan analiz çalışması sonrasında radyal kuvvetin deneysel çalışmayla % 99 oranında uyum sağladığı görülmüştür. Yapılan konvansiyonel analiz çalışmasında elde edilen olumlu sonuçlar ışığında malzeme katsayılarının belirlenmesinin ve analiz modelinin kurulmasının doğru yapıldığı görülmektedir.

Konvansiyonel analiz çalışmasından olumlu sonuç almamızdan mütevellit yüksek devirli keçe için geliştirilen malzeme testleri gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Şekil 2.12’de yer alan “Elastomer Seçim Grafiği” kullanılarak FKM malzeme seçimi yapılmıştır. Çapı 45 mm olan garter yaylı bir keçenin radyal yükü yaklaşık olarak makro yardımıyla 21 N hesaplanmaktadır (Dekker 1996). 25 N radyal yüke sahip bir keçenin maksimum 7 000 Rpm’e kadar çalıştığı Şekil 2.12’den açıkça görülmektedir. Elastomer malzemenin limitleri düşünüldüğünde 16 000 Rpm’de çalışacak keçenin radyal kuvvetinin yaklaşık olarak 2,5 kat düşürülmesi gerekmektedir. Yaysız radyal yükün toplam radyal yüke oranının %50 olduğu bilinmektedir (Dekker 1996). Bu sebeple yeni tasarımda radyal kuvvetin 2,5 kat aşağıya düşürülmesi ancak ve ancak yaysız bir tasarımla sağlanabilmektedir. Motor yağlarının kullanılması ve çalışma sıcaklıklarının yüksek olması sebebiyle FKM malzeme seçilmiştir. SKT Malzeme Ar-Ge Bölümünün destekleri sayesinde yeni bir malzeme geliştirilme çalışması tamamlanmıştır. Geliştirilen malzemenin sonlu elemanlar malzeme modeline ait katsayıların tespit edilebilmesi için fiziksel malzeme testleri yapılmıştır. Yapılan testlerin sonucu ışığında FKM malzemeye ait Mooney-Rivlin katsayıları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge5.1 Geliştirilen Malzemeye Ait Mooney-Rivlin Katsayıları

C10	C01	D1
0,47	2,15	0

Malzeme katsayıların elde edilmesinden sonra sonlu elemanlar analiz modeli kurulmuş olup bu modele ait çözüm işlemi tamamlanmıştır. Çözüm sonucunda elde ettiğimiz veriler Çizelge5.2’de verilmiştir.

Çizelge5.2 Çözüm Sonuçları

	Kontaktaki Tırtıl Sayısı	Kontak Mesafesi (mm)	Radyal Yük (N)
<i>DeneySEL</i>	2	1,43	7,00
<i>FEA</i>	2	1,40	7,20

Çizelge 5.2 sonuçlarına göre hem deneysel hem de sonlu elemanlar sonuçlarında iki adet tırtıl tam temas etmiştir. Çizelge 5.2’deki kontak mesafeleri karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 0.03 mm bir fark görülmektedir. Sonuçlar yaklaşık olarak %98 oranında uyum göstermektedir.

Yüksek devirli keçeye ait doğrulamaların tamamlanmasından sonra fonksiyon testine geçilmiştir. Fonksiyon testinde ilk tasarım keçemiz yedi gün sonunda beş gram kaçak vermiştir. DIN 3761-10’a göre on günden kısa sürede meydana kaçak gelmesi durumunda keçenin uygun olmadığı değerlendirilmektedir. Yapılan test sonrası sağlanan profil kontrolünden yüksek devirli keçenin dudaklarındaki tırtılların aşırı derecede aşındığı görülmektedir. 2015 yılında yayınlanan bir çalışma da 39,80 mm iç çapa sahip garter yaylı bir keçenin 3m/s ve 5m/s hızda iç çapı 39,60 mm olan bir keçeye göre sürtünme torkunun düşük olduğu paylaşılmıştır. İlave olarak bu çalışma da sıklık arttıkça çalışma esnasında dudak sıcaklığının da arttığı bilgisi paylaşılmıştır (D.Bulut ve ark. 2015). İlk yapılan testte keçe dudağının çapı 39,86 mm olup radyal yük 7 N olarak ölçülmüştür. Bu radyal yüke bağlı olarak 16 000 Rpm hızda çalışırken tork 0.12 Nm ve dudak sıcaklığı 165°C ölçülmüştür. Sonuç olarak yüksek devirli keçe tasarımının optimize edilmesi gerekmektedir.

I-Sight programı yardımıyla yapılan optimizasyon çalışması sonucunda 7 numaralı dudak kalınlığı ölçüsünün 0,40 mm olarak düşürülmesi gerektiği görülmüştür. 2018 yılında yayınlanan bir çalışmada dudak kalınlığının artırılması sonucu sürtünme torkundan kaynaklı dudak sıcaklığının artacağını ifade etmişlerdir (G.Tok ve ark. 2018). Bu sebeple yüksek devirli keçenin bazı ölçülerinde revizyon yapılması ihtiyacı doğmuştur. Kalıp revizyonu sonrası basılan parçalar kontrol edilmiş olup istenilen seviyede olduğu görülmüştür. Optimizasyon sonrası basılan yüksek devirli keçenin radyal yükü yaklaşık olarak 5 ± 0.1 N civarında ölçülmüştür. İlk seviye yüksek devirli keçenin radyal yüküne göre ikinci seviye keçenin radyal yükünde %28 civarında iyileşme meydana gelmiştir. Yapılan bu iyileşmenin dudaktaki tırtıl aşınmasının önüne geçileceği düşünüldüğü için ikinci seviye keçe fonksiyon testine tabi tutulmuştur. İkinci seviye yüksek devirli keçe fonksiyon testinde onüç gün sonunda yaklaşık dört gram kaçak vermiştir. Birinci seviye yüksek devirli keçeyle ikinci seviye yüksek devirli keçenin fonksiyon testlerinin sonuçları kıyaslandığında ömür süresinde %95 oranında iyileşme görülmüştür. Fonksiyon testinde görülen iyileşmenin sebepleri sıralarsak;

1. 7 numaralı dudak kalınlığı ölçüsü 0,65 mm'den 0,40 mm'ye düşmüştür. Dudak kalınlığının düşmesi sebebiyle radyal yük değerinde azalma meydana gelmiştir. Radyal yük değerinde meydana gelen azalma sürtünme tork değerini düşürür ve aşınma azalır (G.Tok ve ark. 2018).
2. 4 numaralı iç çap ölçüsü 39,86 mm'den 39,95 mm olacak şekilde büyümüştür. İlk keçenin 16 000 Rpm hızında sürtünme torku 0,12 Nm iken optimize keçenin 16 000 Rpm'de sürtünme torku 0,08 Nm'dir. İç çap sıklığının azalması sebebiyle sürtünme torku değerinde azalma meydana gelmiştir (D.Bulut ve ark. 2015).
3. İlk yüksek devirli keçe 16 000 Rpm de çalışırken dudak sıcaklığı 165°C olarak ölçülmüştür. Optimize edilmiş yüksek devirli keçe 16 000 Rpm de çalışırken dudak sıcaklığı 150°C olarak ölçülmüştür. Sürtünme torkunun azalması sebebiyle dudak çalışma sıcaklığı da düşmüştür (D.Bulut ve ark. 2015).

Optimize keçenin test sonrası dudak profili kesilmiş olup kabul edilebilir seviyede aşınma olduğu Şekil 4.58'de görülmüştür.

Sonuç olarak elektrikli araçların motorlarında kullanılabilecek yüksek devirli bir keçe tasarımı yapılmış ve fonksiyon testlerinden başarılı sonuç almıştır.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M. A., (2020). Fundamental Considerations for Finite Element Modelling of Rubber Material Tensile Test. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 5(2), 7–13.
- Akgül, H., (1986). Sızdırmazlık Elemanları. T.M.M.O.B. Makine Mühendisleri Odası, Yayın No:120, Bursa.
- Anonim, (2016). Keçe çalışma prensibi. <https://www.machinedesign.com/mechanical/3-factors-affecting-your-seals-life-span> (Erişim tarihi:18.11.2018)
- Anonim, (2018). Abaqus Script 2018, Dassault Systemes, Fransa
- Anonim, 2020. I-Sight 2020, Dassault Systemes, Fransa
- Aydoğan, M., (2013). Yapı Sistemlerinde Sonlu Elemanlar, İTÜ Ders Notu
- Azura, A.R., Leow, S.L., (2019). Effect of carbon black loading on mechanical, conductivity and ageing properties of Natural Rubber composites. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 17, pp. 1056–1063). Elsevier Ltd.
- Behrang S., (2013). Elastomerlerin Sayısal Yöntemlerle Analizi Ve Şekilsel Döküm Yöntemi İle Darbelere Dayanıklı Robot Geliştirilmesi
- Bhandari, A., Erdman, D., Bhatia, A., Strang, W., (2007). Finite Element Analysis and Material Modeling of Elastomeric Components and Assemblies: Some Practical Considerations. In *SAE Technical Papers* (Vol. 2007-January). SAE International
- Bien-aimé, L. K. M., Blaise, B. B., Beda, T., (2020). Characterization of hyperelastic deformation behavior of rubber-like materials. *SN Applied Sciences*, 2(4).
- Brink, R. V., Czernik, E., Horve, L. A., (1993). *Handbook of Fluid Sealing*, McGraw-Hill, New York
- Bulut, D., Temiz, V., Parlar, Z., (2015). The Effect of Interference on the Friction Torque Characteristics of TPU Based Rotary Lip Seals, *Tribology in Industry*
- Calonius, O., Pietola, M., (2005). Explicit Finite Element Analysis of Tracking Capability of Rotary Face Seal for Industrial Fluid Power Applications. *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, 2005(6), 328–333.
- Dalrymple, T., Choi, J., Miller, K., (2007). Elastomer rate-dependence: a testing and material modelling methodology.
- El Gadari, M., Fatu, A., Hajjam, M., (2015). Shaft roughness effect on elasto-hydrodynamic lubrication of rotary lip seals: Experimentation and numerical simulation. *Tribology International*, 88, 218–227.

- Engin, B., Saraç, Yazıcı, M., (2019). Finite element simulation of rotary shaft lip seals. *Acta Physica Polonica A*, 135(5), 1072–1074.
- Erkek, M., Kaya, N., Güven, C., (2015). Kauçuk Burçların Hiperelastik Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi . *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* , 20 (1) , 65-74 .
- Flitney, R., (2014). *Seals and Sealing Handbook*, Elsevier, Oxford, İngiltere, 648 pp.
- Freitas, T. R., (2009). Rubber sealing study applied to ball bearing components using finite element method. In *SAE Technical Papers*. SAE International.
- Frölich, D., Magyar, B., Sauer, B., (2014). A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals. *Wear*, 311(1–2), 71–80.
- Fujikawa, M., Maeda, N., Yamabe, J., Kodama, Y., Koishi, M., (2014). Determining Stress–Strain in Rubber with In-Plane Biaxial Tensile Tester. *Experimental Mechanics*, 54(9), 1639–1649.
- Güler, M.S., Şen, S., (2015). *Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler*. Ordu
- Horve, Les., (1996). *Shaft Seals For Dynamic Applications*, Marcel Decker, NewYork,
- Huri, D., Mankovits, T., (2018). Comparison of the material models in rubber finite element analysis. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 393). Institute of Physics Publishing.
- Ismail, R., Ibrahim, A., Rusop, M., Adnan, A., (2018). Determination of mechanical properties natural rubber compounds using double shear test pieces. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(8), 37–43.
- Johnston, D.E., Bond, R., (1984). A new concept in rotary shaft seal design suitable for truck and bus hub seal applications. *SAE Technical Papers*, 93(May), 1081–1091.
- Johnston, D.E., Vogt, R., (1995). Rotary shaft seal friction, the influence of design, material, oil and shaft surface. In *SAE Technical Papers*. SAE International.
- Kanzaki, Y., Kanno, T., Kawahara, Y., (1989). A study of blistering phenomenon on rubber seals.
- Kanzenbach, L., Schlomka, C., Gelke, S., & Ihlemann, J., (2019). Specimen design for extreme uniaxial tension-compression tests of rubber materials. *PAMM*, 19(1).
- Kasım, H., Engin, B., Saraç, Yazıcı, M., (2021). Finite Element Analysis of Energy Saving Type Rotary Shaft Seals. *Ejosat*, 21, 123-125.

- Keerthiwansa, R., Javorik, J., Kledrowetz, J., Nekoksa, P., (2018). Elastomer testing: The risk of using only uniaxial data for fitting the Mooney-Rivlin hyperelastic-material model. *Materiali in Tehnologije*, 52(1), 3–8.
- Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., Park, S. H., (2012). A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for Chloroprene rubber. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5), 759–764.
- Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., Park, S. H., (2012). A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for Chloroprene rubber. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5), 759–764.
- Kim, H.G., Jeon, S. I., (2008). Effect on friction of engine oil seal with engine oil viscosity. *International Journal of Automotive Technology*, 9(5), 601–606.
- Kuiken, J., (1996). “A New Radial Lip Seal Design Approach”, Technische Universiteit Eindhoven
- Kumar, N., Rao, V. V., (2016). Hyperelastic Mooney-Rivlin Model : Determination and Physical Interpretation of Material Constants. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, 6(1), 43–46.
- Li, H., Zhao, T., Chen, M., (2016). Green tire and new type rubber materials. *Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin*, 61(31), 3297–3303.
- Li, W., Mays, S., Lam, D., (2002). Material and finite element analysis of poly(tetrafluoroethylene) rotary seals. *Plastics, Rubber and Composites*, 31(8), 359–363.
- SAE (1996). *Fluid Sealing Handbook, Radial Lip Seals*, SAE
- Salant R.F., (1992). On The Sealing Mechanism Of Lip Seals Containing Microundulations. In: Nau B.S. (eds) *Fluid Sealing. Fluid Mechanics and its Applications*, vol 8. Springer, Dordrecht.
- Sasso, M., Palmieri, G., Chiappini, G., Amodio, D., 2008. Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods. *Polymer Testing*, 27(8), 995–1004.
- Shen, D., Salant, R. F., (2007). An unsteady mixed soft EHL model, with application to a rotary lip seal. *Tribology International*, 40(4), 646–651.
- Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., Mirzababaei, M., Nikraz, H., (2019). Interfacial shear strength of rubber-reinforced clays: A dimensional analysis perspective. *Geosynthetics International*, 26(2), 164–183.

Starostin, N.P., Vasileva, M.A., (2020). Determination of Load-Speed Modes for Fluoroplastic Seals of Rotary Shaft by Temperature Limitation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 459(6).

Tasora, A., Prati, T., (2012). A Method For The Characterization Of Static Elastomeric Lip Seal Deformation, Tribology International, Parma, Italy

Temiz, V., Bulut, D., (2015). Poliüretandan Yapılmış Dönel Sızdırmazlık Elamanlarının Sürtünme Karakteristiğine Radyal Ön Gerilmenin Etkisi “,(yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı, İstanbul.

Temiz, V., Kerküklü, Y., (2008). “Dönel sızdırmazlık elemanlarının performansına yüzey pürüzlülüğünün etkileri”, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı, İstanbul.

Temiz, V., Özperk H., (2009). “Dönel sızdırmazlık elemanlarında sürtünme momentinin deneysel tayini”, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı, İstanbul.

Tok, G., Parlar, Z., Temiz V., (2018). “Numerical Investigation of the Effect of Radial Lip Seal Geometry on Sealing Performance”, Materials Science and Engineering, doi:10.1088/1757-899X/295/1/012003

Treloar, L.G., (2005). The Physics of Rubber Elasticity. 3rd Edition, Oxford University Press, Glasgow

Türkay, M., (2019). Optimizasyon Modelleri Ve Çözüm Metodları

Türkel, A.K., (2016). Keçe Tipleri. <http://www.skt.com.tr/kece-kodlama-ve-genel-tip-tanimi> (Erişim tarihi:29.12.2018)

Türkel, A.K., (2016). SKT Sealing Handbook, SKT, Bursa, Türkiye, 104 Üniversitesi Bil. Tek. Dergisi, 56-66

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

Xu, D., Han, B. H., He, W. H., Cheng, Z. G., (2018). Research on compressive mechanical properties of metal rubber and its constitutive relation model. Journal of Vibroengineering, 20(1), 332–344.

Xue-Guan Song, Lin Wang, Young-Chul Park (2009). “Analysis And Optimization Of Nitrile Butadiene Rubber Sealing Mechanism Of Ball Valve”, Dong-A University, Korea
Yakovlev, S.N., (2019). An Experimental Study of the Wear of the Radial Shaft Seals of Rotary Shafts. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 48(2), 179–183.

Yang, Y., Ren, Z. Y., Bai, H., Shen, D., Zhang, B., (2020). Study on the Mechanical Properties of Metal Rubber Inner Core of O-Type Seal with Large Ring-to-Diameter Ratio. *Advances in Materials Science and Engineering*

Z. Nowak, (2008). “Constitutive Modelling And Parameter Identification For Rubber-Like Materials”, Polish Academy of Sciences, Poland

Zhang, F. Y., Chen, J. L., Li, T. T., Zhang, Y. F., (2019). Study and Optimization of Structural Parameters of Oil Seal by Response Surface Method. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(2), 255–265.

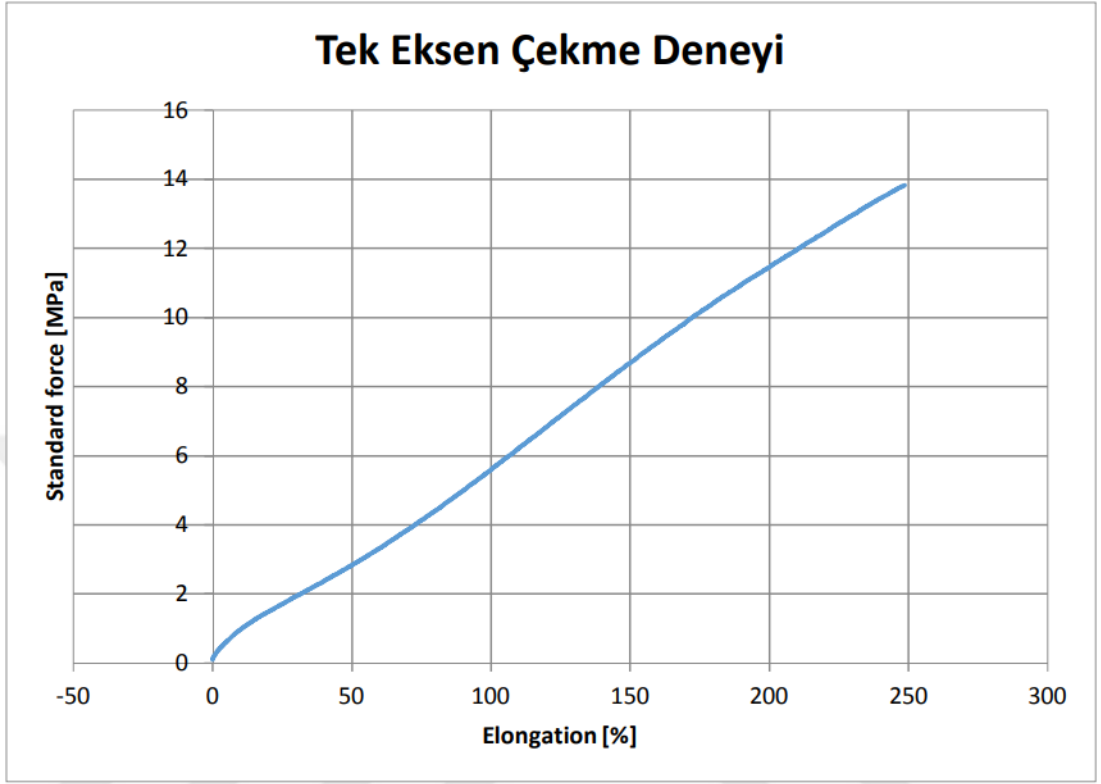
Zhou, S. M., Chen, P., Shi, Y., (2015). Analysis on Sealing Performance for a New Type of Rubber Saddle-shaped Sealing Ring Based on AQAQUS. In *Procedia Engineering* (Vol. 130, pp. 1000–1009). Elsevier Ltd.

Zhou, Y., Huang, Z., Tan, L., Ma, Y., Qiu, C., Zhang, F., Yuan, Y., Sun, C., Guo, L., (2014). Cone bit bearing seal failure analysis based on the finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*, 45, 292–299.

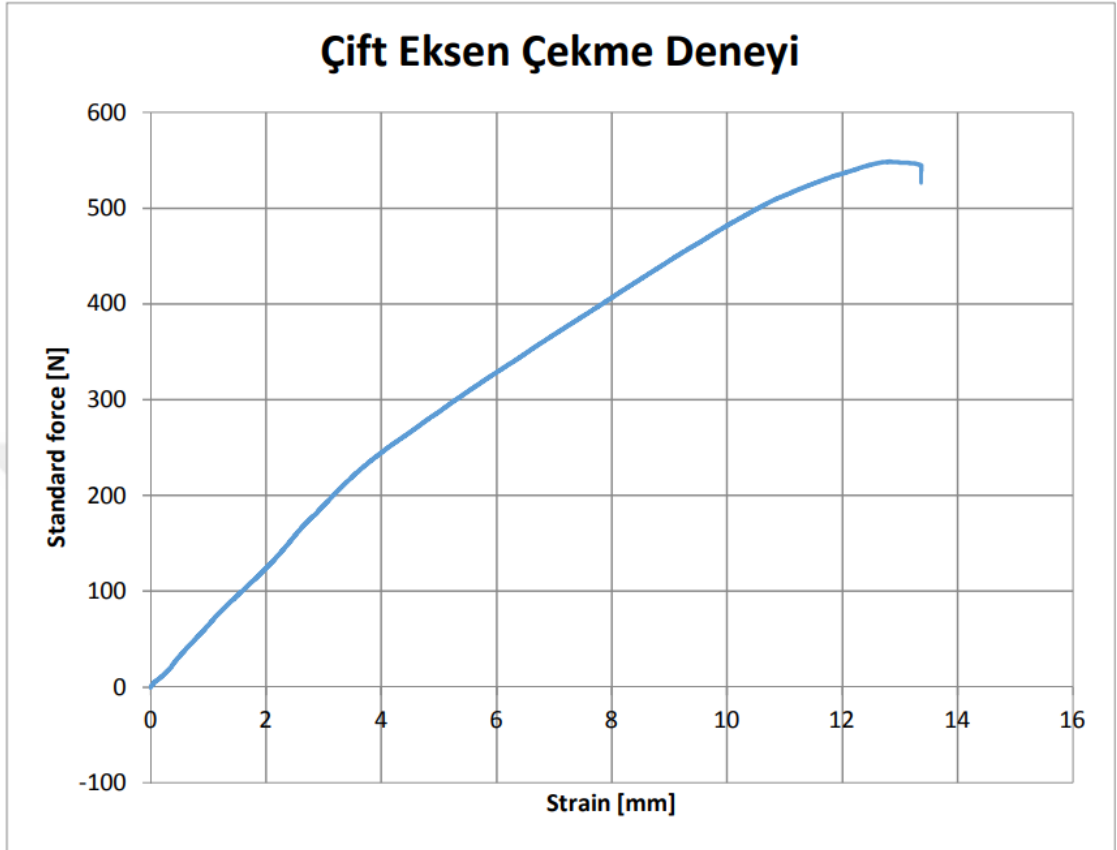
EKLER

EK 1	Tezin İçeriği, Başlık Düzeni ve Numaralama Sistemi
EK 2	Dış Kapak (Yüksek Lisans Tez Kapağı)
EK 3	Dış Kapak (Doktora Tez Kapağı)
EK 4	Dış Kapaktan Sonraki Sayfa
EK 5	İ Kapak
EK 6	Tez Onay Sayfası
EK 7	Bilimsel Etik Bildirim Sayfası
EK 8	zet
EK 9	Abstract
EK 10	nsz ve/veya Teşekkür
EK 11	İçindekiler Dizini
EK 12	Simgeler ve Kısaltmalar Dizini
EK 13	şekiller Dizini
EK 14	izelgeler Dizini
EK 15	Kaynaklar Dizini
EK 16	Tek Eksen ekme Deneyi (Optimize FKM)
EK 17	ift Eksen ekme Deneyi (Optimize FKM)
EK 18	Basma Deneyi (Optimize FKM)
EK 19	Safi Kayma Deneyi (Optimize FKM)
EK 20	zgemiş

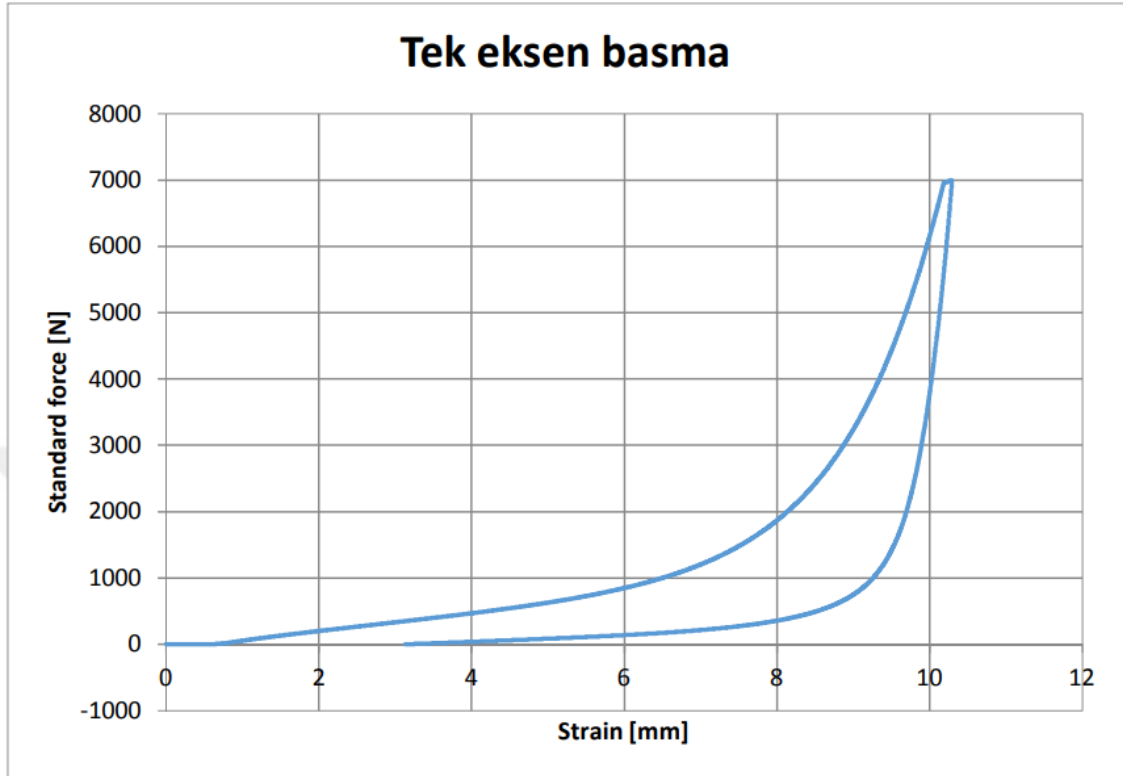
EK 16 Tek Eksen Çekme Deneyi (Optimize FKM)



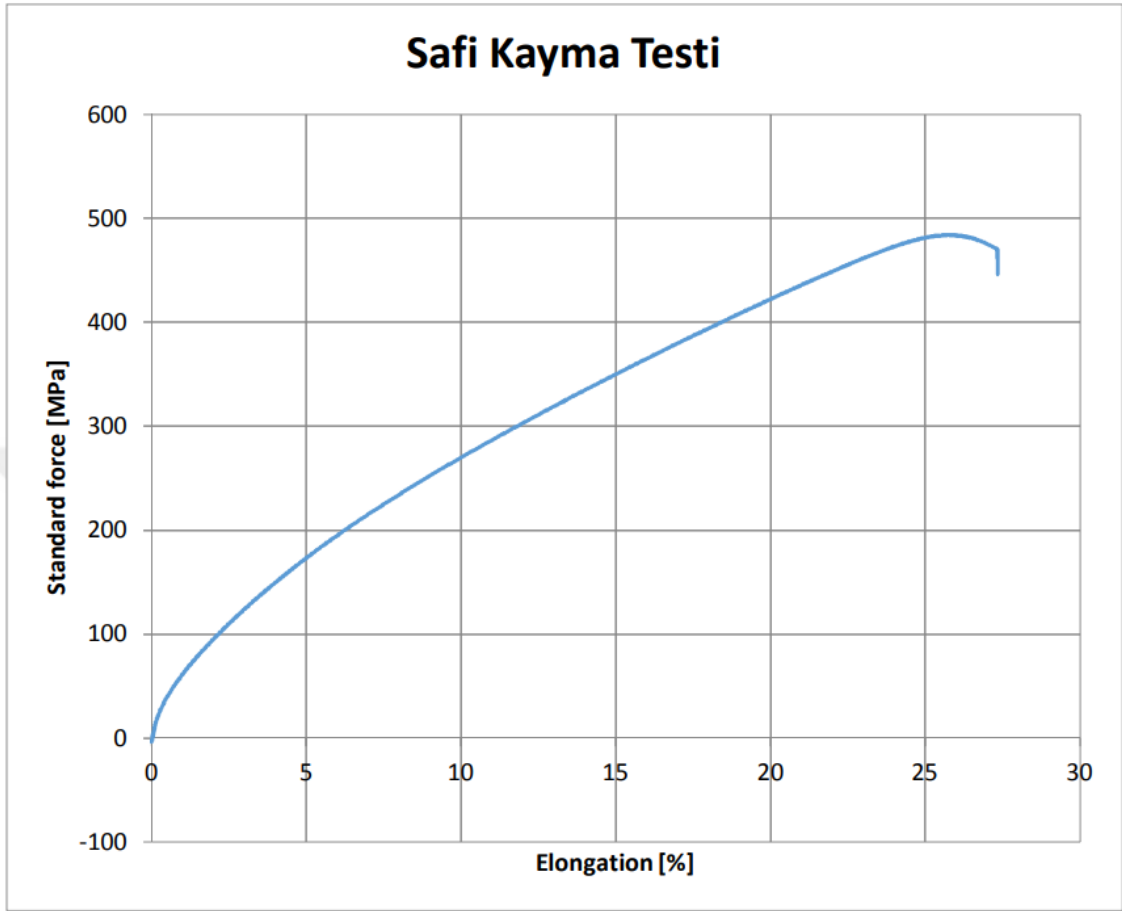
EK 17 Çift Eksen Çekme Deneyi (Optimize FKM)



EK 18 Basma Deneyi (Optimize FKM)



EK 19 Safi Kayma Deneyi (Optimize FKM)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : BARIŞ ENGİN
Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA – 28.05.1988
Yabancı Dil : İNGİLİZCE - İTALYANCA

Eğitim Durumu

Lise : BURSA ATATÜRK LİSESİ
Lisans : BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ – MAKİNE MÜH.
Yüksek Lisans : BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ – MAKİNE MÜH.

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : SKT YEDEK PARÇA VE MAKİNE SANAYİ A.Ş.

İletişim (e-posta) : barisengin039@gmail.com

Yayımları :

- Kasım, H., Aldeen, A.N., Onat, A., Engin, B.,Yazıcı, M., Investigation of the Crack Propagation in the Graphene/Synthetic Rubber Nanocomposite Materials with DIC Technique. Periodica Polytechnica Chemical Engineering, Vol 66,P192-204.
- Kasım, H., Saraç, İ., Engin, B.,Yazıcı, M., Investigation of Energy Saving Rotary Shaft Seals by Finite ElementAnalysis, EJOSAT, Vol 27,P325-333.
- Kasım, H., Saraç, İ., Engin, B., Effect of Seal Friction on The Efficiency of Drive Axles of Heavy DutyVehicles, EJOSAT, Vol 31, P655-660.
- Engin, B., Saraç, İ.,Yazıcı, M., Finite Element Simulation of Rotary Shaft Lip Seals, Acta Physica Polonica Series A, Vol 135,P1072-1076.
- Kasım, H., Onat,A., Saraç, İ., Engin, B., Investigation of friction and wear behavior of hydroxyl-functionalized graphene nanoplatelets filled elastomer nanocomposites, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol I-13,P 105-119.
- Güler,B., Saraç,İ.,Engin,B.,Yazıcı M., Study on Tribological and Mechanical Behaviour of The Recycled PTFE/PTFE Composites, 1st International Symposium on Light Alloys and Composite,2018.

- Yazıcı, M., Aldeen, A.N., Kasım, H., Engin, B., Investigation of the Crack Propagation in the Graphene/Elastomer Nanocomposite Materials with DIC Technique, 13th Fall Rubber Colloquium, 2018.