



**KAUÇUK ESASLI RULMAN SIZDIRMAZLIK KAPAKLARININ
SIKILIKLARININ RULMAN PERFORMANSINA ETKİSİNİN TEORİK VE
DENEYSEL ANALİZİ**

Kağan SARIGÖZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2018

Kağan SARIGÖZ tarafından hazırlanan “KAUÇUK ESASLI RULMAN SIZDIRMAZLIK KAPAKLARININ SIKILIKLARININ RULMAN PERFORMANSINA ETKİSİNİN TEORİK VE DENEYSEL ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 05/01/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kağan SARIGÖZ

05/01/2018

KAUÇUK ESASLI RULMAN SIZDIRMAZLIK KAPAKLARININ SIKILIKLARININ RULMAN PERFORMANSINA ETKİSİNİN TEORİK VE DENEYSEL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kağan SARIGÖZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2018

ÖZET

Bu çalışmada rulman sızdırmazlık kapaklarının sıklık değerinin, rulman performansına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma için dört farklı kapak sıklığında rulman numuneleri özel olarak üretilmiştir. Ayrıca temassız kapaklı rulmanlarda testlerde kullanılmıştır. Testlerde kullanılan rulmanların kapak sıklıkları sırasıyla; 200 μm , 160 μm , 105 μm , 45 μm , temassız olacak şekilde üretilmiştir. Bu numunelerle sürtünme momenti testi ve sıcaklık testi yapılmıştır. Sürtünme momenti testinde rulmanlara yük uygulanmamıştır ve rulmanlar 3000 rpm devirde 1 saat boyunca döndürülmüştür. Test süresince rulmanların sıcaklık değerleri ve dönmeye karşı rulman içinde oluşan sürtünme dirençleri moment olarak ölçülmüştür. Sıcaklık testinde ise rulmanlar 2000 N radyal yük altında, 6000 rpm devirde 1 saat süresince döndürülmüştür. Yapılan bu iki test sonucuna göre kapak sıklığı arttıkça rulman içerisinde dönmeye karşı oluşan direncin arttığı tespit edilmiştir. Fakat yüksüz ve yük altında yapılan bu testlerin sonuçları arasında belirgin farklar vardır. Yüksüz olan test sonuçlarında kapak sıklığına göre rulman sürtünme momenti neredeyse düzgün doğrusal bir biçimde artmaktadır. Buna karşı 2000 N yük altında ve gresle yağlama metodu kullanılan sıcaklık testinde 105 μm kapak sıklığından sonra rulman sıcaklıklarında belirgin artışlar tespit edilememiştir. Ayrıca yük altında yapılan rulman gruplarının test sonuçlarındaki değişkenlik yüksüz yapılan testlere göre çok daha fazladır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı kapak sıklığındaki kapak modelleri oluşturulmuştur. Rulman lastik kapağının iç dudağıyla rulman iç bileziğinin temas halinde olan bölümündeki kontak tepki kuvvetleri statik olarak sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar ile yapılan test sonuçları arasındaki ilişkide değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 91419

Anahtar Kelimeler : Bilyalı rulman, kauçuk sızdırmazlık elemanı, sürtünme momenti

Sayfa Adedi : 117

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RUBBER SEAL
INTERFERENCE EFFECT ON BALL BEARING PERFORMANCE

(M. Sc. Thesis)

Kağan SARIGÖZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2018

ABSTRACT

Effect of ball bearing seal interference value on bearing performance was investigated experimentally and numerically in this study. Four different seal interference ball bearing samples were manufactured specifically for experimental study. Also bearings with contactless shields were used in experimental study. The bearing seal interferences which are used in tests are given respectively; 200 μm , 160 μm , 105 μm , 45 μm , contactless. Friction torque test and temperature test were performed with these bearing samples in this study. Friction torque test was performed without loading and bearings were rotated at 3000 rpm for one hour. Bearings temperature values and friction generation in bearings against rotation were measured throughout the tests. Bearings were rotated at 6000 rpm for one hour and 2000 N radial load was applied in temperature test. According to these two test results, it has been found that as the seal interference increases, resistance to rotation in the bearing increases. However, there were significant differences between tests performed with loading and without loading conditions. Bearing frictional torque increases almost linearly with seal interference values in unloaded test results. In spite of this, any significant temperature increase was not noted after 105 μm seal interference value in temperature tests which performed with 2000 N radial load. Moreover, variation in test results of loaded bearings were far more than unloaded bearings. Bearing seals which have four different seal interferences were modeled by using finite element method. The contact reaction force between the region of inner ring and rubber seal inner lip was calculated statically by means of finite element method. The relationship between numerical results obtained from this calculation and friction moment test results were also evaluated.

Science Code : 91419
Key Words : Ball bearing, rubber seal, friction torque
Page Number : 117
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmamın gerçekleşmesinde değerli bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmem sırasında bana destek ve yardımcı olan Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ő. Mamul Dizayn ve Uygulama Müdürü Sayın Tahir YILDIRIM'a, Otomotiv Uygulamaları Şefi Sayın Bilal DEMİR'e, Test Kıdemli Mühendisi Sayın İbrahim TEMİZBAŐ'a ve Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ő. ailesine teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca benden yardımlarını hiç esirgemeyen, zor zamanlarımda hep yanımda olan aileme ve eşime çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. RULMAN TİPLERİ VE RULMAN BİLEŞENLERİ.....	5
2.1. Rulmanların Sınıflandırması	6
2.1.1. Tek ve çift sıra bilyalı rulmanlar	8
2.1.2. Oynak bilyalı rulmanlar	9
2.1.3. Açısal temaslı bilyalı rulmanlar	9
2.1.4. Silindirik makaralı rulmanlar	10
2.1.5. Konik makaralı rulmanlar	11
2.1.6. Oynak makaralı rulmanlar	11
2.2. Rulman Bileşenleri.....	12
2.2.1. Kafes	13
2.2.2. Kapak	14
2.2.3. Yuvarlanma yolu elemanları	18
2.2.4. Yağlayıcılar	18

3. RULMANLARDA ELASTOMER KAPAK KULLANIMI VE ELASTOMER MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ	21
3.1. Elastomer Malzeme ve Özellikleri	22
3.1.1. Kauçuk elastomer malzeme özellikleri	25
3.1.2. Sıcaklığın elastomerlere etkisi	26
3.2. Kauçuk Malzeme Çeşitleri	30
3.2.1. Doğal kauçuk (NR)	31
3.2.2. Nitril bütadien kauçuk (NBR)	32
3.2.3. Hidrojen akronitril bütadien kauçuk (HNBR).....	33
3.2.4. Poliakrilik kauçukları (ACM)	33
3.2.5. Floro karbon kauçuk (FKM)	35
4. KAPAK SIKILIĞININ RULMAN SÜRTÜNMESİNE ETKİSİ	39
4.1. Rulmanlarda Sürtünme ve Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler	39
4.1.1. Bilyalı rulman sürtünme momenti modeli (Palmgren metodu)	42
4.2. 6008 Rulmanın Farklı Kapak Sıkılıklarında Sürtünme Momentinin İncelenmesi.....	44
4.3. Sürtünme Momenti Test Düzenegi	46
4.4. Test Numunelerinin Hazırlanması	48
4.5. Sürtünme Momenti Testi Koşulları.....	51
4.6. Sürtünme Momenti Testi Sonuçları	53
4.6.1. Sürtünme momenti testi esnasında ölçülen sıcaklık verileri sonuçları	57
4.7. Sıcaklık Testi ve Sonuçların Teorik Olarak Rulman Ömrüne Olan Etkisi	62
4.7.1. Sıcaklık testi sonuçları	64
4.8. Rulman Ömrü Teorik Hesabı	69
4.8.1. Geliştirilmiş rulman ömrü	71

4.8.2. Sıcaklık testi sonucuna göre 6008 rulmanının ömür hesabı	78
5. FARKLI KAPAK SIKILIĞINDA RULMAN KAPAKLARININ KONTAK KUVVETLERİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ	83
5.1. Kauçuk Kapakların Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi.....	83
5.1.1. Lineer olmayan (non-linear) malzeme özelliği	83
5.1.2. Lineer olmayan geometri	84
5.1.3. Lineer olmayan kontak özellikleri	85
5.2. Hiperelastik Malzeme Modeli	85
5.2.1. Kauçuk esaslı malzemelerin hiperelastik davranışı	86
5.2.2. Temel hiperelastik malzeme modelleri	88
5.3. Kauçuk Esaslı Malzemelerin Gerilim-Birim Şekil Değişimi Davranışını Belirlemek İçin Yapılan Mekanik Testler.....	92
5.3.1. Tek eksenli çekme testi	92
5.3.2. İki eksenli çekme deneyi	94
5.3.3. Tek eksenli basma testi	94
5.3.4. Safi kayma testi (Pure shear).....	95
5.4. ANSYS Programında Hiperelastik Malzeme Modelleri	96
5.4.1. Ansys workbench programında eğri uydurma (curve-fitting) metodu ile hiperelastik malzeme katsayılarının çıkarılması	98
5.5. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	100
5.5.1. Uygun ağ yapısının (mesh) oluşturulması.....	102
5.5.2. Kontak ayarlarının tanıtılması.....	103
5.6. Analiz Sonuçları	104
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	109
KAYNAKLAR	113

ÖZGEÇMİŞ 117



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Farklı elastomer malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları	27
Çizelge 3.2. Farklı kauçuk malzemelerinin maksimum çalışma sıcaklıkları.....	29
Çizelge 3.3. Kauçuk malzeme çeşitleri.....	30
Çizelge 3.4. Akrilonitril yüzdesinin elastomer malzeme özelliklerine etkisi	32
Çizelge 4.1. Rulman tiplerine göre f_1 değeri hesabı yapmak için gerekli olan katsayılar	42
Çizelge 4.2. Rulman tipi ve yağlama metotlarına göre f_0 değerleri.....	43
Çizelge 4.3. Farklı kapak sıklığındaki test rulmanlarının ölçülen kapak sıklıkları	50
Çizelge 4.4. Sürtünme momenti testinde kullanılan rulmanların özellikleri	51
Çizelge 4.5. Sürtünme momenti testi koşulları.....	52
Çizelge 4.6. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi sonuçları .	56
Çizelge 4.7. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık sonuçları	61
Çizelge 4.8. Sıcaklık testinde kullanılan rulmanların özellikleri	62
Çizelge 4.9. Sıcaklık testi koşulları	63
Çizelge 4.10. Sıcaklık testi sonuçları	67
Çizelge 4.11. Rulmanların kirlilik seviyesine göre e_c katsayısının belirlenmesi	75
Çizelge 4.12. Sıcaklık testi sonuçlarına göre ortalama ve maksimum rulman sıcaklıklarına göre geliştirilmiş rulman ömrü değerleri	80
Çizelge 5.1. Örnek bir tek eksenli çekme testi sonucunda oluşturulan hiperelastik malzeme modeli hata oranları.....	99
Çizelge 5.2. Ağ yapısı (mesh) hassasiyet çalışması	102
Çizelge 5.3. Ağ yapısı (mesh) hassasiyet çalışmasına göre analiz sonuçları	102
Çizelge 5.4. Farklı kapak sıklıklarına göre kapak iç dudağı ile rulman iç bileziği arasındaki kontak kuvveti FEA sonuçları.....	105
Çizelge 5.5. FEA sonuçları ve test sonuçlarının oranlanarak kıyaslanması	106

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Poyra rulmanında sürtünme torku oluşturan faktörlerin dağılım yüzdesi	2
Şekil 2.1. Tek sıralı sabit bilyalı rulman kesit görünüşü ve temel elemanları	5
Şekil 2.2. Tek sıralı sabit bilyalı rulman görünümü ve komponentlerinin gösterimi.....	6
Şekil 2.3. Rulmanlı yatakların sınıflandırılması	6
Şekil 2.4. Rulmanlarda kullanılan yuvarlanma elemanı örnekleri.....	7
Şekil 2.5. Rulmanlara gelen yüklerin gösterimi	7
Şekil 2.6. Rulman bileşenlerinin isimlendirilmesi.....	12
Şekil 2.7. ORS firmasında kullanılan rulman kapak dizayn örnekleri	16
Şekil 2.8. SKF firmasında kullanılan örnek kapak dizaynları	17
Şekil 3.1. Malzemelerin genel sınıflandırması ve elastomer malzeme çeşitleri	23
Şekil 3.2. Elastomer malzemelerin diğer mühendislik malzemeleri ile gerilme-gerinim özelliklerinin kıyaslanması.....	24
Şekil 3.3. Polimerlerin üç fiziksel durumu için çekme gerilim-gerinim diyagramı	25
Şekil 3.4. Elastomer malzemelerin çalışma sıcaklıklarında ASTM#3 yağı içerisinde hacimsel kabarma yüzdeleri	37
Şekil 4.1. Radyal temaslı kapak tasarımının sıkılık gösterimi.....	49
Şekil 4.2. Testlerde kullanılan farklı kapak sıkılıklarının gösterimi.....	50
Şekil 4.3. 200 µm kapak sıkılığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği	53
Şekil 4.4. 160 µm kapak sıkılığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği.....	54
Şekil 4.5. 105 µm kapak sıkılığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği.....	54
Şekil 4.6. 45 µm kapak sıkılığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği	55
Şekil 4.7. Temassız kapaklı rulmanların sürtünme momenti grafiği	55
Şekil 4.8. Farklı kapak sıkılığındaki rulmanların ortalama sürtünme momenti grafiği...	56
Şekil 4.9. Farklı kapak sıkılığındaki rulmanların ortalama sürtünme momenti sonuçları	57

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği	58
Şekil 4.11. 160 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği	58
Şekil 4.12. 105 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği	59
Şekil 4.13. 45 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği.....	59
Şekil 4.14. Temassız kapaklı rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği...	60
Şekil 4.15. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi ortalama sıcaklık grafiği.....	60
Şekil 4.16. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi ortalama sıcaklık sonuçları.....	61
Şekil 4.17. 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği.....	64
Şekil 4.18. 160 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği...	64
Şekil 4.19. 105 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği...	65
Şekil 4.20. 45 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği....	65
Şekil 4.21. Temassız kapaklı rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği.....	66
Şekil 4.22. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık testi ortalama sıcaklık grafiği.....	66
Şekil 4.23. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık testi ortalama sıcaklık değerleri.....	67
Şekil 4.24. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık testi maksimum sıcaklık değeri sonuçları.....	68
Şekil 4.25. a_{150} katsayısının σ_u/σ değerine göre değişimi grafiği	73
Şekil 4.26. Kinematik referans viskozite (v_1) belirlenmesi	77
Şekil 4.27. a_{150} katsayısının belirlenmesi	78
Şekil 4.28. 6008 rulmanı sıcaklık-ömür ilişkisi grafiği (ISO 281 standardına göre)	79
Şekil 4.29. Kapak sıklık değerlerine göre 6008 rulman ömrü değişimi.....	80

Şekil	Sayfa
Şekil 4.30. Kapak sıklık değerlerine göre (maksimum sıcaklıklara göre) 6008 rulmanı ömrü değişimi.....	81
Şekil 5.1. Çelik ve kauçuk malzemenin gerilim-gerinim grafiklerinin kıyaslanması...	84
Şekil 5.2. Lineer ve lineer olmayan geometri karşılaştırması	84
Şekil 5.3. Hiperelastik malzeme gerilim-gerinim grafiği	87
Şekil 5.4. Kauçuk türü malzemeler için önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonlarının sınıflandırılması	88
Şekil 5.5. Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler	92
Şekil 5.6. Tek eksenli çekme testi papyon numunesi	93
Şekil 5.7. Kauçuk malzeme testleri numuneleri	96
Şekil 5.8. Üç farklı deformasyon tipinde örnek bir kauçuk malzeme gerilim-gerinim grafiği	97
Şekil 5.9. Eğri uydurma metodu ile test verilerinin değerlendirilmesi	98
Şekil 5.10. 160 µm kapak sıklığı için oluşturulan geometri	101
Şekil 5.11. 45 µm sıklıktaki kapak için oluşturulan ağ yapısının görünümü	103
Şekil 5.12. 160 µm kapak sıklığı için montaj halinde kapak iç dudak gerilme dağılımı ve montaj öncesi konum	103
Şekil 5.13. Farklı kapak sıklıklarındaki elastomer kapakların iç dudaklarındaki eşdeğer gerilme dağılımları	104
Şekil 5.14. 200 µm kapak sıklığındaki toplam kontak tepki kuvvetinin gösterilişi.....	105
Şekil 5.15. Farklı kapak sıklıklarına göre kapak iç dudağı ile rulman iç bileziği arasındaki toplam kontak kuvvetinin değişim grafiği.....	106
Şekil 5.16. Sürtünme testi sonuçları ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının birimsizleştirilerek birbirine oranlanarak kıyaslanması.....	107

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tek ve çift sıralı bilyalı rulman	8
Resim 2.2. Oynak bilyalı rulman.....	9
Resim 2.3. Açısal temaslı bilyalı rulman ve farklı açısal temasların gösterimi.....	9
Resim 2.4. Tek ve çift sıralı silindirik makaralı rulman	10
Resim 2.5. Konik makaralı rulman.....	11
Resim 2.6. Perçin bağlantılı sac kafes.....	13
Resim 2.7. Plastik kafes örnekleri.....	13
Resim 2.8. Kapaklı ve açık rulmanlar.....	14
Resim 4.1. Rulman ömrünü ve performansını doğrudan etkileyen bileşenler.....	40
Resim 4.2. Testlerde kullanılan NBR kapaklı ve kapaksız (açık) 6008 rulmanı.....	44
Resim 4.3. Puntasız taşlama tezgahında iç bileziklerin omuz taşlama işlemi	45
Resim 4.4. Sürtünme momenti test düzeneği	46
Resim 4.5. İç bilezik omuz çapı ölçümü	48
Resim 4.6. Lastik kapak iç çap ölçümü.....	48
Resim 4.7. 6008 iç bilezik taşlanmış omuz yüzeyi	49
Resim 5.1. Taşıt kapısının lastik fitilinin kapının açılıp kapanmasına göre şekil değişimi ile alakalı yapılan analizi.....	85
Resim 5.2. Tek eksenli çekme testi tezgahı	93
Resim 5.3. İki eksenli çekme testi	94
Resim 5.4. İki eksenli çekme testi düzeneği.....	94
Resim 5.5. Tek eksenli basma testi.....	95
Resim 5.6. Safi kayma testi.....	95
Resim 5.7. ANSYS Workbench programında deneysel gerilme-gerinim verisi tanımlama bölümü	96

Resim**Sayfa**

Resim 5.8. ANSYS Workbench programında hiperelastik malzeme modelleri 97



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
°C	Santigrat derece
F_a	Eksenel kuvvet
F_r	Radyal kuvvet
Hz	Hertz
mm	Milimetre
mm^2/s	Viskozite birimi
MPa	Megapascal
N	Newton
Nm	Newton metre
Nmm	Newton milimetre
phr	Kauçuk içindeki maddelerin oranını ifade eden birim
rpm	Bir dakikadaki devir sayısı
s	Saniye
°	Derece
μm	Mikrometre
Kısaltmalar	Açıklamalar
ACM	Poliakrilik kauçuk
ACN	Akrilonitril
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
CNC	Bilgisayar Sayımlı Yönetim (Computer Numerical Control)
CR	Polikloropren
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

EP	Aşırı Basınç (Extreme Pressure)
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)
FKM	Florokarbon Kauçuk
GF	Cam elyafı (Glass fiber)
HNBR	Hidrojen Akronitril Bütadien Kauçuk
IRHD	Uluslararası Kauçuk Sertliği Derecesi
ISO	Uluslararası Standartlaştırma Organizasyonu
NBR	Nitril Bütadien Kauçuk
NDNN	Süper Nitril Kauçuk
NR	Doğal Kauçuk
PA	Poliamid
TS	Türk Standartları

1. GİRİŞ

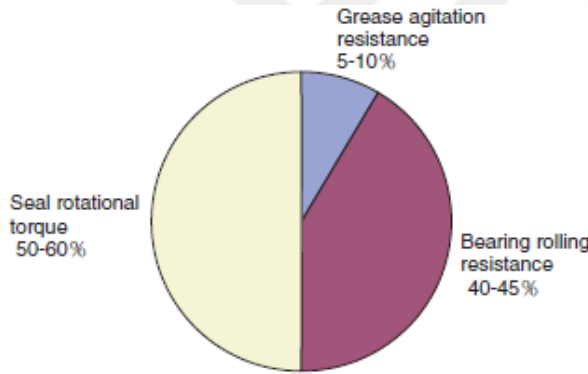
Rulmanın temel görevi, aralarında rölatif dönme hareketi olan iki eleman arasında sürtünmeyi minimuma indirmek ve sorunsuz yük aktarımını sağlamaktır. Rulmanlı yataklar, günlük hayatta kullandığımız araç ve ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomobil şaftı, aksı, aktarım organı olan dişli kutusu, direksiyon sistemi, debriyajı, kam mili yatakları, alternatörü, motosiklet gibi iki tekerli vasıtalar, gaz türbinleri, takım tezgahları, endüstriyel araçlar, çamaşır makineleri, pompalar, vantilatörler, endüstriyel elektrik motorları, elektrikli süpürgeler, tarım makineleri gibi hayatımızı kolaylaştıran ve yoğun olarak kullandığımız çoğu araç ve üründe rulmanlar kullanılmaktadır [1].

Rulmanlar sürtünmeyi azaltmak amacıyla geliştirilen makine elemanlarıdır fakat sürtünmeyi tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Genel olarak rulmandaki sürtünme kaybı, rulmanın dönmesi için gerekli olan tork (moment) olarak tanımlanabilir. Standart bir binek otomobilde 100 adet civarında rulman kullanılmaktadır. Bu rulmanlarda sürtünmeyi azaltmak, otomobilde yakıt tüketiminde azalmaya neden olacaktır [2]. Yakıt tüketimindeki azalma; enerji tasarrufu sağlayacaktır ve otomobillerde CO₂ salınımı azaltarak çevreye daha az zarar verecektir. CO₂ salımı düzenlemeleri sebebiyle otomotiv sektöründe yakıt tüketimini azaltıcı gelişmeler gün geçtikçe acil ihtiyaç haline gelmiştir [3]. Rulmanlarda sürtünme kaybını azaltmak amacıyla üç farklı temel metot önlem olarak alınabilir. Birinci olarak; rulmanın temel boyutlarını değiştirmeden rulman dizaynını değiştirerek sürtünmeyi azaltmayı amaçlamaktır. İkincisi; rulman boyutlarını mümkünse küçülterek, bu sayede sürtünmeyi ve ağırlığı azaltmaktır. Üçüncü metot ise ağırlaşan yağlama koşullarında sürtünme kaybını azaltabilecek yağlayıcı tipi, miktarı ve tekniği kullanmaktır [2].

Rulmanın kullanıldığı yerde maruz kaldığı yük ve yükün rulmana geliş yönü, ortam koşulları, sıcaklık, devir sayısı gibi başlıca değişkenler rulman performansını en çok etkileyen değişkenlerdir. Rulman sıcaklığının artmasındaki en önemli değişkenler, rulmana gelen yükün ve rulmanın dönme hızının yüksek olmasıdır. Rulman dizaynı yapılırken rulmanın çalışacağı yük ve ortam koşulları düşünülerek rulman sürtünmesini azaltmak amacıyla farklı dizayn değişiklikleri yapılabilir.

Bu değişikliklerden bazıları; rulman bileziklerinin yuvarlanma yolu radüslerinin büyütülmesi, rulmanda kullanılacak yuvarlanma elemanı sayısının mümkünse azaltılması, bilezik yüzeylerine özel kaplamaların yapılması, rulmanlarda kullanılan elastomer kapakların kapak sıklılığının azaltılması, temassız kapakların kullanılması, sac kafes yerine plastik kafeslerin kullanılması, sürtünme değeri düşük olan yağlayıcıların kullanılması gibi bir çok dizayn kararı alınabilir. Rulmanlar kullanılacakları yerde; konstrüksiyon sınırları, ortam koşulları, rulmanın maruz kalacağı yükler, rulman çalışma sıcaklığı, maksimum ve minimum sıcaklık, devri gibi değişkenler göz önünde bulundurularak dizayn edilirler.

Rulmanların dönmesi sebebiyle rulman elemanlarının oluşturduğu sürtünmenin büyük bir payı, rulman eğer temaslı elastomer kapaklı ise bu kapağa aittir. Rulman sızdırmazlık kapakları genel olarak rulman içine yabancı partikül girmesini engellemek ve rulman içindeki yağlayıcı gresin dışarı sızmasını önlemek amacıyla kullanılır [3].



Şekil 1.1. Poyra rulmanında sürtünme torku oluşturan faktörlerin dağılım yüzdesi [3]

Yukarıdaki Şekil 1.1'de görüldüğü üzere poyra rulmanında oluşan sürtünme torkunun yaklaşık olarak %50-60 kadarı rulman sızdırmazlık kapağına ait olduğu, %40-45'inin yuvarlanma direncinden, %5-10 kadarının ise gres çalkalanmasından dolayı oluştugu tespit edilmiştir. Bu veriden anlaşılacağı üzere rulman sürtünmesinin büyük payı rulman kapaklarına aittir. JTEKT, düşük sürtünme torkuna sahip sızdırmazlık kapağı tasarımı yaparak, poyra ünitesinin toplamda sürtünme torkunu %40 azalttıklarını belirtmişlerdir [3].

Elastomer kapaklı rulmanlarda rulman üreticilerinin kataloglarında belirttiği üzere; rulman sürtünmesinin yaklaşık olarak %60-65'i bu elastomer kapakların rulman bileziğine teması sebebiyle oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı kapak kullanımı ve dizaynı rulman performansı için önemli bir dizayn parametresidir.

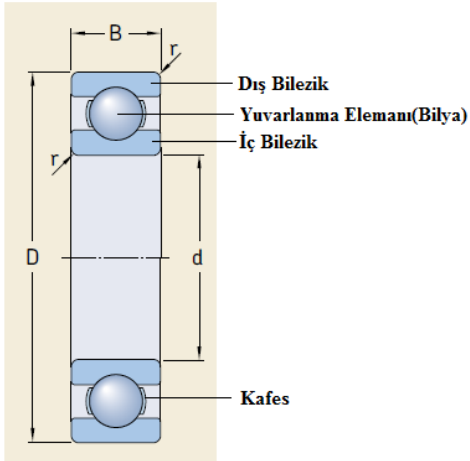
Bu tez çalışmasında farklı kapak sıklığında rulman numuneleri özel olarak üretilmiş, bu rulmanlar sürtünme momenti ve sıcaklık testlerine alınmıştır. Testler sonucunda kapak sıklığı parametresinin rulman performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca farklı kapak sıklığındaki elastomer kapaklar sonlu elemanlar programında modellenerek, kapak montajı sonrasında oluşan tepki kuvvetleri belirlenmiştir. Belirlenen tepki kuvvetleri ve yapılan testler arasındaki bağıntı incelenmiştir.





2. RULMAN TIPLERİ VE RULMAN BİLEŞENLERİ

Rulmanın temel görevi, aralarında rölatif dönme hareketi olan iki eleman arasında sürtünmeyi minimuma indirmek ve sorunsuz yük aktarımını sağlamaktır. Rulman dönen her mekanizmanın elemanıdır. Mükemmel bir rulman mükemmel bir mekanizma yaratır. Redüktör, vantilatör ve pompalarda, takım tezgahları millerinde, otomobil şaftı, aks, dişli kutusu, kayış gergi sistemi, alternatörde, direksiyon sistemlerinde, su pompası, her çeşit endüstriyel elektrik motorunda, çamaşır makinesi ve elektrikli süpürgelerinde, tarım makinelerinde, ağır iş makinelerinde, rüzgar türbinlerinde, gaz türbinlerinde kısacası dönen her türlü mekanizmada rulman kullanılır [1]. Aşağıda endüstride yaygın olarak kullanılan tek sıralı sabit bilyalı rulman kesit resmi verilmiştir.



Şekil 2.1. Tek sıralı sabit bilyalı rulman kesit görünüşü ve temel elemanları [4]

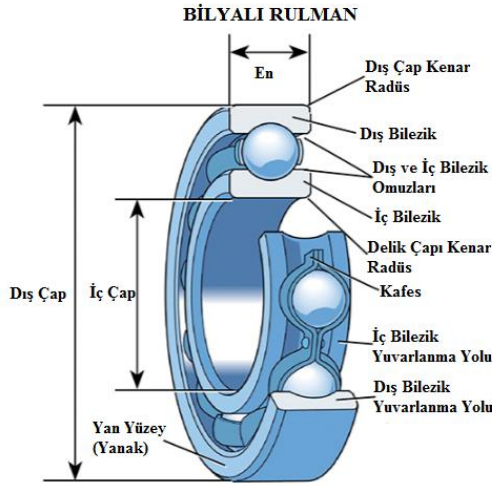
Yukarıda Şekil 2.1’de verilen tek sıralı sabit bilyalı rulman resminde verilen ölçüler rulmanın genel boyutlandırma ölçüleridir ve aşağıdaki gibidir.

D: Rulman dış çapı

d: Rulman delik çapı

B: Rulman genişliği

r: Kenar radüsü

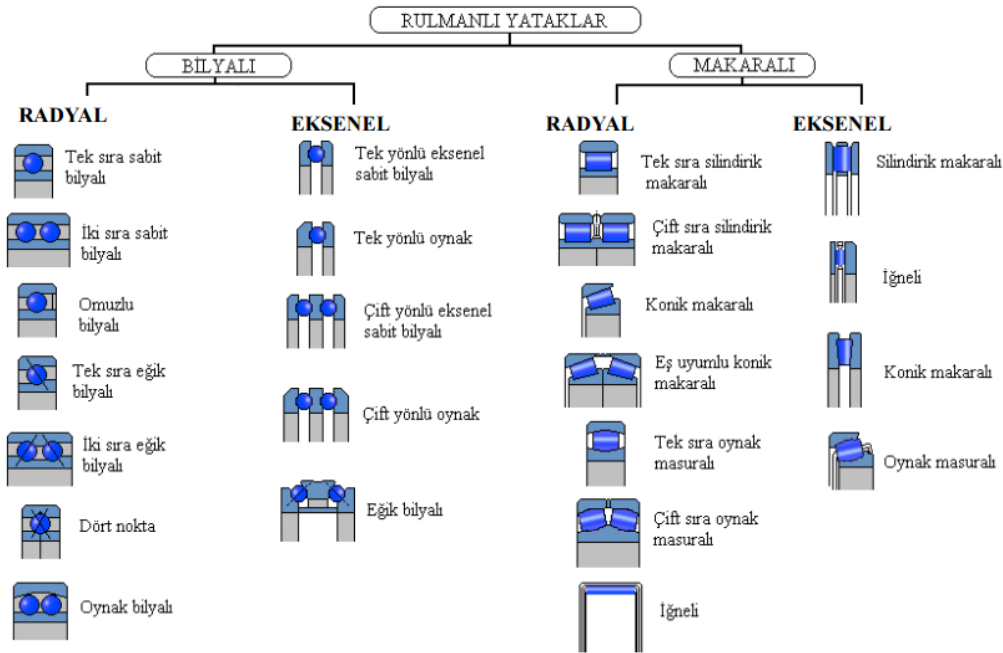


Şekil 2.2. Tek sıralı sabit bilyalı rulman görünümü ve komponentlerinin gösterimi [4]

Yukarıda Şekil 2.2’de üç boyutlu tek sıralı sabit bilyalı rulman görünümü ve rulman elemanları gösterilmiştir.

2.1. Rulmanların Sınıflandırması

Rulmanlı yataklar gelen kuvvetlerin yönüne ve yuvarlanma elemanlarının geometrisine göre sınıflandırılırlar. Aşağıda Şekil 2.3’de rulmanlı yatakların sınıflandırması ile ilgili şekil verilmiştir.



Şekil 2.3. Rulmanlı yatakların sınıflandırılması [5]

Bu rulman tiplerinin yanı sıra özel talep ve uygulamalar için standart boyutlar dışında özel tasarım rulmanlarda imal edilmektedir. Farklı rulman tiplerinin bulunmasının sebebi; rulmanlar taşıyacağı yüke ve taşıyacağı yükün yönlerine göre, rulman hızına göre, kullanım yerinin geometrisi ve koşullarına göre üretilmesi gerekliliğidir.

2.1.1. Tek ve çift sıra bilyalı rulmanlar



Resim 2.1. Tek ve çift sıralı bilyalı rulman [7]

Yukarıda Resim 2.1’de tek ve çift sıralı bilyalı rulman resimleri gösterilmiştir. 6000, 6200, 6300, 6400 serisi standart rulmanlar ve özel ölçülerde olabilecek, parçalarına ayrılamayan rulmanlardır. Bilyalı rulmanlar tüm rulman tipleri içerisinde en yüksek devir sayısı sınırına sahiptir. Bu tarz rulmanlarda bilyaların küresel yapısı nedeniyle bilyaların sadece üst noktası bilezik yataklarına temas etmektedir. Bu nedenle makaralı rulmanlara göre daha az yüzey teması sağladıklarından daha az sürtünme ile daha yüksek devir sayıları elde edilebilir. Radyal boşluğa bağlı olarak, normal çalışma şartlarında eksen konumuna bağlı olarak 8-16 dakika açı altında eğik takılabilirler. Standart seri imalat programlarında genellikle temassız kapaklı, tek sıra bilyalı rulmanlar olduğu gibi temaslı contalı(sızdırmaz kapaklı) rulmanlarda bulunmaktadır. Her iki tarafında da kapağı bulunan rulmanlar bakım gerektirmez. Çift sıralı bilyalı rulmanların radyal yük taşıma kapasitesi tek sıralı olanlara göre daha yüksektir ancak eksenel olarak daha az yük taşıyabilirler. Eğik konumlara da müsait değildirler [1].

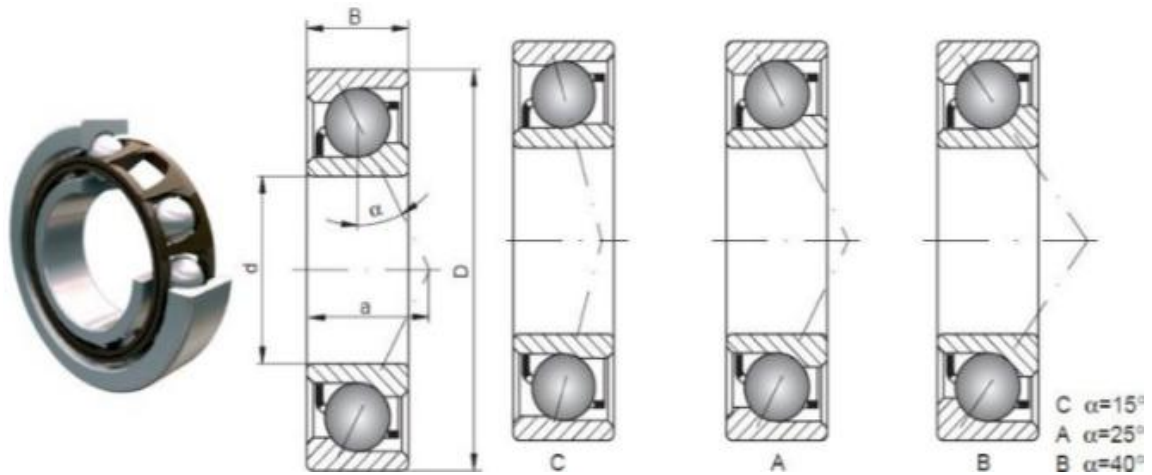
2.1.2. Oynak bilyalı rulmanlar



Resim 2.2. Oynak bilyalı rulman [8]

Yukarıda Resim 2.2’de oynak bilyalı rulman resmi verilmiştir. 1200, 2200 serisi ve özel ölçülerde olabilecek rulmanlardır. Oynak bilyalı rulmanlar çift sıralı, dış bilezikteki yuvarlanma yolu içbükey küre biçiminde olan, parçalarına ayrılmayan rulmanlardır. Bu nedenle açıları ayarlanabilir. Yataklamalardaki eksen hatalarından ve eksene göre 4°’ye kadar olan mil esnemelerinden etkilenmezler. İç bileziği geniş oynak bilyalı rulmanlar çekme olarak imal edilmiş millerle takılmaya uygundur [1].

2.1.3. Açısal temaslı bilyalı rulmanlar



Resim 2.3. Açısal temaslı bilyalı rulman ve farklı açısal temasların gösterimi [9]

Yukarıda Resim 2.3’te açısal temaslı bilyalı rulman resmi ve farklı temas açılarına sahip rulman geometrileri gösterilmiştir. 7200, 7300, QJ serisi ve özel ölçülerde olabilecek rulmanlardır.

Tek sıralı eğik bilyalı rulmanlar; sadece bir yönden gelen aksenal yükleri taşıyabilirler ve bu nedenle ikinci bir rulmanın yanına monte edilmeleri gerekir. Tek sıralı eğik bilyalı rulmanlar parçalarına ayrılmazlar. Yük açısı genelde 40°'dir. En uygun yük dağılımı kuvvet oranları 1 olduğu zaman sağlanır ($F_a / F_r = 1$). Yüksek devirlerde çalışmaya uygundur ve karşıt rulmanlara olan mesafe kısa seçilmelidir. Çünkü milin ısıya bağlı uzunluk değişimleri rulmandaki çalışma boşluğunu etkiler [1]. Yukarıda Resim 2.3'te gösterilen α açısı açılmal kontak açısıdır. Bu açı tek sıralı sabit bilyalı rulmanlarda sıfırdır, yani açılmal temas yoktur.

2.1.4. Silindirik makaralı rulmanlar



Resim 2.4. Tek ve çift sıralı silindirik makaralı rulman [10]

Yukarıda Resim 2.4'te tek ve çift sıralı silindirik makaralı rulman resmi gösterilmiştir. Silindirik makaralı rulmanlar parçalarına ayrılabilen radyal rulmanlardır. Makaralar ve yuvarlanma yolları arasındaki çizgisel temas uygun şekle getirilmiş ve kenar gerilmeleri bu yolla giderilmiştir, yuvarlanma yolu formlarında bombe mevcuttur. Radyal yük taşıma gücü 2-4 dakika arasında bir eğriliğe müsaade edilmektedir. Yüksek radyal yük şartlarında, aynı ölçülerde makaralı rulmanlar bilyalı rulmanlara oranla daha uygundur. İç bileziği şekline göre ve aksesuar kullanımına göre rulmanların isimlendirmesi yapılır. N, NJ, NU, NUP, HJ, RNU, RN olarak kodlanırlar [1]. Genel olarak plastik kafeslidirler. N ve NU tipindeki silindirik makaralı rulmanlar ile iğneli rulmanlar sadece radyal olarak yüklenebilir. Diğer radyal rulmanlar hem radyal hemde aksenal yükleri karşılayabilir.

2.1.5. Konik makaralı rulmanlar



Resim 2.5. Konik makaralı rulman [11]

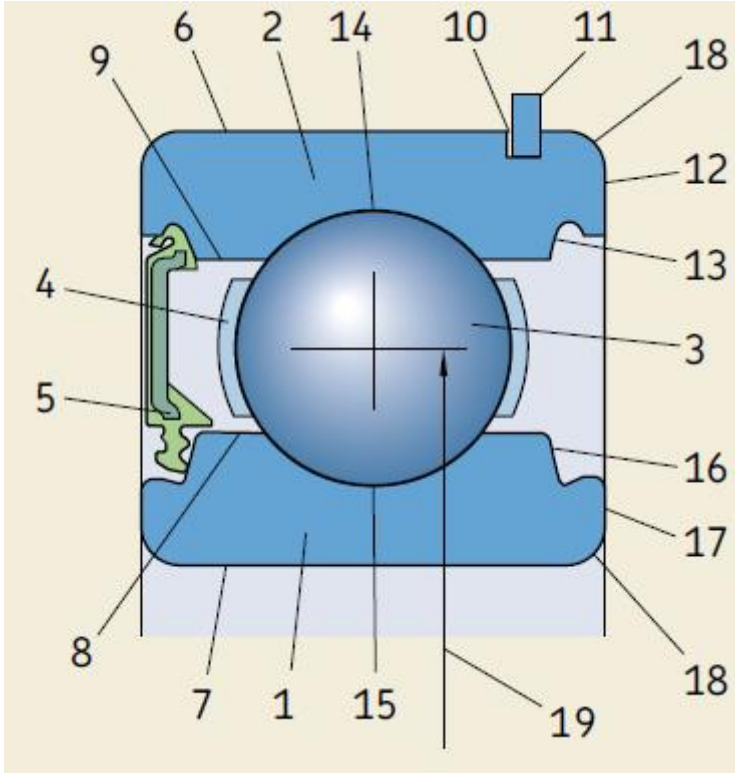
Yukarıda Resim 2.5'te konik makaralı rulman resmi gösterilmiştir. Metrik ve inç seri rulmanlar olmak üzere adlandırılırlar. İnç serisindeki rulmanlar özel kodlamalara sahiptir. Metrik serideki rulmanlar 30000, 31000, 32000, 33000 serisi ve özel ölçülerde olabilecek rulmanlardır. Konik makaralı rulmanlar parçalarına ayrılabilirler. Makaralar ve yuvarlanma yolları arasındaki çizgisel temas en uygun şekilde getirilmiştir. Kenar gerilmeleri bu yolla giderilmiştir, yuvarlanma yolu formlarında bombe mevcuttur. Konik makaralı rulmanlar aksenal yükleri bir yönde taşıyabilirler. Karşı destek olarak ikinci bir konik makaralı rulman kullanılabilir. Kullanılacak olan rulman serisinin radyal yük miktarına göre seçilmesi gerekmektedir. Isıya bağlı olarak milde meydana gelen uzunluk değişimleri rulmanın çalışması için gerekli olan rulman boşluğunu olumsuz etkiler. Bu nedenle karşıt rulmana olan mesafenin küçük tutulması gereklidir. Rulman boşluğu montaj esnasında karşıt rulmana göre ayarlanır [1].

2.1.6. Oynak makaralı rulmanlar

Oynak makaralı rulmanlar dış bilezikteki yuvarlanma yolu içbükey küre biçiminde olan ve parçalarına ayrılmaz rulmanlardır. Yataklamalardaki eksen hatalarından ve eksene göre $0,5^\circ$ 'ye kadar olan mil esnemelerinden etkilenmezler. Büyük rulmanlar mukavemet sınırları yakın yüklerde çalıştırıldıkları takdirde yağlama sorunları ortaya çıkabilir. Genellikle dış bilezikte yer alan yağlama kanalı veya yağlama deliği soruna çözüm getirmektedir. Genelde bu rulmanlarda kullanılan kafesler plastik malzemedir.

2.2. Rulman Bileşenleri

Rulmanlarda standart olarak iç ve dış bilezik, kafes, yuvarlanma yolu elemanları, sızdırmazlık ve koruyucu kapaklar, rulman içinde yağlamayı sağlayan yağlayıcılardan oluşmaktadır. Aşağıda Şekil 2.6'da gösterilen tek sıralı sabit bilyalı sac kafesli elastomer sızdırmazlık kapağına sahip bir rulmanın kesit görünüşüdür. Rulman bileşenleri isimleri ve rulmanın çeşitli bölümlerinin isimleri aşağıdaki maddelerde verilmiştir.



Şekil 2.6. Rulman bileşenlerinin isimlendirilmesi [4]

1- İç bilezik, 2- Dış bilezik, 3- Yuvarlanma elemanı (bilya, silindirik makara, iğne makara, konik makara, küresel makara), 4- Kafes, 5- Elastomer kapak (Elastomer ve metal takviye sacından oluşmakta), 6- Dış çap, 7- İç (delik) çap, 8- İç bilezik omuz çapı, 9- Dış bilezik omuz çapı, 10- Segman kanalı, 11- Segman, 12- Dış bilezik yan yüzeyi, 13- Kapak için dış bilezik kapak yuvası, 14- Dış bilezik yuvarlanma yolu, 15- İç bilezik yuvarlanma yolu, 16- Kapak için iç bilezik kapak yuvası, 17- İç bilezik yan yüzeyi, 18- Bilezik köşe pahları, 19- Rulman bölüm dairesi çapı

2.2.1. Kafes

Yuvarlanma elemanlarını çevresel olarak eşit aralıkta tutan ve dönüş esnasında yuvarlanma elemanlarının birbirlerine sürtünmesini önleme amacıyla kafesler kullanılmaktadır. Kuvvet iletiminde kafesler rol almazlar. Kafesler malzemelerine göre aşağıdaki şekillerde gruplandırılırlar.



Resim 2.6. Perçin bağlantılı sac kafes

Yukarıda Resim 2.6'da perçin bağlantılı sac kafesler gösterilmiştir. Rulmanlarda kullanılan standart kafes malzemesi DC04-DC01-DC03'dir. 150°C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Sac kafesler iki parça halindedir ve bu iki yarım kafes, perçinlerle birleştirilirler. Yukarıda Resim 2.6'da perçin bağlantılı çelik rulman kafesleri gösterilmiştir.



Resim 2.7. Plastik kafes örnekleri [9]

Yukarıda Resim 2.7'de farklı dizaynlarda rulman plastik kafesleri verilmiştir. Plastik kafesler rulmanın yuvarlanma elemanı geometrisi, rulman devir sayısı, sürtünmeyi azaltıcı etkiler gibi değişkenlere göre dizayn edilirler.

Cam yünü takviyesiz plastik kafes: 115°C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Malzeme genel adı PA6.6 olarak geçer.

Cam yünü takviyeli plastik kafes: 150°C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Malzeme genel adı PA6.6 GF25 olarak geçer.

Cam yünü takviyeli plastik kafes: 170°C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Malzeme genel adı PA4.6 GF25 olarak geçer.

Masif pirinç kafes: Ağır yük ve titreşimlerin olduğu ortamlarda kullanılır. Üretilmesi zor ve pahalıdır.

Çelik veya pirinç kafesler sacdan preslenerek, masif kafesler pirinç malzemedен işlenerek, plastik kafesler ise enjeksiyonla üretilirler. Son dönemlerde malzemesi Polyamid 6.6, Polyamid 4.6 ve normal veya cam yünü takviyeli olan plastik kafesler hafif olmaları, kayma, şok absorbe edebilme özellikleri ve yüksek devirlerde daha az gürültüye sebep olmaları yüzünden birçok uygulamada tercih edilmektedirler. Plastik kafesler sac kafeslere göre daha hafif olduğundan dönme esnasında sac kafese göre daha düşük bir merkezkaç kuvvetine maruz kalacağından daha avantajlıdır. Ayrıca fenolik (phenolic) malzemedен üretilmiş kafeslerde müşteri isteği veya uygulama alanı doğrultusunda kullanılabilir.

2.2.2. Kapak



Resim 2.8. Kapaklı ve açık rulmanlar [13]

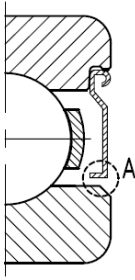
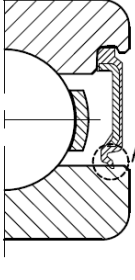
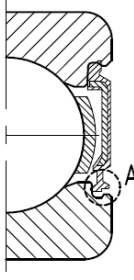
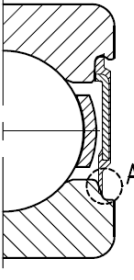
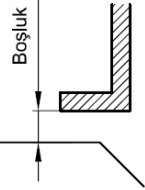
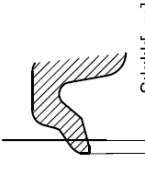
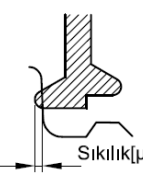
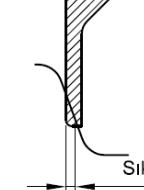
Yukarıda Resim 2.8’de sac ve elastomer kapaklı rulman ve açık rulman gösterilmiştir. Kapaklar, rulman içerisindeki gresin dışarı çıkmasını ve dışarıdan rulman içerisine yabancı madde girmesini engeller.

Rulmanlarda kirlilik rulman ömrünü etkileyen önemli bir faktördür. Bir rulman kapağının görevini yerine getirmesi rulman ömrünün beklenenden önce tamamlanmasını engellemiş olur. Genel olarak rulmanlarda kullanılan koruyucu ve sızdırmazlık özelliği gören kapakları aşağıda verildiği gibi dört farklı sınıfta değerlendirilebilir.

- Sac kapak (Kontaksız)
- Elastomer kapak (Kontaksız)
- Elastomer kapak (Düşük sürtünmeli)
- Elastomer kapak (Normal temas)

Sac kapak (Z): Sacdan imal edilirler, malzeme TS 275 - DIN EN 10202'tür. İç bileziğe sürtünmedikleri için lastik kapaklara göre daha yüksek hızlarda kullanılabilirler. Elastomer (kauçuk esaslı) kapak (RS): NBR, ACM, FKM, NDNN, HNBR gibi çeşitli elastomer ve çelik sac kısımdan oluşurlar. İç bileziğe sürtünerek çalıştıkları için içerden dışarıya veya dışarıdan içeriye doğru sızdırmazlıkları sac kapaklara göre çok daha iyidir, ancak sürtünmeden dolayı yüksek hızlarda çalışmaya uygun değildirler. Yüksek hızlar için nispeten daha uygun az temaslı veya temassız tasarım yapılabilir. Çeşitli uygulamalara göre iç dudak şekilleri farklıdır (RSR, RS1, RDD vb.). İki tarafından da kapaklı rulmanlar ömürleri boyunca yağlama yapabilecek şekilde kullanılırlar, bakım gerektirmezler. Lastik esaslı malzemelerin dikkate alınması gereken çalışma sıcaklıkları aşağıda verilmiştir.

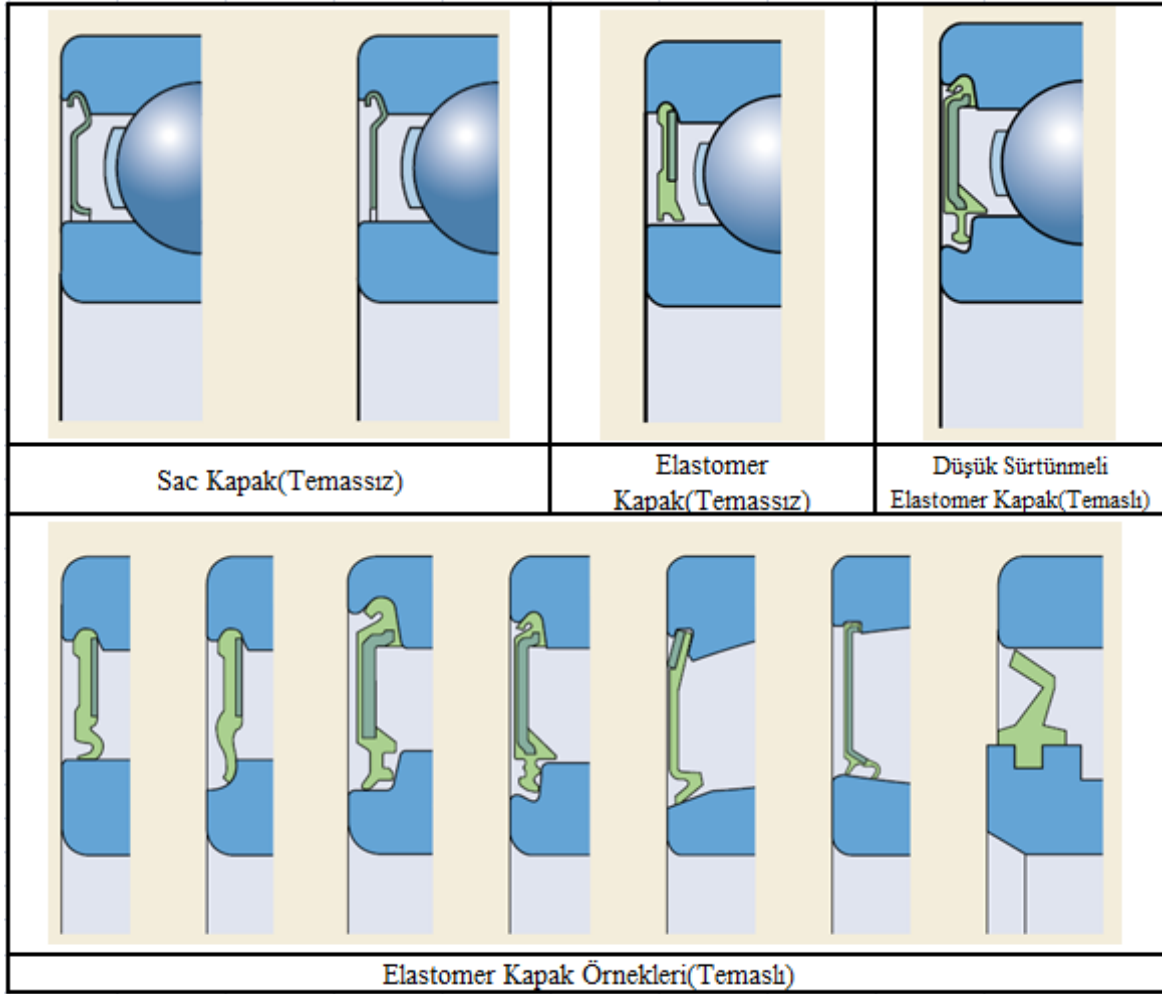
- NBR : -30°C / +105°C (Kısa süreli çalışmalarda maksimum 120 °C sıcaklığa çıkabilir.)
- NDNN : -40°C / +130°C (Kısa süreli çalışmalarda maksimum 150°C sıcaklığa çıkabilir.)
- HNBR : -40°C / +150°C (Kısa süreli çalışmalarda maksimum 170°C sıcaklığa çıkabilir.)
- ACM : -20°C / +150°C (Kısa süreli çalışmalarda maksimum 170°C sıcaklığa çıkabilir.)
- FKM : -30°C / +200°C (Kısa süreli çalışmalarda maksimum 230°C sıcaklığa çıkabilir.)

ZZ Kapak Dizayn	RSR Kapak Dizayn	RDD Kapak Dizayn	RS1 Kapak Dizayn
			
ZZ sac kapak	RSR Dizayn Elastomer(Lastik) Kapak	RDD Dizayn Elastomer(Lastik) Kapak	RS1 Dizayn Elastomer(Lastik) Kapak
Kapak – iç bilezik A DETAYI	Kapak – iç bilezik A DETAYI	Kapak – iç bilezik A DETAYI	Kapak – iç bilezik A DETAYI
			

Şekil 2.7. ORS firmasında kullanılan rulman kapak dizayn örnekleri

Yukarıda Şekil 2.7’de örnek olarak ORS firmasında kullanılan bazı rulman kapak dizaynları verilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı gibi rulmanlarda kullanılan lastik kapak kontak şekilleri birbirinden farklıdır.

Rulmanlarda kullanılan elastomer kapak dizaynları rulmanların çalışacağı sıcaklık, kullanılacak yağlayıcı tipi, sürtünme değeri gibi birçok değişkene göre dizayn edilip, kullanılmaktadır. Rulman üretici firmalar için kapak malzemesi ve dizaynları rulman performansını etkileyen önemli bir faktördür. Yukarıdaki şekilde gösterilen dizaynlar dışında da farklı kapak tasarımları mevcuttur.



Şekil 2.8. SKF firmasında kullanılan örnek kapak dizaynları [4]

Yukarıda Şekil 2.8’de SKF firmasının kullandığı örnek kapak dizaynları gösterilmiştir. Sızdırmazlık teması sadece aksel ve radyal olabilir veya hem radyal hemde aksel olabilir. Sac kapaklı rulmanlarda metal-metal teması istenmediğinden dolayı rulman iç bileziğine temas yoktur. Sac kapağın sızdırmazlığı sağlaması ve dışarıdan gelecek partiküllere karşı rulmanı koruması için kapak delik çapı ve bilezik arasında çok küçük miktarlarda boşluk olacak şekilde üretilirler. Elastomer kapakların ise rulman dış bileziğindeki kapak yuvasına pres ile çakılarak montajı gerçekleşir. Montaj işleminden sonra elastomer kapak iç dudacağı rulman iç bileziğine temas eder. Bu temas aslında iç bileziğe uygulanan bir baskıdır. Buradaki baskı rulmanın sızdırmazlık ve sürtünme özelliğini etkilemektedir. Elastomer kapak kontak sıklığına göre rulmanın sürtünme davranışı dolayısıyla ısınma davranışı değişmektedir. Rulmanlarda kullanılan elastomer kapak kontak sıklıkları önemli bir dizayn parametresidir. Bu çalışmada da bu parametre incelenmiştir.

2.2.3. Yuvarlanma yolu elemanları

Kuvvet iletimini sağlarlar, rulmanların sınıflandırmasında ana etken olarak rol oynarlar. Bilyalar küresel şekillidirler, kullanıldıkları yataklarda sürtünme kuvvetleri diğer rulmanlara göre daha düşüktür ve çok yüksek hızlarda dönen rulmanlı yataklarda tercih edilirler. Çelik bilyaların yanı sıra seramik bilyalarda rulmanlarda kullanılmaktadırlar. Seramik bilyaların kullanım sebebi temel olarak rulman içinden elektrik geçirgenliğini önlemektir ve yaygın olarak elektrik motorlarında tercih edilirler. Bilyaların rulman bileziklerine teması teoride noktasaldır fakat gerçekte yük altında bilya ve bilezik arasında eliptik şekilli kontak oluşmaktadır. Bu eliptik kontak sebebiyle oluşan kontak basıncı Hertz kontak basıncı teorisine göre hesaplanır. Rulmanlarda kullanılan makaralar konik, silindirik, küresel ve iğne makaralı olmak üzere çeşitleri mevcuttur. Makaralı rulmanlar çizgisel temas ile yük taşırlar. Temas uçlarındaki yük dağılımını minimize etmek için yüzeylerinde bombe mevcuttur. Çizgisel temasa sahip olması nedeniyle aynı ölçülerdeki bilyalı rulmana göre daha fazla radyal yük taşıma kapasitesine sahiptirler.

2.2.4. Yağlayıcılar

Rulmanların güvenilir çalışması için, yuvarlanma elemanları ile yuvarlanma yolları arasındaki direkt metal temasını engellemek ve yüzeylerin aşınmasını önlemek amacıyla uygun bir şekilde yağlama yapılmalıdır. Bu nedenle uygun yağın seçimi, yağlama metodu vb. unsurlar önemlidir. Rulmanların yağlanması için gresler, sıvı yağlar ve özel bazı durumlarda da katı yağlar kullanılabilir. Yağlama; sürtünmeyi, dolayısıyla aşınmayı azaltır ve paslanmayı önler. Yağ, soğutma ve sızdırmazlık görevini de üstlenebilir. Taşıyıcı özelliğe sahip bir yağ filminin oluşması genelde rulman yüküne, devir sayısına, yağın çalışma viskozitesine ve rulman büyüklüğüne bağlıdır. Yağ seçiminde sadece teorik hesaplarla bulunan değerleri (temas yüzeylerinin mikro ve makro geometrileri, yuvarlanma teması anındaki yağlama durumu gibi) almakla birlikte bunlara ek olarak edinilen tecrübe sonuçlarına da yer vermek gerekir. Özellikle yüksek basınç katkı maddeleri (EP katkıları) ihtiva eden yağ, kimyevi reaksiyona giriyorsa bu konu daha da önem kazanır. Gresler, katkı maddeleri ile kalınlaştırılarak elde edilen madeni veya sentetik yağlardır. Gres ile yapılan yağlama, rulmanlarda kullanılan en yaygın yağlama şeklidir.

Yuvarlanma elemanı ile bilezik yuvarlanma yolları arasında film tabakası oluşturarak sürtünmeyi minimum düzeye indiren gresler, rulmanların kullanım yerlerine göre (yük, sıcaklık, devir, ortam koşulları vs.) çok çeşitlilik gösterir, bu oran tüm uygulamaların %90'ı civarındadır. Kullanım koşullarının iyi analiz edilerek uygun özelliklerde gresin seçilmesi gerekir. Rulman içerisine konulacak gres miktarı kullanıcı isteğine göre değişmekle beraber genel olarak rulmanın iç hacminin %25-%35'i arasındadır. Özel uygulamalarda bu değerler değişebilir. Örneğin, yüksek hız uygulamalarında gres miktarı azaltılır. Genel olarak imalat esnasında rulmana konulan gres, rulmanın tüm çalışma ömrü için yeterlidir. Rulmanlarda kullanılan greslerde kullanılacak uygulamaya göre seçilir. Gres seçerken rulmanın maksimum çalışma devri, maksimum veya minimum çalışacağı sıcaklık, rulmanda kullanılacak elastomer kapak malzemesi çeşidi gibi değişkenlere göre seçilir. Seçilecek gresin rulmanda kullanılacak elastomer kapak ile kimyasal olarak uyumlu olması gerekmektedir yani gres ile kapak etkileşime geçmemelidir. Yoksa kauçuk malzeme olan elastomer kapaklarda büzülme, kabarma gibi ciddi problemlerle karşılaşılabilir ve rulmanın sızdırmazlığını olumsuz etkiler.

Sıvı yağ ile yağlama genellikle yüksek hız veya çalışma sıcaklığının gres kullanımına uygun olmadığı zamanlarda uygulanır. Ayrıca az sürtünme ve rulmanlardaki sıcaklığın dışarı atılması, gürültü ve vibrasyon azaltması gerektiğinde sıvı yağ ile yağlama yapılır. Yağ banyosu, sıçratmalı - çarpmalı yağlama, damlatmalı yağlama, sirkülasyon yağlaması, sisli ve hava-yağ karışımı ile yağlama, püskürtmeli yağlama çeşitli sıvı yağ ile yağlama şekilleridir.



3. RULMANLARDA ELASTOMER KAPAK KULLANIMI VE ELASTOMER MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Rulmanlarda elastomer sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan kapak kullanımını çok yaygındır. Rulmanlarda yaygın olarak ACM, NBR, FKM, HNBR gibi elastomer kapaklar kullanılmaktadır. Bu elastomerler sentetik (suni) kauçuktur ve vulkanize olarak lastik özelliklerini kazanırlar. Her bir malzemenin kullanım yeri ve çalışma koşullarına dayanımı farklıdır. Rulmanlarda kullanılan elastomer kapaklar; rulmanı partikül kirliliğinden korur ve gerekli gres sızdırmazlığını sağlar. Rulmanlarda genelde elastomer kapaklar açık sıvı yağlamanın yapılmadığı yada yapılamayacağı veya yüksek sızdırmazlık gerekliliği istenen uygulamalarda tercih edilir. Rulmanın içindeki yağ veya gres kirliliği rulman ömrü ile direkt alakalı bir değişkendir ve teorik rulman ömür hesaplarında rulmandaki yağ veya gres kirlilik seviyesine göre bazı katsayılar belirlenmiştir. Rulman ömür hesaplamalarında bu katsayılar doğrudan kullanılır. ISO 281 standardına göre ömür hesaplama yöntemi dördüncü bölümde anlatılacaktır.

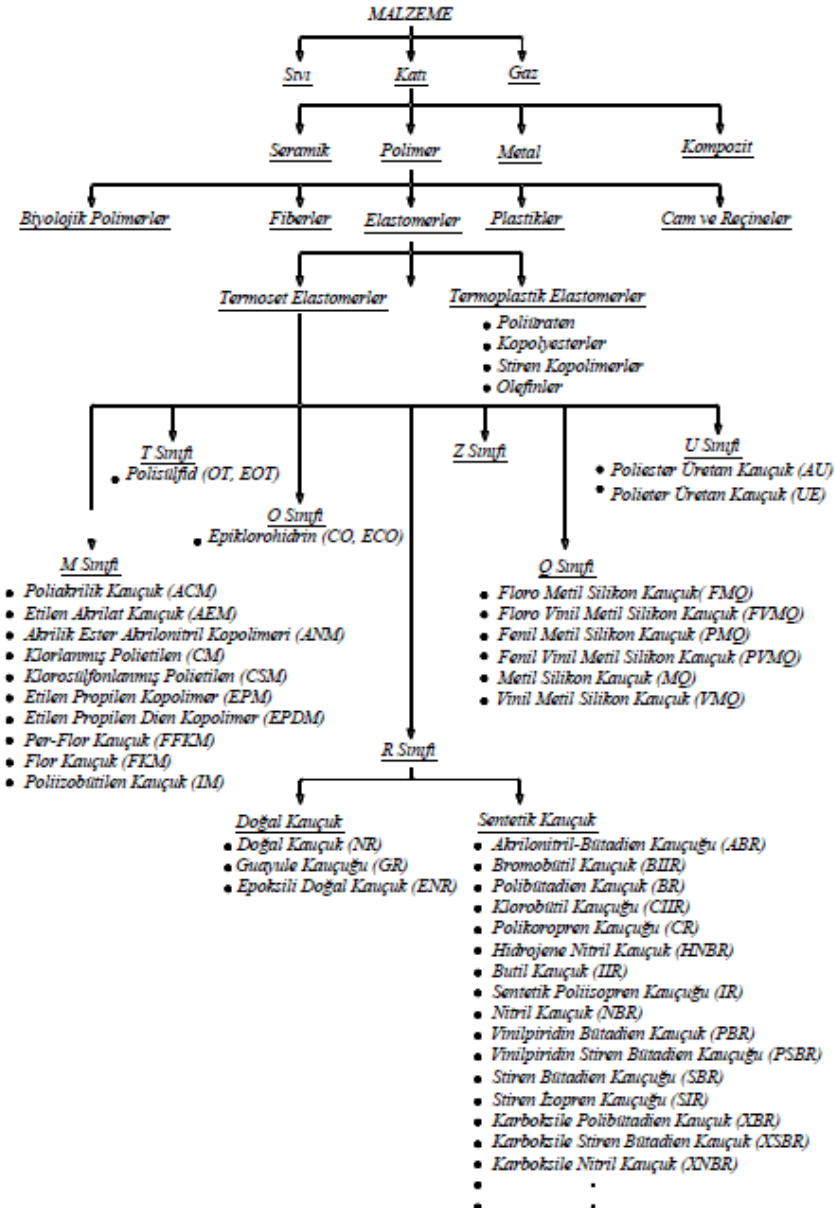
Elastomer kapaklı rulmanlarda yağlayıcı olarak gres yağları kullanılmaktadır. Bu gres yağlarının rulman içinde temiz bir şekilde muhafaza edilmesi rulman ömrü için önemlidir. Gresli rulmanların bakımı yoktur ve bir kere rulmanın içine gresi koyduğunuzda bu gres rulmanın çalışma ömrü boyunca değiştirilmez. Dolayısıyla kirlenen rulman kendinden beklenen ömrü tamamlayamayabilir. Eğer rulman içinden bir şekilde gres beklenen çalışma ömründen önce dışarı çok miktarda sızar, rulman gressiz veya yetersiz yağlama olacak kadar gres ile kalırsa, rulman hesaplanan ömrünü tamamlayamayacaktır. Elastomer kapaklı rulmanların gres sızdırmazlığını sağlayamamasına gres atması veya dışarıdan yabancı maddeyi rulman içine almasına sebep olur. Bu durum elastomer kapak performansı ile direkt alakalıdır. Ayrıca rulman iç bileziğine temas eden elastomer kapaklı rulmanlar çok yüksek devirli uygulamalarda (örn;50000 rpm) çalışan rulmanlarda tercih edilmezler. Yüksek devirli uygulamalarda sac kapaklı rulmanlar kullanılabilir. Ayrıca rulman iç bileziği ile temas halinde olmayan kontaklı elastomer kapak dizaynları da mevcuttur ve bu kapak tasarımına sahip rulmanlar yüksek hız uygulamalarında kullanılabilirler. Bunun sebebi elastomer kapak kontak dudağı rulman iç bileziği ile sürekli temas halindedir dolayısıyla yüksek devirlerde yüksek sıcaklık oluşur ve rulman elastomer kapağı aşınabilir, sertleşebilir, formunu kaybedebilir.

Bu bozulmalar sonucunda elastomer kapak kontak dudağı görevini tam olarak yerine getiremez ve rulmandaki sızdırmazlık özelliğı olumsuz şekilde etkilenir. Rulmanlarda kapaklar dış bilezikteki kapak yuvasına presle basılarak dış bilezik ile kapak sabitlenir. Rulman ömrü için kirlilik çok önemli bir faktördür. Yabancı partikül kirliliğı rulmanların yuvarlanma yollarında hasara neden olarak zaman geçtikçe yuvarlanma yolunda farklı ciddi hasarlara (metal kopması, metal dökülmesi, derin çizikler gibi) neden olacaktır. Yorulma hasarları malzeme yüzeyinin altından başlayarak yüzeye doğru gelir. Aşırı partikül kirliliğı rulmanların yuvarlanma yollarının kolayca yorulmasına ve aşınmasına sebep olur. Rulmanlar bu hasarlarını çalıştıkları ortamdaki yükler nedeniyle alırlar. Radyal, aksel veya moment yükü altında çalışan rulmanda eğerki partikül kirliliğı fazla ise rulman yuvarlanma elamanları maruz kaldığı yük etkisinde bu yabancı partiküller bilezik yuvarlanma yoluna batarak yuvarlanma yolunu deforme edecektir. Bu hasarların sonucunda rulman titreşimli (sesli) çalışabilir yada ciddi hasarlanarak çalışamaz hale gelir. Bu kirliliğı önlemenin yolu sızdırmazlık kapakları kullanmaktır. Ayrıca hiçbir rulman laboratuvar ortamındaki gibi temiz bir gres ile çalışamaz, imalattan kalan mikrometre yada nanometre boyutlarında kirlilik yada çalışma esnasında rulman içinde oluşan kirlilik olacaktır. Elastomer kapak dizaynları yukarıda bahsedilen durumlar nedeniyle çok önemlidir. Örneğin; eğer çok sıkı temaslı bir elastomer kapak dizayn edilirse rulmanda istenmeyen bir sıcaklık artışı görülecek ve ömür azalacaktır yada kapakların elastomer olması sebebiyle oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle elastomer kapakların sızdırmazlık görevi yapan kontak dudaklarında form bozukluğu veya sertleşmeye yol açacaktır. Yükselen aşırı sıcaklık nedeniyle önceden rulmanın çalışma sıcaklığına göre belirlenmiş gres, yağlama özelliğini yüksek sıcaklık sebebiyle kaybedebilir. Bu durumda yetersiz bir yağlama olacağından rulman ömrü negatif olarak etkilenir. Kapak kontak sıklığı yetersiz kalan bir dizayn yapılırsa, rulmanda gres atma problemi daha kolay görülebilir. Yetersiz sıklık demek elastomer kapak kontak dudağının rulman iç bileziğine yeterli baskı kuvvetini uygulayamaması, yani sızdırmazlık özelliğinin azalmasıdır. Dolayısıyla bu konuda tek bir doğru yoktur, değişkenler birlikte değerlendirilmelidir.

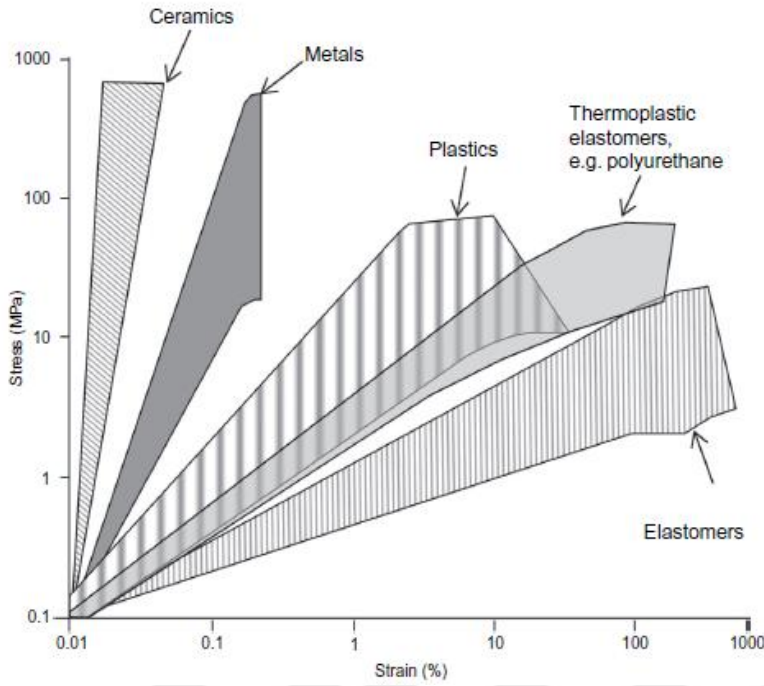
3.1. Elastomer Malzeme ve Özellikleri

Elastomerler, oda sıcaklığında gerilme uygulandığında ilk boyunun en az iki katı uzayabilen ve bu gerilme kalktığında hızla ilk boyutuna dönebilen, elastisite modülleri çok düşük polimer malzemelerdir ve çapraz bağlanabilen kauçuk malzemelerden elde edilirler.

Bu malzemelerin elastikliği, uzun molekül zincirlerinin kendi içlerinde ve birbirlerine göre hareket etmelerinden kaynaklanır. Elastomer molekülleri seyrek çapraz bağlı oldukları için, kuvvet uygulandığında birbirlerinden kayarak uzaklaşmazlar. Doğal kauçuğun maliyetinin yüksek olması, üreticileri kauçuğun suni olarak elde edilmesine itmiştir. Bununla beraber kauçuğa farklı katkı ve dolgu malzemeleri ilave edilmesi maliyet ve teknik özellikleri açısından olumlu sonuçlar vermiştir [14]. Elastomerler günümüzde başta lastik endüstrisi olmak üzere, taşıtlarda, binalarda, ayakkabı, taşıyıcı bant, hortum imalatında, sağlık, uzay ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır [15]. Aşağıda Şekil 3.1'de elastomer malzemelerin çeşitleri gösterilmiştir.



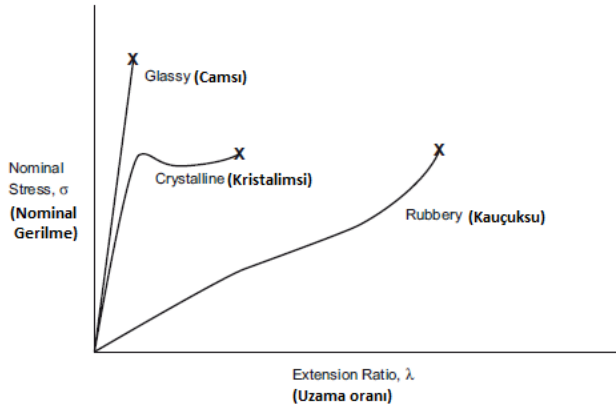
Şekil 3.1. Malzemelerin genel sınıflandırması ve elastomer malzeme çeşitleri [16]



Şekil 3.2. Elastomer malzemelerin diğer mühendislik malzemeleri ile gerilme-gerinim özelliklerinin kıyaslanması [17]

Elastomerlerin, seramiklerin, metallerin, plastiklerin gerilim-gerinim (stress-strain) karşılaştırılması ile alakalı örnek grafik yukarıda Şekil 3.2’de verilmiştir. Seramikler ve metaller, plastik ve elastomer malzemelere göre aynı gerilme altında çok daha az şekil değiştiren daha gevrek malzemelerdir. Elastomerler; diğer tüm malzeme gruplarına göre çok daha kolay şekil değiştirebilen sünek bir malzemedir. Bu esneklik elastomer malzemelerin endüstride sönümleyici malzeme olarak kullanılmasının sebeplerindedir. Ayrıca diğer malzemelere göre hafif bir malzemedir. Diğer malzeme gruplarına göre daha esnek bir malzemedir. İlk boyunun %700-900 katına kadar çıkabilen elastomer malzemeler vardır. Başka bir malzeme grubuyla bu esneklik özelliğini yakalamak mümkün değildir. Ayrıca yük altında bu yüksek uzama kabiliyetinin yanında, uygulanan yük kalktığında elastomer malzeme başlangıç boyuna yakın bir değere tekrar gelmektedir. Bu durum uygulanan yükün cinsi ve şiddeti ile de alakalıdır [18].

3.1.1. Kauçuk elastomer malzeme özellikleri



Şekil 3.3. Polimerlerin üç fiziksel durumu için çekme gerilim-gerinim diyagramı (X noktaları kopma noktasını temsil etmektedir.) [17]

Polimerizasyon boyunca monomer olarak bilinen basit moleküllerden, uzun zincir molekülü oluşturulur. Polimer molekülleri amorf kauçuksu (amorphous rubbery), amorf camsı (amorphous glassy), kristal (crystalline) olabilir. Elastomerler tipik olarak rastgele molekül hareketleri ile oluşan amorf polimerlerdir. Böylece, elastomerler özünde viskoz sıvılardır. Nispeten birbirine mesafeli uzun molekülleri birbirine bağlama (çarpraz bağlama) sonucunda esnek moleküler ağ yapısı oluşturulur. Fakat bunun sonucunda malzeme sabit şekil ve boyuta sahiptir, malzeme yumuşak elastik katı haline gelmiştir. Çoğu mühendislik malzemesi gibi elastomerlerde belirli noktalarından dış kuvvetlere maruz kalırlar. Katı cisim deforme edildiğinde gerilme isimli içsel reaktif kuvvet belirli bir birim alanda bu deformasyona karşı koyar ve bu deformasyonun ölçüsü gerinimdir (strain). Yukarıda Şekil 3.3’de farklı molekül yapıları polimer durumlarının gerilim-gerinim davranışı görülmektedir. Şekilde gösterilen (X) noktaları malzemelerin kopma noktasıdır. Şekil 3.3’den yorumlanacağı gibi, camsı polimerler (glassy polymers) sert ve gevreklerdir. Bunun sebebi diğer polimer yapılarına göre daha erken bir uzama oranında camsı polimerin kopması ve boyun verme gibi elastik malzeme davranışı göstermemesidir. Gerilim-gerinim davranışı dik bir açıyla lineer bir artış göstermektedir. Kristalimsi polimerler camsı polimerlere göre daha elastik davranış gösterirler. Kristal durumdaki polimerler elastik deformasyon, akma, plastik akış, boyun verme kırılma gibi mekanik özelliklere sahiptir [17]. Kauçuk yüksek elastikiyeti, yumuşaklığı ve yüksek uzamasıyla eşsiz bir malzemedir. Yukarıdaki şekilden de anlaşıldığı gibi yüksek elastikiyet ve uzama oranlarına sahiptir.

3.1.2. Sıcaklığın elastomerlere etkisi

Elastomer malzemeler hayatımızda otomotiv, havacılık, ev eşyaları, tekstil, savunma, enerji sektörü gibi farklı uygulamalarda kullanıldıkları için farklı ortam koşullarına maruz kalmaktadırlar. Örneğin; Sibiry'a'daki bir şantiye aracı -40 °C ortam sıcaklığında çalışırken, Dubai'deki bir şantiye aracı 50 °C ortam sıcaklığında çalışmaktadır. Dolayısıyla bu araçlarda kullanılan elastomer bileşenlerin çalışma performansı ve ömrü ortam sıcaklığından fazlasıyla etkilenmektedir. Her elastomerin içerdiği kimyasal içeriği ve malzemelere göre çalışma sıcaklıklarına dayanımları farklıdır. Elastomerlerin sağlıklı olarak çalışabilmesi için mekanik özelliklerini koruyabildikleri belirli sıcaklık aralıklarında çalıştırılmalıdırlar. Eğer bu sıcaklık sınırları dışına çıkılırsa: çok düşük sıcaklıklarda camsı yapının oluşması, düşük sıcaklıklarda bazı elastomerlerin kristal yapıya geçmesi, yüksek sıcaklıklarda ise erime noktasına gelerek malzeme görevini yerine getiremeyebilir veya aşınmalar sebebiyle elastomer kendinden beklenen ömrü tamamlayamaz. Bu sebepten ötürü elastomer malzeme seçimi yapılırken çalışacağı ortam sıcaklığı, maksimum ve minimum işletme sıcaklığı gibi değişkenler çok önemlidir.

Camsı geçiş sıcaklığı(Glass transition temperature)

Elastomerler çok düşük sıcaklıklara maruz kaldığında tüm elastomerler geçiş durumuna geçer, camsı bir hal alır, gevrekleşir ve rijitlik özelliği yaklaşık 1000 kat artar [17]. Bu durum sonucunda elastomerik özellikler sergilenemez. Bunun sebebi olarak; elastomerler birbirine sarılı polimer zincirleri olarak tasavvur edilmiştir. Uygulanan deformasyonlar molekül zincirinde uzama gibi harekete sebep olur. Bu uzama, sargı yapıli molekül yapısının arasındaki boşluklar sayesinde gerçekleşir. Fakat sıcaklık düştüğünde bu serbest boşluk hacmi azalır ve molekül zincirinin hareketini engeller. Bu duruma elastomerin katılaşması denir. Çünkü elastomerin normalde diğer mühendislik malzemelerine göre esnek ve yumuşak bir yapısı vardır. Sonuç olarak bu sıcaklık düşüşünde belirli noktaya ulaşıldığında (bu sıcaklık her elastomer için farklıdır) zincir yapısının hareketine müsaade edecek boşluk kalmamıştır ve yukarıda bahsettiğimiz 1000 katlık katılaşma bu durumdan dolayıdır. Eğer soğutma durumu devam ederse bazı kauçuklara çekiç ile vursanız cam şeklinde paramparça olacaktır. Bu durumun gerçekleştiği sıcaklığa camlaşmaya geçiş sıcaklığı yada camlaşma geçiş noktası denir. Fakat bu durum bir noktadan çok bir alan içinde gerçekleşir [19].

Elastomerlerin camlaşma geçiş sıcaklığı içeriklerine göre farklılık göstermektedir. Aşağıdaki Çizelge 3.1’de bazı elastomerler için camsı geçiş sıcaklıkları (T_g) verilmiştir. Tablodaki elastomerler ham ve vulkanizasyonu olmuş dolgunsuz kauçuklardır.

Çizelge 3.1. Farklı elastomer malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları [17]

Parantez içinde verilen değerler vulkanize olmuş kauçuklar için verilmiştir.										
Özellik	NR	IR	SBR	CR	NBR	IIR	BR	EPDM	FKM	Silikon
Yoğunluk [kg/m ³]	913 (970)	930	940 (980)	1230 (1320)	1000	920	910	860	1850	980
T_g [°C]	-72 (-68)		-60 (-55)	-50 (-45)	-40 ^a -10	-72	-100 ^b	-55	-20-10	-123

a:akrilonitril içeriği %20-%50

b:high cis BR

Katılma tamamen fiziksel bir olaydır ve tamamen tersinirdir. T_g sıcaklığını plastikleştiriciler ile geliştirme ihtimali olsa bile, bu sıcaklık ağırlıklı olarak ham kauçuk elastomerine göre değişmektedir. T_g sıcaklığı elastomerin ana omurgasına eklenen kimyasal unsurlar ile açıklanabilir. Termal enerji bu kimyasalların ana zincir etrafında dönmesini sağlar. Kauçuk soğutulduğunda ve sonrasında T_g sıcaklığına ulaşıldığında bu rotasyon hareketi durur. Eğer bu kimyasal monomer grupları geniş hacimli ve çok sayıda ise daha yüksek sıcaklıklarda T_g sıcaklığına daha sonra ulaşılır.

Örneğin; nitril kauçuğunda ACN grubu oldukça fazladır. Satın alınan NBR malzemesine göre ana zincirde polimerize olmuş ACN monomeri sayısı değişebilir. Düşük yüzdeli ACN’ye sahip NBR malzemesinin T_g sıcaklığıda düşmektedir. Bu nedenle %25 ACN içeren nitril kauçuğun T_g sıcaklığı -48 °C iken, %45 ACN içerikli nitril kauçuğun T_g sıcaklığı -14 °C’dir [19].

Kristalizasyon (Crystallization)

Bazı elastomerler kristalize olabilirler. Kristalizasyon olayı camlaşma sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda gerçekleşir fakat yinede ortam sıcaklığının altındadır. Polikloropren (CR) ve doğal kauçuk (NR) kristalize olan başlıca kauçuklardır ve maksimum kristalize oldukları sıcaklıklar sırasıyla -10 °C ve -25 °C sıcaklığıdır [17]. Kristalizasyon sonrasında IRHD sertliğinde yaklaşık 20 puanlık bir sertlik artışı görülebilir [19].

Camsı yapıya geçiş hızlı bir şekilde gerçekleşirken, kristalizasyon yavaş gerçekleşir ve denge haline ulaşması ayları alabilir. Kristalizasyonun mühendislik uygulamaları için en önemli sonucu, malzemenin rijitliğini 1 ile 100 arası arttırmasıdır [17]. Kristalizasyonda camlaşma gibi tersinirdir.

Sıcaklığın azalmasıyla polimer zinciri daha sıralı bir konum alır ve kristalizasyon gerçekleşir. Kristalizasyon düzenli yapıya ihtiyaç duyar. Kristalleşme oranı ek olarak katılan plastikleştirici ile artabilir. NR formülasyonundaki sülfür seviyesi kristalizasyonu belirgin bir şekilde değiştirir. 0,5 phr seviyesinde sülfür içeren bileşiğe göre 2,5 phr sülfür içeren bileşiğin kristalizasyon oranı ciddi oranda azdır [19]. Doğal kauçuk bileşiklerinde vulkanize olmamış durumda uzama esnasında kristalize olma kabiliyeti gözlenmektedir. Bu duruma öz takviye denir ve vulkanize olmamış haldeki ham (green) dayanımı arttırır. Kristalizasyon terimi ayrıca oda sıcaklığında CR ve NR malzemelerinin uzama esnasındaki davranışını tanımlamak içinde kullanılır. Uzama sırasında polimer zincirinde düzgün hizalaşma oluşur. Bu durum hızlı gerçekleşir ve bu duruma gerinim kaynaklı kristalizasyon (strain induced crystallization) denilmektedir. Kristalleşen bölgeler gerinim ortadan kalktıktan sonra çözülerek eski hallerine geri dönerler [19].

Yüksek sıcaklık altındaki etki

Yeterli miktarda yüksek sıcaklığa maruz kalan her elastomer malzemede bozunma reaksiyonları gerçekleşir ve bu durumda elastomer mekanik özelliklerini yitirmeye başlar. Kısmen yüksek sıcaklığa maruz kalanlarda ise çapraz bağlarda değişiklik yada ek olarak çapraz bağ oluşumları nedeniyle düzenin bozulması kauçukta sertleşmelere yol açabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda; çapraz bağlardaki ayrılma çapraz bağ yapısına ağır gelir ve yapıda bozulma olur, kauçuk ağ yapısında yumuşama gerçekleşir. Çok yüksek sıcaklıklarda ise moleküler zincir bozulur, kauçukta kömürleşme ve gevrekleşme oluşur [17].

Çizelge 3.2. Farklı kauçuk malzemelerinin maksimum çalışma sıcaklıkları [17]

Maksimum Çalışma Sıcaklığı [°C]	Kauçuk Tipi
75	Poliüretan (Polyurethane)
	Stiren-butadien kauçuğu (Styrene-butadiene rubber)
85	Butadien kauçuğu (Butadiene rubber)
	Doğal kauçuk (Natural rubber)
100	Polikloropren (Polychloroprene)
125	Epiklorhidrin (Epichlorohydrin)
	Nitril kauçuğu (Nitrile-rubber)
	Butil kauçuğu (Butyl rubber)
	Etilen - propilen dien monomeri (Ethylene - propylene diene monomer)
150	Klorosülfanlanmış polietilen (Chlorosulfonated polyethylene)
	Hidrojenlenmiş nitril kauçuğu (Hydrogenated nitrile rubber)
	Poliakrilik kauçuğu (Polyacrylic rubber)
200	Florlu elastomerler (Fluoroelastomers)
	Florosilikon kauçuğu (Fluorosilicone rubber)
	Terfloro elastomer kopolimeri (Terfluoroelastomer copolymer)
	Tetrafloro etilen - propilen kopolimeri (Tetrafluoroethylene - propylene copolymer)
250	Silikon kauçuk (Silicone rubber)
300	Perfloro elastomer (Perfluoroelastomer)

Yukarıda verilen Çizelge 3.2'ye bakıldığında rulmanlarda yaygın olarak kullanılan NBR, ACM, HNBR, FKM gibi elastomer sızdırmazlık elemanlarının sırasıyla maksimum çalışma sıcaklıkları; 125 °C, 150 °C, 150°C, 200°C'dir.

Ortamda oksijenin varlığı, çalışma sıcaklıklarında çok önemlidir. Oksijensiz bir ortamda çalışan çoğu kauçuk malzeme, 175 °C sıcaklıklara kadar dayanabilir. Fakat oksijen içeren ortamlarda bu dayanılan sıcaklık çoğu kauçuk için ciddi şekilde azalır [17]. Bu durum yukarıdaki çizelgede verilen kauçuk tiplerinin dayanabildiği sıcaklıklara bakıldığında görülebilir.

3.2. Kauçuk Malzeme Çeşitleri

Aşağıda Çizelge 3.3'te kauçuk esaslı malzeme çeşitleri verilmiştir. Genel olarak kullanım alanları ve standartta kullanılan kauçuk esaslı malzemelerin isimlendirmeleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kauçuk malzeme çeşitleri [18]

ISO	ASTM	Sembol Grup	İsim	Örnek	Açıklamalar
NR	NR		Doğal Kauçuk		Yüksek esneklik, abrazyon direnci, mekanik ekipmanlarda az kullanımı var.
CR	CR	R	Polikloropren	Neoprene	Mekanik ekipmanlarda az kullanılıyor
IIR	IIR	R	Bütül		Yüksek sızdırmazlık; mineral, yağlara dayanıklı değil
NBR	NBR	R	Akrilonitril		En yaygın sızdırmazlık malzemesi, mineral yağ direnci, yüksek olmayan sıcaklık aralığı
AU	AU	U	Poliester poliüretan		Yüksek abrazyon direnci; kısıtlı sıcaklıklarda; sıcak suda bozunur
EU	EU	U	Polieter poliüretan		
EPM	EPDM	M	etilen-propilen kopolimer		Sıcak su, buharlı ortam ve fosfat esterler için iyi, mineral yağ veya diesterler için uygun değil
ACM	ACM	M	Poliakrilat		Otomotiv sistemleri için uygun, ekonomik
AEM	AEM	M	Etilen akrilik		
HNBR	HNBR	R	Hidrojenlenmiş akrilonitril		NBR malzemesine göre daha iyi sıcaklık ve kimyasal direnç
MQ	MQ	Q	Silikon		Geniş bir çalışma sıcaklığı aralığı, FMQ yağ direnci, düşük abrazyon direnci
VMQ	VMQ	Q	Vinil silikon		
PMQ	PMQ	Q	Fenil silikon		
FMQ	FMQ	Q	Flor silikon		
FPM	FKM	M	Florlu elastomer	Viton	Yüksek sıcaklık ve kimyasal direnci, sınırlı su/buhar direnci; artan florlanma ko/ter/tetra polimerleri ile bu dayanım geliştirilebilir. Kompresyonda kalıcı ezilme dayanımı zayıf olabilir.
FPEM	FPEM	M	Tetrafloretilen-propilen	Aflas	Yüksek sıcaklık ve kimyasal direnç, su/buhar ve aminlerde dahil, kompresyonda kalıcı ezilme dayanımı zayıf olabilir
FFPM	FFKM	M	Perfloro elastomer	Kalrez	Aşırı kimyevi ve sıcaklık direnci. Çok pahalı, kompresyonda kalıcı ezilme dayanımı zayıf olabilir.

3.2.1. Doğal kauçuk (NR)

Doğal kauçuk 200'den fazla farklı bitki türünden elde edilebilir, şaşırtıcı olarak doğal kauçuk hindiba bitkisindedir elde edilebilir. Ticari olarak belirgin olan tek ağaç kaynağı ise Hevea Brasiliensis ağacıdır. Bu türün yetiştirme sahası tropikal bölgelerin bol yağış alan yerleridir. Dünya üretiminin çoğu Asya kıtasından sağlanmaktadır. Lateks doğal kauçuğun sıvımsı ince çözütüdür (koloidal) ve ağaç gövdelerinin kabuk altından kaplara akıtılarak elde edilir. Lateks tipik olarak %30-40 ağırlığında kuru kauçuk içerir, %10-20 ağırlığındaki lateks ise kremleşme yada santrifüjleme nedeniyle yoğunlaşır ve lateks formu içinde kullanılır. Tarihsel olarak bu şekildeki lateks, tüketici ülkelere ihraç edilirdi fakat yüksek oranda su içeren bir ürün olduğundan lateks alan şirketlere bu ürünü ulaştırmak pahalı bir işti. Tüketici şirketler lateks işleme fabrikalarını artan bir şekilde kauçuk üretici şirketlerin olduğu ülkelere kurmaya başladılar. Dolayısıyla ucuz işçiliğin yanında ulaştırma masraflarından da yarar sağladılar [20].

Doğal kauçuğun özellikleri:

- 1) Yüksek derecede kopma mukavemeti
- 2) Yüksek çığ dirilik (çığ hamur mukavemeti)
- 3) Yüksek yırtılma mukavemeti
- 4) Yüksek aşınma direnci
- 5) Düşük sıcaklık direnci
- 6) İyi dinamik özellikler
- 7) Yüksek elastikiyet
- 8) Düşük kalıcı deformasyon değerleri ve yayılma [21]

Doğal kauçuğun 2/3'ü otomobil lastiği üretiminde, kalan kısmı mekanik parçalar, ayakkabı tabanı (özellikle yüksek kalitede spor ayakkabıları), hortum, konveyör bant, yer döşemesi, sünger ve yapıştırıcı imalatında kullanılmaktadır. Doğal kauçuğun camsı geçiş sıcaklığının (T_g) -75°C civarında olması, düşük sıcaklık özelliklerinin çok iyi olmasını sağlamaktadır [21].

3.2.2. Nitril bütadien kauçuk (NBR)

Nitril kauçukları; bütadien ve akrilonitrilin kopolimeridir, emülsiyon polimerizasyonu ile üretilir, sıcak ve soğuk polimerizasyon tipleri mevcuttur. Sıcak polimerleşmiş tipler genelde soğuk polimerleşmiş tiplere göre daha yüksek ham dayanıma ve hafif daha zor işleme özelliğine sahiptir. Akrilonitrilin polimer omurgasına girişi yağ direncini verir ve diğer birçok özelliği etkiler. Akrilonitril (ACN) derecesi ticari olarak NBR malzemesinin içinde %18-50 oranında bulunmaktadır [20]. NBR malzemesinde bulunan akrilonitril yüzdesi aşağıdaki temel sınıf tanımlarını oluşturmaktadır;

Düşük: %18-24 ACN
Orta düşük: %26-28 ACN
Orta: 34% ACN
Orta yüksek: %38-40 ACN
Yüksek: % 50ACN

Polimer, akrilonitril birimlerindeki polar nitril gruplarından dolayı yağlara ve çözücülere karşı dirençlidir. Kauçuk içerisindeki akrilonitril oranı ayarlanarak çok farklı amaçlarla kullanılacak elastomerler hazırlanabilir. Aşağıda Çizelge 3.4'te akrilonitril içeriğinin malzeme özelliklerine etkisi verilmiştir.

Çizelge 3.4. Akrilonitril yüzdesinin elastomer malzeme özelliklerine etkisi [20]

	% Akrilonitril içeriği %18 --> %50
Yağ direncinin geliştirilmesi	-->
Yakıt direncinin geliştirilmesi	-->
Çekme dayanımının geliştirilmesi	-->
Sertlik artışı	-->
Abrazyon direncinin geliştirilmesi	-->
Gaz geçirmezliğinin geliştirilmesi	-->
Isı direncinin geliştirilmesi	-->
Düşük sıcaklıktaki esnekliğin geliştirilmesi	<--
Elastikiyetin geliştirilmesi	<--
Plastikleştirici uyumu	-->

%18 ACN kopolimeri camsı geçiş sıcaklığı T_g -38°C ve %50 ACN kopolimeri T_g sıcaklığı ise -2°C 'dir [20].

Akrilonitril içeriğinin artması ile T_g sıcaklığında yükselme, elastikiyet özelliğinde azalma, düşük kalıp şişmesi, düşük gaz geçirgenliği, ısı direncinde ve dayanımda artış görülür. Nitril kauçukları yaygın olarak yakıt ve yağ hortumları ve sızdırmazlık elemanlarında kullanılır. Bütadien kısmındaki doymamışlık nedeniyle, NBR oksijen ve ozon tarafından saldırılmaya müsaittir. Malzemenin yaşlanma davranışı az miktarda polivinilklorür ile karışması ile geliştirilebilir [17]. NBR'nin yaygın olarak kullanımının sebebi diğer polimerlere nazaran düşük maliyetiyle iyi bir yağ ve abrazyon direncinin olmasıdır. Fiyat/fonksiyon dengesi yönünden tercih edilir. NBR malzemesi keçe uygulamalarının büyük bir kısmı için önerilen, yağ ve greslere dayanıklı, genel amaçlı bir malzemedir. Glikol esaslı fren yağlarına ve EP katkılı yağlara direnci zayıftır [21]. En büyük dezavantajı ise ısı direncinin yüksek sıcaklıklarda olmamasıdır. Yüksek sıcaklıklarda NBR malzeme sertleşir ve çatlar, şaft ile olan sızdırmazlık sıklığını kaybeder, bu koşullarda sızdırmazlık yetersiz olur. Pratik sıcaklık aralığı, dönen şaft sızdırmazlık elemanları için -40 ile +110°C arasındadır [22].

3.2.3. Hidrojen akronitril bütadien kauçuk (HNBR)

Nitril kauçuğuna hidrojen eklenerek (hidrojenlenmiş) doymamış kısmı elimine etmek için NBR malzemesine hidrojen eklenir. Bu işlem sonucunda malzemenin yaşlandırma ve ısı direnci özellikleri iyi bir şekilde gelişir, yakıtta karşı direnç korunur. HNBR özellikle yüksek sıcaklıklarda hidrokarbonlara direnç gerektiren petrol alanı uygulamalarında kullanılır [17]. HNBR özellikleri hidrojenlenme derecesine göre değişir. Hidrojenlenme nedeniyle polimerin doymamış yüzdesi azalır, HNBR ozon saldırısına ve yüksek ısı direncine karşı gelişme gösterir. Düşük doymamışlık seviyesi nedeniyle HNBR iyi sıcak su ve buhar direnci gösterir. Doğru ACN seviyesi seçilirse, HNBR metanol ve metanol/hidrokarbon karışımları ile kullanıma uygundur [23]. HNBR polimeri konvansiyonel NBR polimerine göre yaklaşık olarak 15 kat daha pahalıdır [22]. HNBR 150°C çalışma sıcaklığına kadar sürekli çalışma özelliğine sahiptir [20].

3.2.4. Poliakrilik kauçukları (ACM)

Bu polimerler akrilik ester ve kütleme bölgesi monomerinin (cure site monomer) kopolimerizasyonu ile oluşur. Alkil akrilatların homopolimerlerinin özellikleri, alkil kökündeki karbon atomu sayısına göre değişmektedir.

Karbon atom sayısı 10 adeti aşana kadar, karbon atom sayısının artmasıyla T_g sıcaklığı, oda sıcaklığından sıfırın oldukça altı sıcaklıklara düşmektedir. Fakat yan zincirdeki karbon atomu sayısının artmasıyla yağ direnci özelliği azalır. Alkil kökündeki karbon atomları yerine oksijen atomlarının geçmesi ile yağ direnci artar. Akrilik ester seçimi buna bağlı olarak polaritesi; polimerin düşük derece esnekliğini, ısı ve kimyasal direncini belirler. Hem alkili hemde alkoksi akrilik esterler monomer olarak kullanılırlar. Akrilik esterler arasında, etil akrilat en yüksek polariteye sahiptir ve bu yüzden en iyi yağ ve ısı direncini verir, fakat en düşük sıcaklık performansını gösterir. Düşük sıcaklık özellikleri alkil akrilik esterin etilden butile değişmesi ile gelişir, fakat bu durum ısı stabilizasyonu ve yağ direnci zararlıdır. Bu özelliklerle bir uzlaşmayı başarmak, karıştırılmış alkil akriliklerin kopolimerizasyonuyla mümkündür. Alkoksil akrilik esterler gelişmiş düşük sıcaklık özellikleri sunar. Ana zincir doymamışlığının olmaması iyi bir oksijen, ozon ve ışık direnci sunarken, polarite kopolimere yağ karşı dirençte katkı sağlar.

Akrilatların sızdırmazlık uygulamalarında ana kullanım sebebi nitril kauçuğuna göre gelişmiş ısı stabilizasyonu özelliğidir. Otomotiv transmisyon keçeleri en yaygın kullanım alanıdır. Otomotiv uygulamalarındaki diğer kullanım yerleri; O-ring, hortum, boru, kablo kaplama, buji koruyucu kılıfı gibi yerlerdir [20]. ACM polimerlerinin maliyeti NBR maliyetinin 2,5 katıdır, fakat yüksek sıcaklıklarda (örn;120-150°C) daha iyi performans gösterirler. Poliakrilikler dişli yağlarındaki EP katkılarına karşı dayanıklıdır ve sülfür ve peroksitle vulkanize edilmiş NBR bileşikleri yerine tercih edilir. Motor ve aktarma organı sıvılarında fonksiyonunu kaybetmeden 150 °C sıcaklığa kadar çalışabilir. Poliakrilikler; suya, asitlere, bazlara ve polar çözücülere maruz kaldığında önerilmez. Ayrıca nem de malzemenin özelliklerini etkileyebilir [22]. Düşük sıcaklık uygulamalarında poliakriliklik malzeme seçimi yaparken çok dikkatli olunmalıdır.

Bazı temel (base) polimerler -15°C'de gevrekleşir ve kırılır. Diğer polimerler fonksiyonlarını iyi bir şekilde -40°C'de yerine getirebilir [24]. Poliakrilikler aynı zamanda zayıf kuru çalışma karakteristiği, erken bozulmalara yol açan geniş çaplı aşınmalara yol açabilir [22].

3.2.5. Floro karbon kauçuk (FKM)

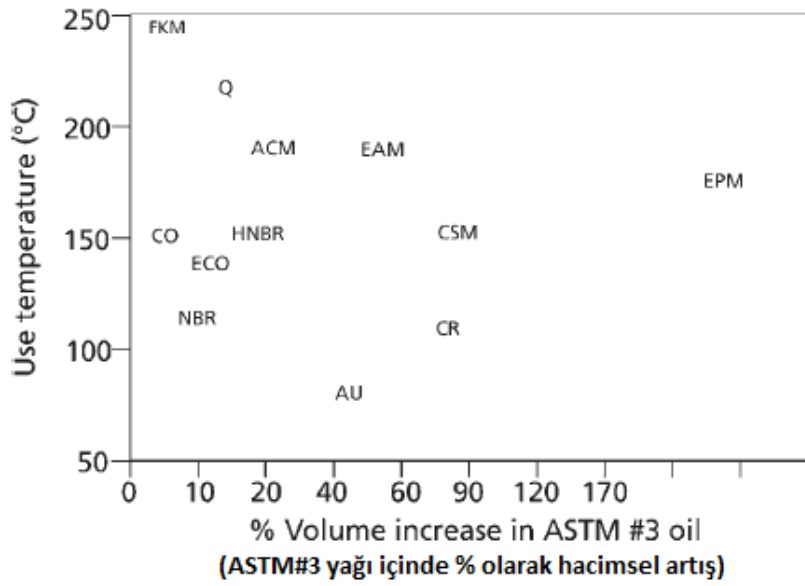
Floro elastomerler; floropolimer kauçuklarının ailesindedir ve tek bir unsur olarak değerlendirilmez. Floro elastomerler içerdikleri florin miktarına göre sırasıyla %66, %68,%70 florinli olarak sınıflandırılabilir. Peroksit ile kürlenmiş floro elastomerler tabiatı gereği daha iyi su, buhar ve asit direncine sahiptir [23].

Vulkanize olmuş FKM polimerleri boyutsal olarak stabildir ve saldırgan (hostile) ortamlarda, yağlar ve çözücüler gibi çeşitli organik sıvıların içinde kimyasal olarak etkilenmezler. Bu kimyasal direnç geniş bir sıcaklık aralığını kapsamaktadır. Buna ek olarak, vulkanize olmuş FKM polimeri düşük yüzey enerjisi nedeniyle sıra dışı bir kendinden yağlama özelliği gösterir. FKM elastomerleri üç prosedürden biri ile vulkanize edilebilir. Bunlar; diamin, bizfenol-onyum, peroksit kürlenme (vulkanizasyon) ajanlarıdır. Bizfenol-onyum kür sistemi en yaygın kullanılanıdır.

FKM pahalı bir malzeme olmasının yanında, nitril malzeme maliyetinin yaklaşık 22,5 katıdır. Dönen şaft ve keçe uygulamalarında gitgide FKM kullanımı artmaktadır. Bunun nedeni FKM malzemesinin mükemmel yağ ve kimyasal dirence sahip olması ve bu sayede düşük şişme (kabarma) özelliği göstermesidir. FKM malzemesinin yüksek sıcaklık özellikleri ve mükemmel abrazyon dayanımı vardır. Bu malzeme düşük sıcaklıklarda çatlamaz fakat rijit hale gelebilir. Sürtünme ısısı elastomeri ısıtana kadar düşük sıcaklıklarda şaftın yalpalamasını ve titreşimini karşılayamayabilir. FKM bileşikleri seyrek (kıt) yağlama ile yüksek hız, yüksek sıcaklık uygulamaları için tavsiye edilir [22]. FKM polimerinin başlıca kullanım alanı otomotiv endüstrisidir. Bu kullanım; motor, contalar ve yakıt sistemi bileşenlerini (boru ve o-ring gibi) içermektedir. Bu uygulama yüksek sıcaklıkta kullanım, alkol içeren yakıtlar ve agresif yağlayıcılar nedeniyle artan talepler tarafından teşvik edilmektedir. Diğer ana segmentler; petrol, petrokimyasal, endüstriyel kirlilik kontrolü ve endüstriyel hidrolik ve pnömatik uygulamalarıdır [24]. Birleşik Devletlerde floro karbon kauçuğu Viton ticari adıyla iyi bilinen bir kauçuktur. Dupont literatürü sürekli kuru çalışma sıcaklığı 232°C sıcaklıkta 3000 saatten fazla çalışacağından ve 316°C sıcaklıkta 48 saate bu sürenin düştüğünden bahsetmektedir. Konvansiyonel dinamik uygulamalarda FKM genelde -20°C sıcaklığa kadar kullanılabilirken, statik uygulamalarda bu sıcaklık daha da düşebilir [24].

FKM sınıflarındaki başlıca değişken elastomer molekülündeki florin seviyesidir. Terpolimerler kopolimerlerden daha yüksek florine sahip olmaya eğilimlidir ve bu yüzden çeşitli ortamlara karşı daha iyi dirence sahiptir. Genel olarak floro elastomerleri mükemmel bir oksidasyon, ozon, yakıt, ve petrol kökenli yağ ve yüksek konsantrasyonlu çoğu aside karşı dirence sahiptir. FKM malzemesinin çoğu kimyasala karşı iyi bir direnci olmasına rağmen, bazı polar çözücüler içinde (düşük moleküler ağırlıklı eterler, esterler ve ketonlar gibi) aşırı kabarma (şişme) oluşur. Alkaliler ve aminler gibi kimyasallar ile dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda standart floro karbon sınıflı FKM malzemesini, alkaliler sertleştirir ve bunun sonucunda gevrekleşme ve çatlaklar oluşabilir. Alev ortadan kalktığına FKM malzemesi kendi kendine sönen bir özelliği vardır. Yangın nedeniyle yıkıcı sonuçların olacağı kömür madenleri gibi ortamlarda bu özellik faydalı bir durumdur. Alev kaynağı (metan gazı patlaması gibi) ortadan kalktığına diğer elastomerler kontrol dışı yanabilir [19].

Floro polimerlerin ısı direnci ve kimyasal direnci ana olarak florlanma derecesine (boyutuna) göre değişmektedir. Örneğin çoğu floro karbon %50-70 arası florin içermekte, kimyasal direnci daha iyi olanlar %65-69 arası içermektedir. Karşılaştırma amacıyla, floro silikonlar %36 oranında florin içermektedir. Floro karbonlar 250 °C çalışma sıcaklığında kauçuklar arasında en iyi ısı stabilizasyonu veren kauçuktur. Grup olarak floro karbonlar alifatiklere, aromatiklere, klorlanmış hidrokarbonlara ve çoğu yağ ve aside karşı dayanıklıdır. Ayrıca floro karbonlar ozon, oksijen UV ışınlarına karşıda yüksek direnç gösterirler [20].



Şekil 3.4. Elastomer malzemelerin çalışma sıcaklıklarında ASTM#3 yağı içerisinde hacimsel kabarma yüzdeleri [24]

Yukarıda Şekil 3.4'te görüldüğü gibi FKM malzemesi yüksek sıcaklık altında ASTM#3 yağının içinde bulunduğu hacim artışı diğer elastomerlerin daha düşük sıcaklıklarda ki hacimsel şişmelerinden çok daha azdır. Buradan anlaşılacağı gibi FKM malzeme dış ortam ile reaksiyona girme konusunda çok kabiliyetli bir malzeme olmakla birlikte yüksek sıcaklıklar altında da güvenli olarak çalışabilen bir malzemedir. Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi FKM malzemesi kimyasal direnci yüksek bir malzemedir.



4. KAPAK SIKILIĞININ RULMAN SÜRTÜNMESİNE ETKİSİ

Yağlanmamış yüzeylerde yuvarlanma hareketi sebebiyle oluşan sürtünme, aynı yüzeylerin birbiri üzerinde kayma hareketi sonucu oluşan sürtünmeden azdır. Rulmanlı yataklarda kontak elemanları arasındaki hareketin saf yuvarlanma hareketinden daha kompleks olmasına rağmen rulmanlı yataklar; kıyaslanabilir boyut, hız ve yük taşıma özelliğine göre çoğu kaymalı yatağa nazaran daha az sürtünme gösterir. Bu genellemeye göre dikkate değer bir istisna hidrostatik yağlamalı yataklarıdır. Fakat bu tarz bir yatak rulmanlı bir yatak gibi kendi kendine çalışabilir değildir ve bu yatak sistemde kullanılacak ise kompleks pahalı bir yağ tedarik sistemi kullanılmalıdır.

Rulmanda oluşan herhangi bir sürtünme, hareketi engeller ve enerji kaybına neden olur. Çalışan bir rulmanda sürtünme; sıcaklık artışına sebep olur ve hareket kısıtlayıcı bir tork olarak ölçülebilir. Rulmanlardaki ana hareketin yuvarlanma olmasına rağmen orta veya ağır yüklenmiş bilyalı ve silindirik yuvarlanma elemanlı rulmanlarda, sürtünmenin daha büyük bir kaynağı deforme olmuş yuvarlanma elemanları ve yuvarlanma yolu arasındaki kayma hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu duruma ek olarak; konik makaralı rulmanlarda sürtünmenin ana kaynağı yuvarlanma elemanı kenarı ile konik iç bilezikteki geniş flanş kenarındaki kayma hareketidir. Silindirik makaralı rulmanlarda, yuvarlanma elemanları kenarları, iç ve dış bilezikteki kılavuz flanş arasındaki kayma hareketi sürtünmenin ana kaynağıdır. Yukarıdaki tüm durumlarda, oluşan sürtünmenin çoğu kullanılan yağlayıcı tipine bağlıdır. Sıvı yağlamalı rulmanlarda yağlayıcı rulman içindeki boşluğun bir kısmını doldurur ve dönen makara veya bilyaların yolunda bir direnç olur. Bu sürtünme kaynaklı direnç; yağlayıcı özelliklerinin, rulman boşluğunda bulunan yağlayıcı miktarı ve yuvarlanma elemanlarının hızına göre değişmektedir.

4.1. Rulmanlarda Sürtünme ve Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler

Rulman içindeki sürtünme rulman tarafından üretilen ısı miktarını belirler. Sürtünmenin miktarı; rulmana gelen yüklere, rulman boyut ve tipine, işletme devrine, yağlayıcı özelliğine ve miktarına göre değişmektedir.

Rulman içerisinde dönme hareketine karşı toplam direnç; kontak alanlarındaki yuvarlanma ve kayma sürtünmesinin, yuvarlanma elemanları ve yuvarlanma yolları arasındaki sürtünme, yuvarlanma elemanı ve kafes arasındaki sürtünmenin sonucudur. Sürtünme ayrıca yağlayıcı sürüklenmesi ve temaslı kapaklar nedeniyle oluşur [4].



Resim 4.1. Rulman ömrünü ve performansını doğrudan etkileyen bileşenler

Yukarıda Resim 4.1’de rulman ömrünü ve performansını etkileyen rulman bileşenleri gösterilmiştir. Rulmanlarda sürtünmenin başlıca kaynakları; Yuvarlanma elemanlarının (bilya, masura vb.) yuvarlanma hareketi (rolling) + yuvarlanma elemanının kayma hareketi (sliding) + yağlama yağı veya gresinden kaynaklanan sürtünme + temaslı sızdırmazlık elemanından (lastik kapak) kaynaklanan sürtünme olarak özetlenebilir.

Rulman sürtünmesi; rulmanın dönme hareketi yaptığıında, dönme hareketine direncinin toplamıdır. Örnek olarak; bir rulmanın iç dizaynı, yüzey parametreleri, kullanılan yağ veya gres cinsi ve miktarı aynıysa elastomer sızdırmazlık kapak sıklıkları birbirinden farklı ise sürtünme momentlerinde, bu rulmanların sürtünme değerlerindeki farkın bu farklılıklardan dolayı ortaya çıkması öngörülmektedir. Buna karşın, bu değişkenliklerin sürtünme üzerindeki etkilerini ayrı ayrı tespit edebilmek gerçekte zordur. Örneğin; bir rulmanın 1000 rpm ve 5000 rpm dönme hızında çalışırkenki koşulları aynı değildir. 5000 rpm hızında çalışırken rulman içindeki elemanlar 1000 rpm hızındaki duruma göre daha yüksek merkezkaç kuvvetine maruz kalır. Dolayısıyla gres, yuvarlanma elemanlarının kontak temas bölgelerinden dışarı doğru hareket eder. Rulmanın içine koyduğumuz gres tamamen istenilen yağlama bölgesinde (bilya ve yuvarlanma yolu arası) bulunmaz. Sonuç olarak rulman içindeki gresin dinamik bir davranışı vardır. Yağlayıcı miktarı ve cinsi rulmanlarda sürtünme için önemli bir başka değişkendir.

5000 ve 1000 rpm dönme hızında çalışan aynı iki rulmandan yüksek devirde çalışan rulmanın daha yüksek sıcaklıklara çıkar, dolayısıyla daha yüksek sıcaklıklarda yağlayıcının viskozitesi düşeceğinden daha ince bir yağ tabakasında çalışma gerçekleşir ve bu durumda rulman içindeki sürtünme davranışını etkiler. Sonuç olarak rulman sürtünmesi, birbirine bağlı değişkenlere bağlıdır ve bu konuda kesin yorumlar yapmak her zaman doğru değildir. Tasarlanan bir rulmanda gerçek sürtünme momenti hesaplanmak istenirse ve özellikle rulman lastik kapaklıysa, istenen koşullarda test yapılması gerekmektedir.

Rulman bileziklerinin yuvarlanma yolu radüs değerleri sürtünme momentini etkileyen bir iç dizayn parametresidir. Bilezik yuvarlanma yolu radüslerini büyütülürse, bilya ve yuvarlanma yolu kontak alanı küçülmüş olur. Daha küçük bir kontak alanı, daha düşük sürtünme elde etme yöntemlerindedir. Rulmanlarda yuvarlanma elemanlarını kafes tutar. Kafesler piyasada yaygın olarak çelik veya plastik malzeme olarak kullanılmaktadır. Plastik malzemenin çeliğe göre çok daha hafif olması, çelik kafeslerde olduğu gibi kafes bilya arasında metal-metal temasın olmaması, daha hafif bir sürtünme direnci elde edilmesini sağlar. Ayrıca plastik kafesler, perçinli çelik kafesli rulmanlara nazaran daha yüksek hızlı uygulamalarda kullanılırlar.

Rulmanların sürtünmesini diğer elemanlarından çok daha fazla etkileyen elastomer sızdırmazlık elemanı olan lastik kapaklar standart uygulamalarda rulmanların dış bileziğindeki kapak yuvasına pres ile çakılarak yerleştirilir. Montaj işlemi gerçekleştiğinde lastik kapak iç dudak, rulmanın iç bileziği ile temas halindedir. Buradaki lastik-metal kontağı sebebiyle, rulmanın diğer elemanlarının oluşturduğu sürtünme direncinden daha yüksek bir sürtünme ortaya çıkar. Çalışmanın bu bölümünde bu fark test sonuçları ile incelenmiştir. Buradaki lastik-metal temasında sürtünmeyi etkileyebilecek bir çok faktör mevcuttur.

Bunlar; elastomer kapak iç dudak geometrisi, elastomer malzeme cinsi, rulman iç bileziği kapak yuvası veya temasın gerçekleştiği bölgenin geometrisi ve önemli bir dizayn parametresi olan elastomer kapağın sızdırmazlık görevini yerine getirmek amacıyla iç bilezik metal yüzeyine yaptığı baskı kuvvetidir.

4.1.1. Bilyalı rulman sürtünme momenti modeli (Palmgren metodu)

Rulman sürtünme momentini matematiksel bir yaklaşımla analiz etmek ve hesaplamak dışında, Palmgren ampirik olarak farklı tip ve boyutlardaki rulmanların sürtünme momentlerini laboratuvar testleri kanalıyla hesaplamıştır. Bu testler; hafiften ağır yükler altında, yavaştan orta seviyedeki şaft hızlarında, çeşitli yağlayıcılar ve yağlama teknikleri ile yapılmıştır. Palmgren bu test sonuçlarını değerlendirirken ölçülen sürtünme momentlerini uygulanan yüke, viskoz özelliğine göre yağlayıcı tipine, kullanılmış yağlayıcı miktarı ve rulman dönüş devrine göre ayırmıştır. Palmgren'in metodu düşük ve orta seviyeli şaft hızlarında sürtünme momenti hesaplamakta kullanışlı olabilir [25].

Uygulanan yük nedeniyle oluşan tork

Palmgren bu momenti aşağıdaki denklem ile ifade etmiştir.

$$M_1 = f_1 F_\beta d_m \quad (4.1)$$

f_1 değeri rulman dizaynı ve rölatif yatak yüküne göre değişmektedir.

$$f_1 = z (F_s / C_s)^y \quad (4.2)$$

F_s eşdeğer statik yük ve C_s ise statik yük sayısıdır, z ve y değerleri aşağıda Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Rulman tiplerine göre f_1 değeri hesabı yapmak için gerekli olan katsayılar [25]

Rulman Tipi	Nominal Kontak Açısı [°]	z	y
Radyal Sabit Bilyalı	0	0,0004-0,0006 ^a	0,55
Açısal Temaslı	30-40	0,001	0,33
Eksenel	90	0,0008	0,33
Çift Sıralı, oynak	10	0,0003	0,40

^a Düşük değerler hafif rulman serilerine aittir, yüksek değerler ağır koşullu rulman serilerine aittir.

F_β değeri uygulanan yük ve yükün yönüne göre değişmektedir. Aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

Radyal rulmanlar için;

$$F_{\beta} = 0,9 F_a \cot\alpha - 0,1 F_r \text{ or } F_{\beta} = F_r \quad (4.3)$$

Kontak açısı sıfır olan tek sıralı sabit bilyalı radyal rulmanlar için yukarıdaki formül aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$F_{\beta} = 3F_a - 0,1 F_r \quad (4.4)$$

Eksenel bilyalı rulmanlar için ise;

$$F_{\beta} = F_a \quad (4.5)$$

Yağlayıcının viskoz sürtünmesi nedeniyle oluşan sürtünme

Palmgren orta hızlı rulmanlar için; yuvarlanma elemanlarının rulman boş hacminin bir kısmında bulunan viskoz yağlayıcı arasından geçerken neden olduğu sürtünmeyi tahmin edebilmek için aşağıdaki ampirik denklemi yayınlamıştır.

$$M_v = 10^{-7} f_0 (v_0 n)^{2/3} d_m^3 \quad v_0 n \geq 2000 \quad (4.6)$$

$$M_v = 160 \cdot 10^{-7} f_0 d_m^3 \quad v_0 n < 2000 \quad (4.7)$$

V_0 centistoke (Ct), n ise bir dakikadaki devir sayısıdır. f_0 değeri yağlama metodu ve rulman tipine göre değişen değişkendir ve aşağıda Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rulman tipi ve yağlama metotlarına göre f_0 değerleri [25]

Rulman Tipi	Gres	Sisli Yağ	Yağ Banyolu	Yağ Banyolu (Dikey Şaft) veya Yağ Jeti
Radyal Sabit Bilyalı	0,7-2 ^b	1	2	4
Oynak Bilyalı	1,5-2 ^b	0,7-1 ^b	1,5-2 ^b	3-4 ^b
Eksenel Bilyalı	5,5	0,8	1,5	3
Açısal Temas Bilyalı	2	1,7	3,3	6,6

^a İkili (eşli) rulmanlar veya çift sıralı rulmanlar için $2 \cdot f_0$ değeri kullanılır.

^b Düşük değerler hafif rulman serilerine aittir, yüksek değerler ağır koşullu rulman serilerine aittir.

Yukarıda M_v hesabında kullanılan iki denklem özgül ağırlığı $0,9 \text{ g/cm}^3$ olan yağlar için geçerlidir. Gresle yağlamalı rulmanlar için v_0 gres içindeki yağı ifade eder ve bu denklem gresli rulmanlar için gresin rulmana basıldıktan sonraki kısa bir süresi için geçerlidir. Çünkü uzun süre geçtikten sonra gres bozulur ve yağlayıcı özelliklerini yitirir. Yüke bağlı sürtünme momenti ve yağlayıcı sebebiyle oluşan sürtünmenin toplamı, toplam sürtünme değerini verir. Aşağıda toplam sürtünme denklemi verilmiştir. M_1 ve M_v denklemi ampirik hesaplamalardır, yuvarlanma elemanı ile kafes cebi arasındaki kayma hareketi bu denklemlere dahildir [25].

$$M = M_1 + M_v \quad (4.8)$$

4.2. 6008 Rulmanın Farklı Elastomer Kapak Sıkılıklarında Sürtünme Momentinin İncelenmesi

Bu çalışmanın deneysel kısmında; seçilen bir rulman tipinde kullanılan elastomer sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan elastomer kapak sıkılığının, rulmanın çalışma esnasında sürtünme momentine etkisi incelendi. Bu çalışma için test edilmek üzere 6008 RSR (rubber seal radial) lastik kapak tipindeki rulman seçilmiştir.



Resim 4.2. Testlerde kullanılan NBR kapaklı ve kapaksız (açık) 6008 rulmanı

Yukarıda Resim 4.2’de çalışmada kullanılan 6008 rulmanı resmi verilmiştir. Radyal temaslı kapak tasarımı kullanılmasının en önemli nedeni; taşlama operasyonu sayesinde kapak sıkılıklarının, radyal temaslı kapak tasarımlarında daha dar tolerans aralıklarında elde edilmesidir. Lastik kapağın iç dudağının temas ettiği metal iç bilezik yüzeyi taşlanarak istenilen ölçülere getirilmektedir.

İstenilen kapak sıklık değerleri, taşlama işlemi ile rulman iç bilezik omuz çapından fazla yada az talaş kaldırılarak daha hassas bir şekilde elde edilmiştir. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi kapak yuvası tasarımları sadece radyal yönde bir kapak sıklığına sahip değildir. RSR dizayndan farklı kapak dizaynları için radyal ve aksenal elastomer kapak teması aynı anda gerçekleşebilir yada sadece aksenal bir temas olabilir. Bu tip dizaynlarda kapak yuvası; kapak yuvası şekline göre tasarımı yapılmış form uçlar ile torna operasyonunda açılmaktadır. Torna operasyonu toleransları, taşlama operasyonlarına göre daha geniş olduğundan bu çalışmada istenilen ölçülerin hassas olarak yakalanması torna operasyonunda çok daha zordur. Radyal temasa sahip elastomer kapaklarla çalışmak, bu çalışmada farklı kapak sıklıklarının rulmanların sürtünme momentine etkisini daha iyi ortaya çıkaracağı düşünülmüştür. Bu çalışmada RSR kapak dizaynı için belirlenen dört farklı kapak sıklık değeri belirlenmiştir ve bu sıklık değerlerinin elde edilmesi için rulman iç bilezik omuz çapları özel olarak taşlanarak istenilen ölçülere getirilmiştir. Bu omuz çaplarının taşlanması işlemi, 1µm hassasiyetle talaş kaldırabilen puntasız taşlama tezgahında gerçekleştirilmiştir.



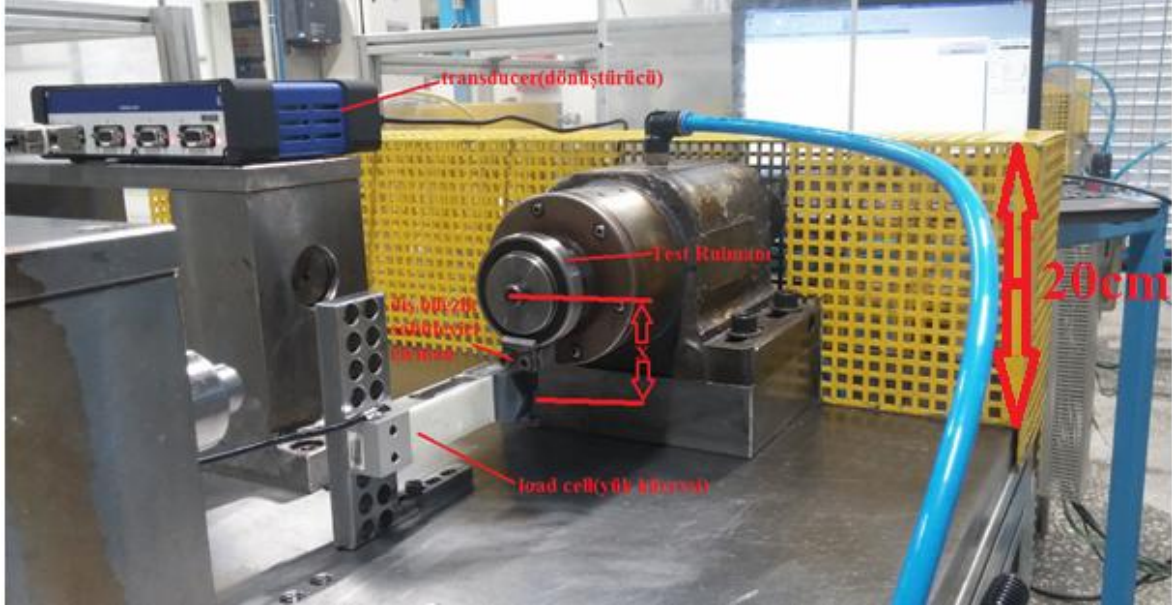
Resim 4.3. Puntasız taşlama tezgahında iç bileziklerin omuz taşlama işlemi

Yukarıda Resim 4.3’te puntasız taşlama tezgahında iç bileziklerin omuz taşlama işlemi verilmiştir. İmalat işlemi sonrası bileziklerin omuz çapları ölçülerek dizayn resmindeki istenilen ölçü değerinden farkları belirlenmiştir. Bu farklar her bir kapak sıklığı grubu için 5 ile 10 µm düzeyini geçmemektedir. Rulmanlarda kullanılan lastik kapakların kapak sıklığını etkileyecek ve kapak dizaynına göre değişecek kapak iç çap, kapak temas noktası eni gibi ölçülerin önceden belirlenmiş toleranslar aralığında olması, nominal ölçüye yakınlığı önemlidir. Çünkü bu değerler rulman elastomer kapak sıklığını doğrudan etkileyecek değişkenlerdir.

Bundan dolayı RSR dizayn kapakların iç dudak delik çapları karşılıklı 2x2 noktadan ölçülmüştür ve ölçülen değerlerin ortalamaları alınarak elastomer kapak iç dudak delik çapları belirlenmiştir. Bu ölçüm şekliyle lastik kapağın dairesellik özelliğindedir kabaca bakılmıştır. Rulmandaki gerçek kapak sıklığı; iç bileziğe temas eden lastik kapak yüzeyi ile metal yüzeyin üç boyutlu olarak tamamen temas ettiği noktalar arası sıklıktır. Pratikte bu tip bir ölçüm yaparak sıklık değeri elde etmek mümkün olmamaktadır.

4.3. Sürtünme Momenti Test Düzenegi

Bu çalışma için yapılan testlerde kullanılan rulmanlarda oluşan sürtünme momentini ölçen test düzenegi aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



Resim 4.4. Sürtünme momenti test düzenegi

Yukarıda Resim 4.4'te görüldüğü üzere rulman dış bileziği bir sabitleyici ile sabit hale getirilmekte, dönme hareketi yapması engellenmektedir. Rulman iç bileziği ise test düzenegi fener miline (spindle) yerleştirilmiştir. İç bilezik dönme hareketi yapmaktadır ve rulman devir sayısı elektrik motor-kayış kasnak mekanizması yardımıyla ayarlanmaktadır. İç bilezik döndüğünde rulman içindeki kafes ile muhafaza edilen yuvarlanma elemanları ve kafes dönme hareketi yapmaktadır, ayrıca rulman içindeki gres dinamik olarak sürekli hareket halindedir. Gres hareket ederken sürekli olarak kafes, yuvarlanma elemanları ve yuvarlanma yoluna temas ederek hareket eder.

Rulman lastik kapaklıysa; kapak iç dudağı, iç bilezik ile temas halindedir ve rulmanın dönme hareketini engellemeye çalışacaktır. Yuvarlanma elemanlarının bilezik yuvarlanma yolu ile temasında kaynaklanan bir sürtünmede vardır. Fakat gres temel görevi olarak bu iki yüzey arasına girerek metal-metal temasını engellemektedir. Gresin dönme hareketine karşı bir direnci vardır, ne kadar viskoz bir gres rulman içinde kullanılırsa, gres kaynaklı sürtünme kaybı o kadar fazla olmaktadır. Bu etkilerin toplam yarattığı dönmeye karşı direnç kuvveti; rulman dış bileziği sabitlendiğinden, dış bilezik sabitleyiciye bağlı cıvata ile bir yük hücresine (load cell) aktarılır. Burada yük hücresi rulman içinde oluşan sürtünme kuvvetini ölçer.

Bu çalışmada kullanılan yük hücresi tek noktalı ve 5 kgf kuvvete kadar ölçüm yapabilen hassas bir yük hücresidir. Tek noktalı yük hücreleri, çoğunlukla küçük ölçekli tip ağırlık kontrolü gerektiren proses uygulamalarında kullanım için tasarlanmıştır. Tek noktalı denmesinin nedeni, merkezden kaçık yüklemenin söz konusu olduğu uygulamalarda sadece tek bir sensör kullanılarak ölçüm yapılabilmesidir. Bu özel yük hücresi tasarımının diğerlerine göre avantajı ince olması, yüksek hassasiyete sahip olması ve merkezden kaçık yükler için kullanılabilir olmasıdır. Bu tip yük hücrelerinin montajı genellikle kolaydır.

Test düzeneğinde yük hücresine bağlı çevirici (transducer) yük hücresinin ölçtüğü kuvveti test öncesi belirlenen bir ölçüm frekansı ile kaydeder. Kaydedilen bu kuvvet verileri, basit bir formül ile moment değerine çevirmektedir. Yukarıda Resim 4.4'te gösterilen dış bilezik sabitleyiciye bağlı cıvatanın yük hücresine temas ettiği "x" mesafesi moment koludur. Bu mesafenin test öncesi doğru ölçülmesi gerekmektedir. Aşağıda örnek bir kuvvet moment dönüşümü verilmiştir. Örneğin; yük hücresinin rulmanda oluşan toplam sürtünme kuvvetini 0,1 kgf olarak ölçtüğü kabul edilirse;

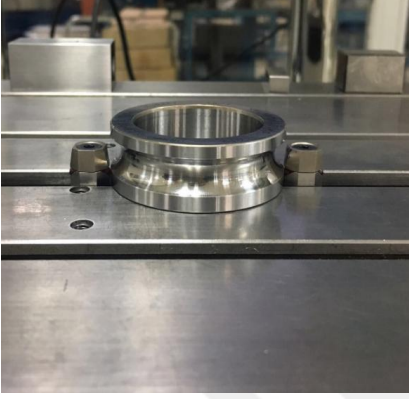
$$\text{Ölçülen kuvvet [kgf]} * \text{yerçekimi ivmesi [m/s}^2] * \text{moment kolu [mm]} = \text{Sürtünme momenti [Nmm]} \quad (4.9)$$

$$0,1 \text{ kgf} * 9,81 \text{ m/s}^2 * 65 \text{ mm} = 63,76 \text{ Nmm}$$

Yukarıda Resim 4.4'te verilen test düzeneğinin amacı; rulman dönerken içinde gerçekleşen dönmeye karşı oluşan toplam sürtünme direncinin ölçülmesidir.

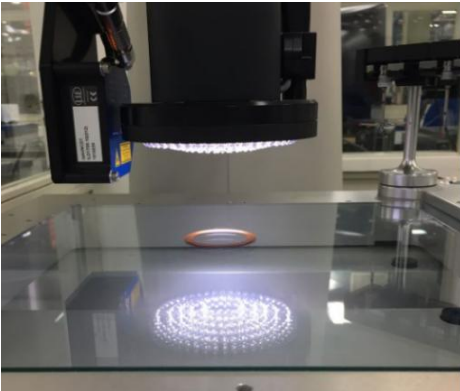
4.4. Test Numunelerinin Hazırlanması

Testlerde kullanılan her rulmanın iç bilezik omuz çapı ve kapak delik çapının ölçümleri yapıldı, fakat bu değerler ORS firmasına ait bir iç dizayn parametresi olduğundan ölçülen değerler bu çalışmada paylaşılmamıştır.



Resim 4.5. İç bilezik omuz çapı ölçümü

Yukarıda Resim 4.5'te iç bilezik omuz çapı ölçümü gösterilmiştir. Üniversal ölçüm tezgahına yerleştirilen iç bilezik omuz çapına tezgahdaki ölçüm uçları temas ettirilir. İki uç arasındaki mesafe iç bilezik omuz çapıdır ve ölçüm tezgahı ekranından okunur. Yüksek hassasiyete sahip bu ölçüm tezgahı hassasiyeti $0,05 \mu\text{m}$ gibi çok düşük bir değerdir. Bu tip tezgahlarda kontrol mastarları, kumpaslar, mikrometrelerin ölçümü gibi daha hassas ölçüm toleranslı işlemlerde yapılabilmektedir.



Resim 4.6. Lastik kapak iç çap ölçümü

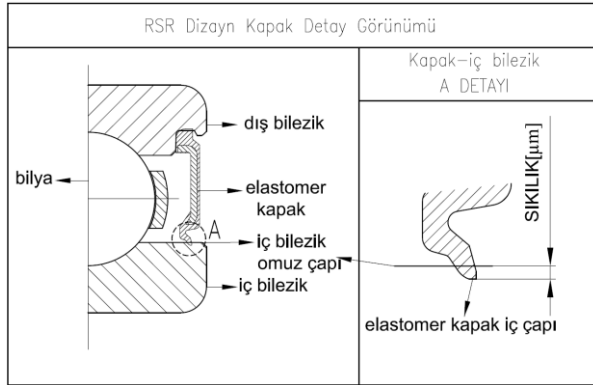
Yukarıda Resim 4.6'da lastik kapak iç çap ölçümü gösterilmiştir. Bu ölçümler programlanabilir optik yakınlaştırıcı ve lazerli ölçüm yöntemi ile yapılmaktadır.

Optik kameralı lazerli ölçüm tezgahı ölçüm çözünürlüğü (scale resolution) 0,1 μm gibi çok hassas bir değerdir. Bu ölçüm tezgahında kapak dışında diğer rulman elemanlarının ölçümleri de yapılmaktadır.



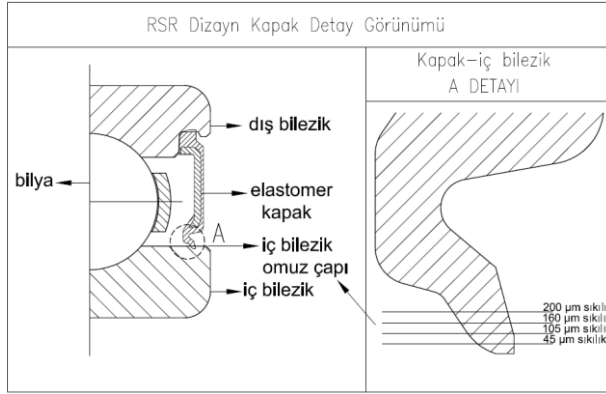
Resim 4.7. 6008 iç bilezik taşlanmış omuz yüzeyi

Yukarıda Resim 4.7’de 6008 rulmanı taşlanmış iç bilezik omuz çapı gösterilmiştir. Kapağın temas edeceği bu yüzeyin taşlama kalitesi önemlidir. Sürtünme oluşan yüzey kapak ile taşlanmış omuz arasındadır.



Şekil 4.1. Radyal temaslı kapak tasarımının sıklık gösterimi

Yukarıda Şekil 4.1’den anlaşılacağı üzere sadece radyal sıklığa sahip olan elastomer kapak dizaynlarında kapak sıklığını hassas olarak ayarlamak diğer kapak dizaynlarına göre daha kolaydır. Çünkü bu dizayn tipinde iç bilezik omuz çapı taşlama operasyonu ile hassas olarak elde edilmektedir. Daha farklı kapak yuvası geometrilerine sahip kapak dizaynlarında (örn; aksel baskıya sahip dizaynlar) torna operasyonu ile istenen geometri elde edilmektedir. Bu durumda taşlama operasyonuna göre ölçü hassasiyeti daha düşüktür.



Şekil 4.2. Testlerde kullanılan farklı kapak sıklıklarının gösterimi

RSR dizayn kapaklarda kapak sıklığını elde edeceğimiz formül aşağıdaki gibidir.

$$\text{Kapak sıklığı } [\mu\text{m}] = \text{İç bilezik omuz çapı} - \text{Kapak iç çapı} \quad (4.10)$$

Örneğin; rulman iç bilezik omuz çapı 100 mm olsa ve bu rulman için kullanılacak RSR dizayn elastomer kapak iç çap değeri 99,8 mm olsa; elde edeceğimiz 200 µm sıklık rulman çapındaki sıklığı ifade eder. Bizim için genelde kullanılan ve ifade edilen sıklık değeri ise tek taraflı sıklık, yani yarıçaptaki sıklık değeridir. Bu rulmanın tek taraflı kapak sıklık değeri $200/2=100 \mu\text{m}$ 'dir. Yapılan özel üretim sonucu elde edilen ölçüm değerlerinin uygunluğuna göre 100 adet bilezik içinden bilezikler seçildi ve kapak tedarikçisinden gelen lastik kapaklar arasından kapaklar iç çap ölçüm sonuçlarına göre seçilerek, istenilen dört farklı kapak sıklık değerine göre rulmanların montajı yapıldı. Testlerde kullanılan rulmanların her birinin kapak sıklıkları yukarıda Şekil 4.2'de gösterilmiştir ve kapak sıklığı ölçüm sonuçlarında aşağıda Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Üretilen farklı kapak sıklığındaki test rulmanlarının ölçülen kapak sıklıkları [μm]

Rulman No	Farklı Kapak Sıklığı Gruplarının Ölçümleri				Temassız
	200 µm	160 µm	105 µm	45 µm	
1	201,7	161,8	113,2	42,7	-
2	203,7	156,8	102,7	43,1	-
3	208	159,2	103,7	38,3	-
4	197,8	165,4	103,1	40,1	-
5	200,3	158,7	115,1	43,5	-
Ortalama kapak sıklık değerleri [μm]	202,3	160,4	107,6	41,5	-

Yukarıda Çizelge 4.3'te verilen sıklık değerleri rulman yarı çapındaki kapak sıklıklarıdır ve birimleri mikrometredir. Yukarıda verilen tabloda 5 farklı sıklık grubuna ait her bir grupta 5 adet rulman test edildi. İmalat öncesi belirlenen tek taraflı sıklık değerleri; 200 μm , 160 μm , 105 μm , 45 μm ve son rulman grubu ise temassız olan sac kapaklı rulmanlardır. Rulmanların iç bilezikleri torna ve ısıtıl işlem prosesinden sonra farklı talaş paylarına göre puntasız taşlama tezgahlarında taşlanarak, hedeflenen dört farklı kapak sıklığı elde edildi. İmalat sonucunda bu hedef değerlerin neredeyse tamamen elde edildiği ve hassas bir imalat gerçekleştirildiği yukarıda çizelgedeki değerlerden de görülmektedir.

4.5. Sürtünme Momenti Testi Koşulları

Lastik kapaklı rulmanlarda normal şartlarda yağlayıcı olarak gres kullanılır. Fakat sürtünme momenti testine alınacak rulmanlarda gresle yağlama kullanılmamıştır. Bunun yerine bir iki damla sıvı yağ rulman içerisine damlatılmıştır. Bu şekilde bir uygulamanın yapılmasının sebebi; rulman elastomer kapak sıklıklarının rulman sürtünmesi üzerindeki etkisini daha net olarak ortaya çıkarmaktır. Çünkü gres kullanımı bu test için ek bir değişken olacaktır ve kapak sıklığı nedeniyle oluşan sürtünmedeki değişim net olarak gözlemlenemeyebilir. Bu test çalışmasından önce deneme testleri ile bu durum tespit edilmiştir. Ayrıca rulman içerisine basılan gresin dönme hareketi esnasında dinamik hareketi nedeniyle her rulmanın çalışması esnasında gres dağılımları ve çalışma esnasındaki rulman sürtünmesine etkisi aynı olmayacaktır. Aşağıda Çizelge 4.4'te sürtünme momenti testinde kullanılan rulmanların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. Sürtünme momenti testinde kullanılan rulmanların özellikleri

Kullanılan Rulman	6008 2RSR
Rulman Kapak Tipi	Radyal temaslı sızdırmazlık elemanı
Lastik Kapak Malzemesi	NBR
Radyal Boşluk	C3
Kafes Tipi	J (Sac kafes)
Kullanılan Rulman Kapak Sıklık Grupları	200 μm
	160 μm
	105 μm
	45 μm
	Temassız

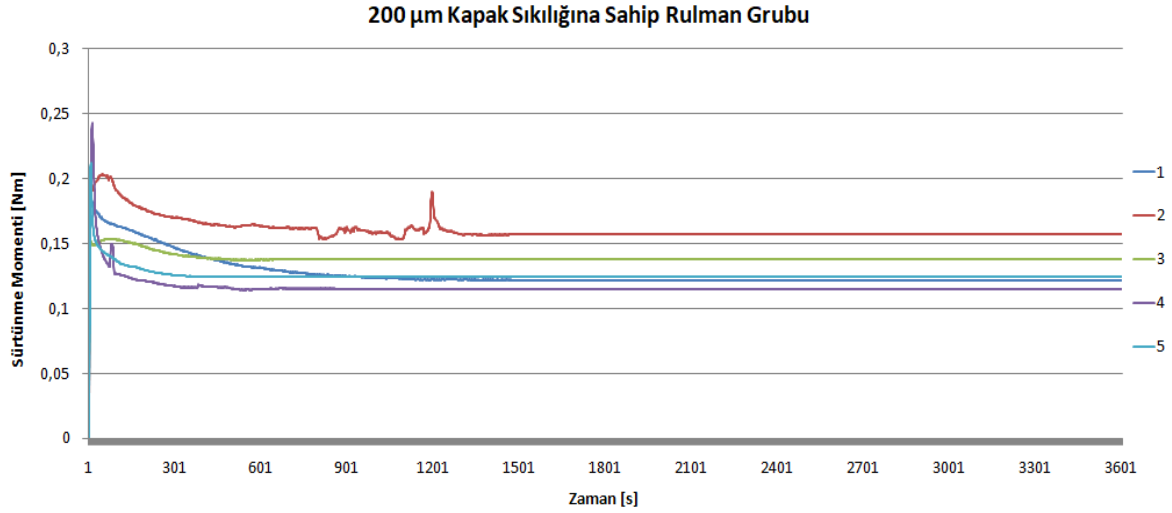
Çizelge 4.5. Sürtünme momenti test koşulları

Devir [rpm]	3000
Yük [N]	-
Test Süresi [dakika]	60
İç bilezik	dönüyor
Dış bilezik	sabit
Kuvvet Verisi Toplama Frekansı [Hz]	1

Yukarıdaki Çizelge 4.5'te sürtünme testi koşulları verilmiştir. Sürtünme momenti testlerinde 3000 rpm devir sayısının seçilmesinin sebebi daha yüksek hızlarda titreşimin artması ve sürtünme ölçümünde bazı dalgalanmaların gözükmesinin engellenmesidir. Şaft devir hızı teste başlamadan önce, elektrik motoru ve kayış kasnak mekanizması yardımıyla ayarlanarak takometre ile ölçülmektedir. İstenilen devir sayısı elde edildikten sonra testlere başlanmıştır.

Rulmanlar gressiz test edildiklerinden dolayı daha yüksek devir hızlarına çıkılması da kuru sürtünmeyi arttırabilir ve yanıltıcı sonuçlar doğurabilir. Seçilen devir sayısı tecrübeye istinaden belirlenmiştir. Test süresinin 60 dakika olarak belirlenmesinin sebebi, rulmanın içerisinde dönme hareketine karşı oluşan sürtünme davranışı 5-10 dakika içerisinde sürekli bir rejime oturarak sabit olarak devam etmesidir. Bundan dolayı 60 dakikalık süre rulmanın dönme hareketine karşı direncinin ölçülmesi için yeterli olmuştur. Test sonuçlarının verildiği bölümde verilen sürtünme momenti sonuç grafiklerinden bu durum görülmektedir. Yüksüz olarak sürtünme momenti testi yapılmasının sebebi; yükünde, gres gibi ek bir değişken olmasıdır. Ayrıca test düzeneğinin kullanımı sebebiyle zaten yüksek yükler uygularken aynı anda sürtünme momenti testi yapmak mümkün olmamaktadır. Bunun sebebi rulman dış bileziğine yük uygulandığında, dış bileziğe bağlı olan ve yük hücrelerine kuvvet uygulayan civatanın kuvveti aktaramamasıdır.

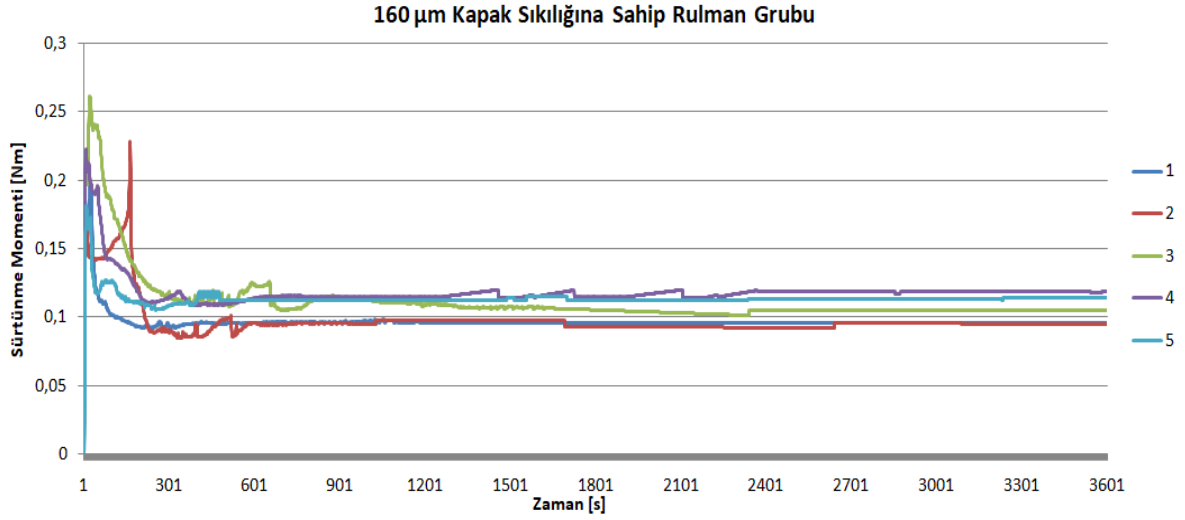
4.6. Sürtünme Momenti Testi Sonuçları



Şekil 4.3. 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği

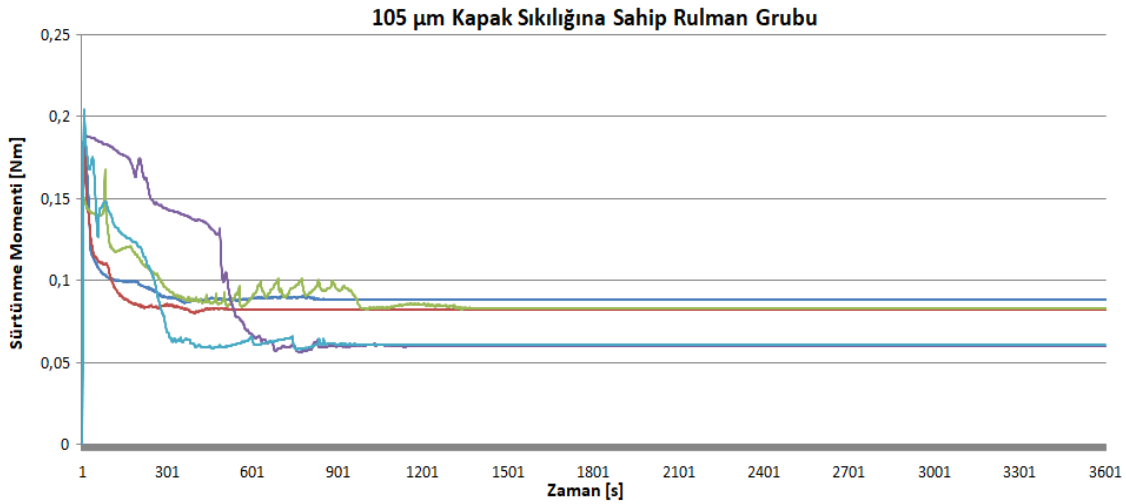
Yukarıda Şekil 4.3'te verilen grafikte 200 µm kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti grafikleri verilmiştir. En düşük sürtünme momentine sahip rulman olan 4 numaralı rulmanın sürtünmesinin sabitlendiği değer 0,115 Nm iken en yüksek sürtünme momenti değerine sahip olan 2 numaralı rulmandır ve değeri 0,156 Nm'dir. Diğer üç rulmanın sürtünme momenti değerleri bu iki değer arasında sabitlenmiştir. Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere maksimum sürtünme momenti değeri rulman dönmeye başladığı andadır. Belirli bir süre geçtikten sonra genelde rulmanlar sürekli bir rejime geçerler, eğer koşullar değişmezse sabit bir sürtünme momenti gösterirler.

Başlangıçtaki bu maksimum sürtünme durumuna başlangıç torqu (starting torque) denir. Daha sonra bu değer rulman içindeki yüzeylerin birbirine alışması ve yağlanması ile düşerek sabitlenir. Bu çalışmadaki diğer tüm sürtünme momenti grafiklerinde başlangıç torqu durumu görülmektedir. Bu rulman grubunun sürtünme momenti değerinin sabit sürekli bir rejime geçişi yaklaşık 300'üncü saniye civarlarında gerçekleşmiştir.



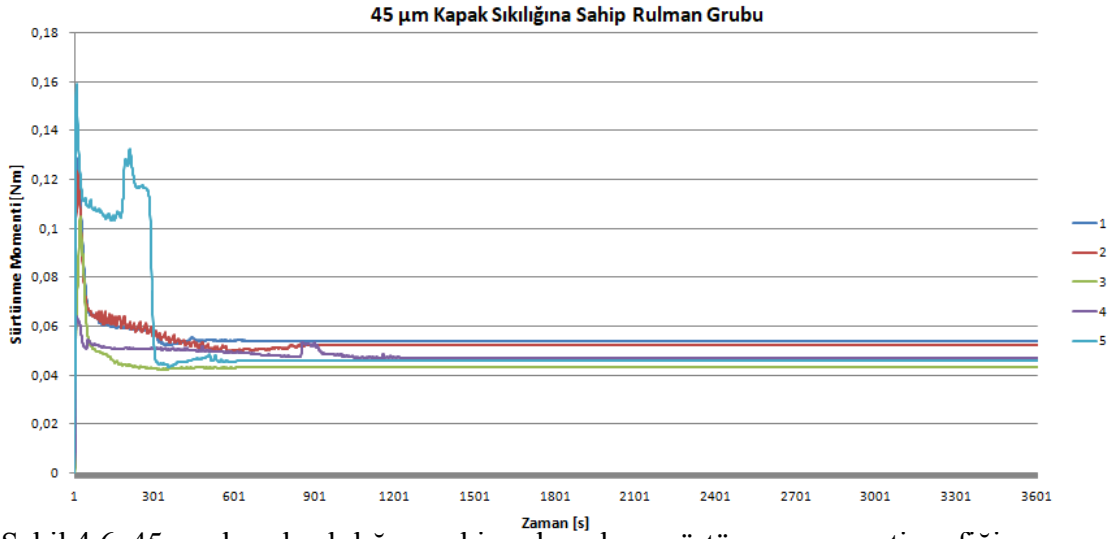
Şekil 4.4. 160 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği

Yukarıda Şekil 4.4'te verilen grafikte 160 µm kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti grafikleri verilmiştir. En düşük sürtünme momentine sahip rulman olan 2 numaralı rulmanın sürtünmesinin sabitlendiği değer 0,093 Nm iken en yüksek sürtünme momenti değerine sahip olan 4 numaralı rulmandır ve değeri 0,118 Nm'dir. Diğer üç rulmanın sürtünme momenti değerleri bu iki değer arasında sabitlenmiştir.



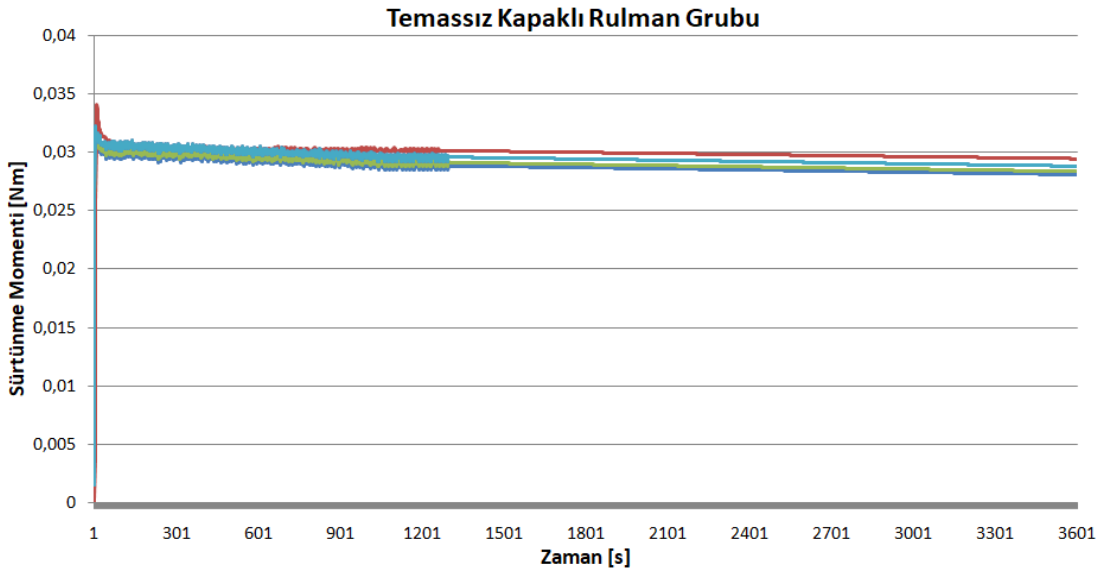
Şekil 4.5. 105 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği

Yukarıda Şekil 4.5'de verilen grafikte 105 µm kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti grafikleri verilmiştir. En düşük sürtünme momentine sahip rulman olan 4 numaralı rulmanın sürtünmesinin sabitlendiği değer 0,060 Nm iken en yüksek sürtünme momenti değerine sahip olan 1 numaralı rulmandır ve değeri 0,088 Nm'dir. Diğer üç rulmanın sürtünme momenti değerleri bu iki değer arasında sabitlenmiştir.



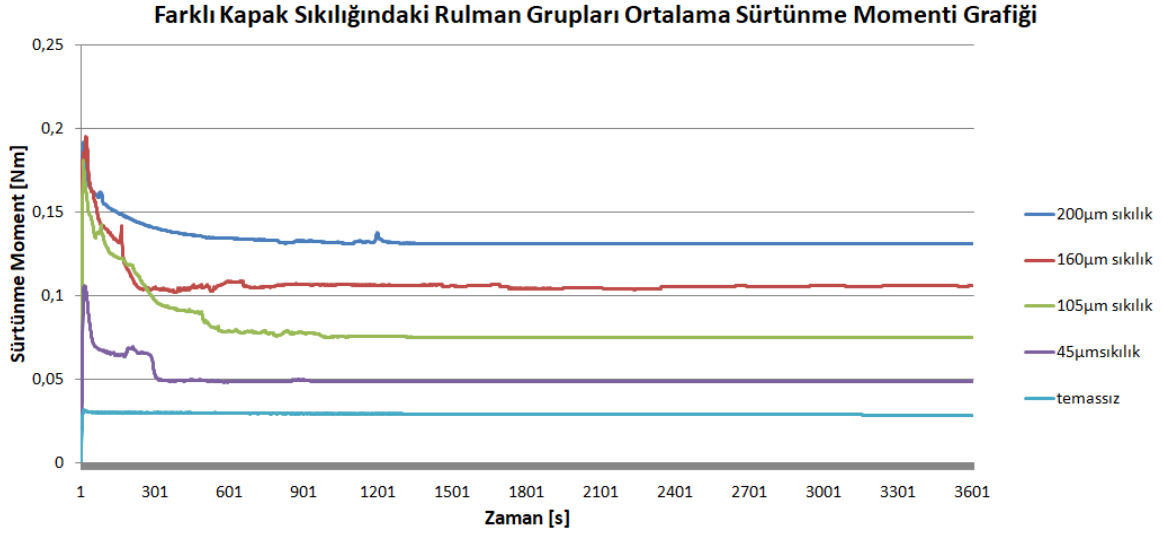
Şekil 4.6. 45 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti grafiği

Yukarıda Şekil 4.6’da verilen grafikte 45 µm kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti grafikleri verilmiştir. En düşük sürtünme momentine sahip rulman olan 3 numaralı rulmanın sürtünmesinin sabitlendiği değer 0,043 Nm iken en yüksek sürtünme momenti değerine sahip olan 1 numaralı rulmandır ve değeri 0,054 Nm’dir. Diğer üç rulmanın sürtünme momenti değerleri bu iki değer arasında sabitlenmiştir.



Şekil 4.7. Temassız kapaklı rulmanların sürtünme momenti grafiği

Yukarıda Şekil 4.7’de verilen grafikte temassız kapaklı rulmanların sürtünme momenti grafikleri verilmiştir. En düşük sürtünme momentine sahip rulman olan 1 numaralı rulmanın sürtünmesinin sabitlendiği değer 0,0282 Nm iken en yüksek sürtünme momenti değerine sahip olan 2 numaralı rulmandır ve değeri 0,0295 Nm’dir. Diğer üç rulmanın sürtünme momenti değerleri bu iki değer arasında sabitlenmiştir.

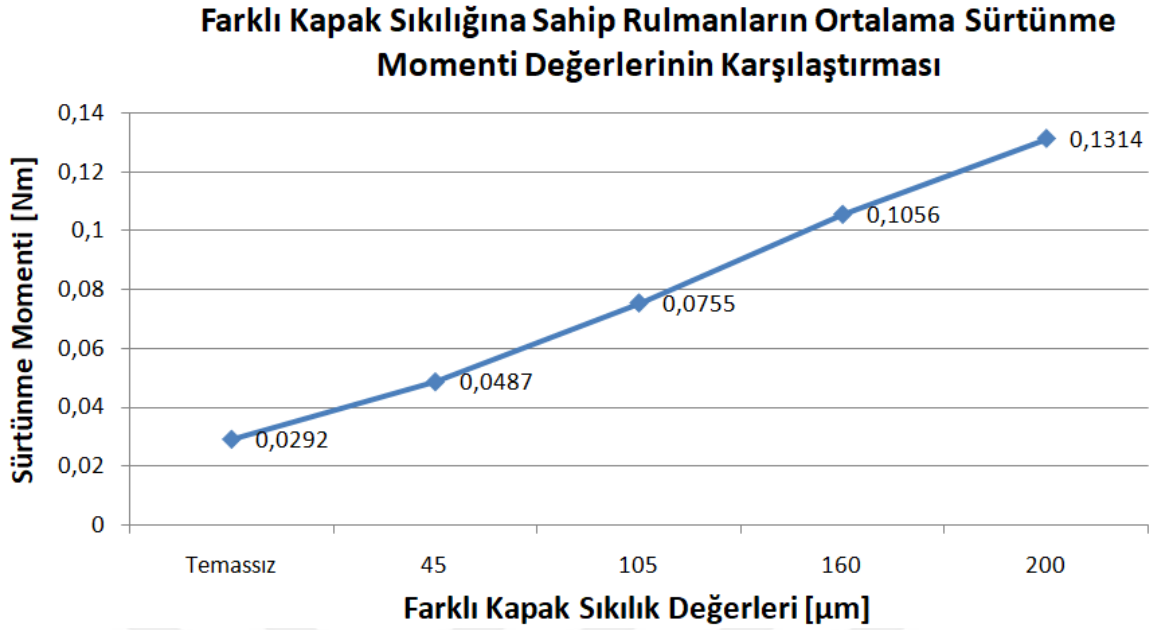


Şekil 4.8. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların ortalama sürtünme momenti grafiği

Yukarıda Şekil 4.8’de grafikte bütün rulman gruplarının ortalama sürtünme momenti grafikleri verilmiştir. En düşük sürtünme momentine sahip rulman grubu temassız kapaklı rulmanlardır. Bu rulmandan itibaren kapak sıklığı artışına göre rulman sürtünmeleri artış göstermektedir. Aşağıda Çizelge 4.6’da sürtünme momenti testi sonuçları verilmiştir ve görüldüğü üzere sürtünme değerleri kapak sıklık değeri arttıkça artmıştır.

Çizelge 4.6. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi sonuçları

Kapak Sıklığı Grubu	Ortalama Sürtünme Momenti Değerleri [Nm]			Sonuçların En Düşük Sürtünme Momenti Değerine Göre Oranı
	1 Saat	İlk 10 dakika	Son 50 dakika	
200 µm	0,1334	0,1435	0,1314	$(0,1314/0,0292)= 4,50$
160 µm	0,1076	0,1176	0,1056	$(0,1056/0,0292)= 3,61$
105 µm	0,0806	0,1059	0,0755	$(0,0755/0,0292)= 2,58$
45 µm	0,0504	0,0591	0,0487	$(0,0487/0,0292)= 1,66$
Temassız	0,0293	0,0299	0,0292	1



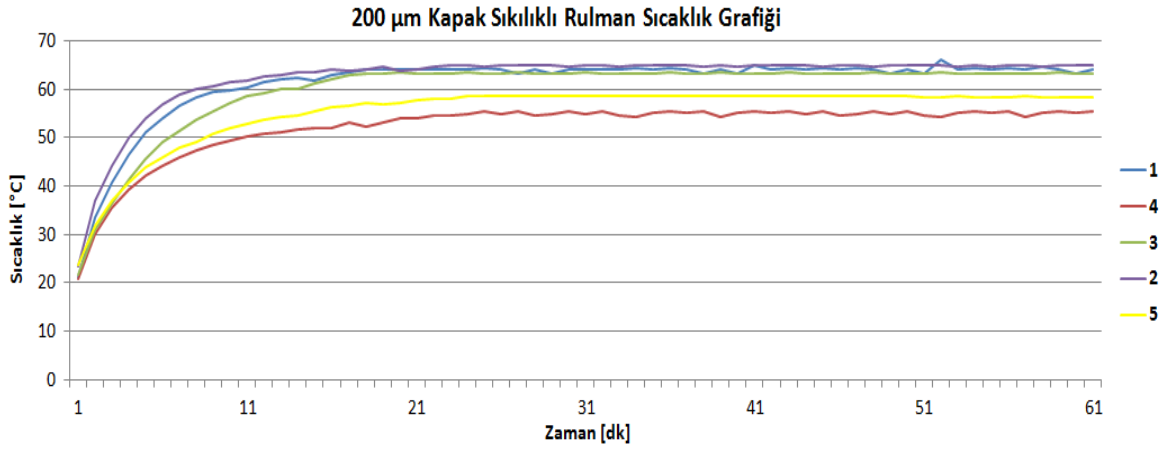
Şekil 4.9. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların ortalama sürtünme momenti sonuçları

Yukarıda Şekil 4.9’da verilen grafikte yapılan sürtünme momenti testi ortalama sonuçlarının kapak sıklıklarına göre değişimleri verilmiştir. Rulman sürtünmesi olarak son 50 dakikada ölçülen rulman sürtünme momentleri esas alınmıştır. Başlangıç momenti olan ilk 10 dakikadaki sürtünme değerleri değerlendirmeye alınmamıştır. Kapak sıklığı arttıkça rulman sürtünme moment değerleri neredeyse lineer olarak artmıştır. Fakat sürtünme değerleri kapak sıklık değerleri oranlarına göre tam olarak artmamıştır.

105 μm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti değerleri ortalama olarak 0,0755 Nm çıkarken, yaklaşık iki kat kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti değerleri ortalaması 0,1314 Nm çıkmıştır. Kapak sıklıklarına göre tam olarak iki katlık bir oran bulunmamaktadır. Fakat kapak sıklığının rulman sürtünmesini arttırdığı açıkça görülmüştür.

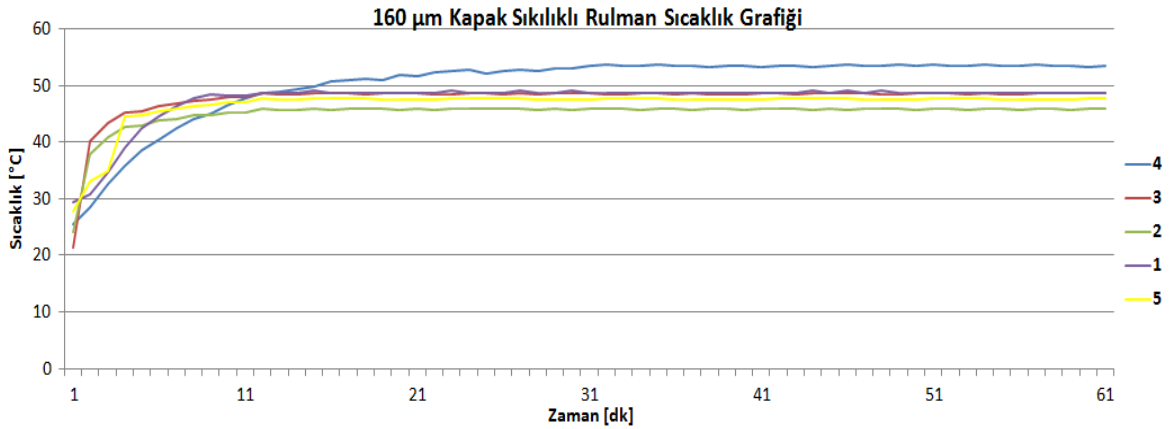
4.6.1. Sürtünme momenti testi esnasında ölçülen sıcaklık verileri sonuçları

Sürtünme momenti testi esnasında rulman dış bileziğine çok hafif şekilde dokundurulan sıcaklık sensörü probu sayesinde rulman dış bilezik sıcaklıkları ölçülmüştür. Ölçüm frekansı 1/30 Hz ve veri sıcaklık verisi toplama süresi 1 saattir. Test merkezi ortam sıcaklığı 20°C sıcaklığındadır. Aşağıda farklı kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık sonuç grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.10. 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği

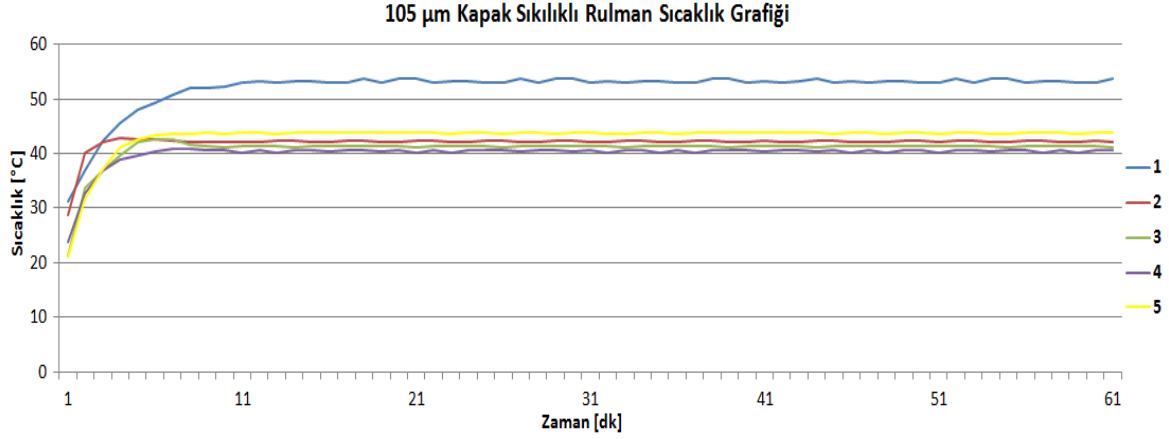
Yukarıda Şekil 4.10’da verilen grafikte belirli bir zaman sonra rulman sıcaklıkları sabitlemiştir. Bu zaman dilimine kadar rulman sıcaklıkları azalan artış eğrisi şeklinde artmaktadır. Başlangıç süresinden yaklaşık 10 dakika sonra rulman sıcaklıkları sabit bir sıcaklık seviyesinde devam etmektedir. Sıcaklığı en yüksek olan rulman 65°C ‘de sabitleyen 2 numaralı rulman iken sıcaklığı en düşük olan rulman 55°C ‘de sabitleyen 4 numaralı rulmandır. 2 numaralı rulmanın sürtünme momenti değeri de maksimumken, 4 numaralı rulmanın sürtünme momenti minimumdur.



Şekil 4.11. 160 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği

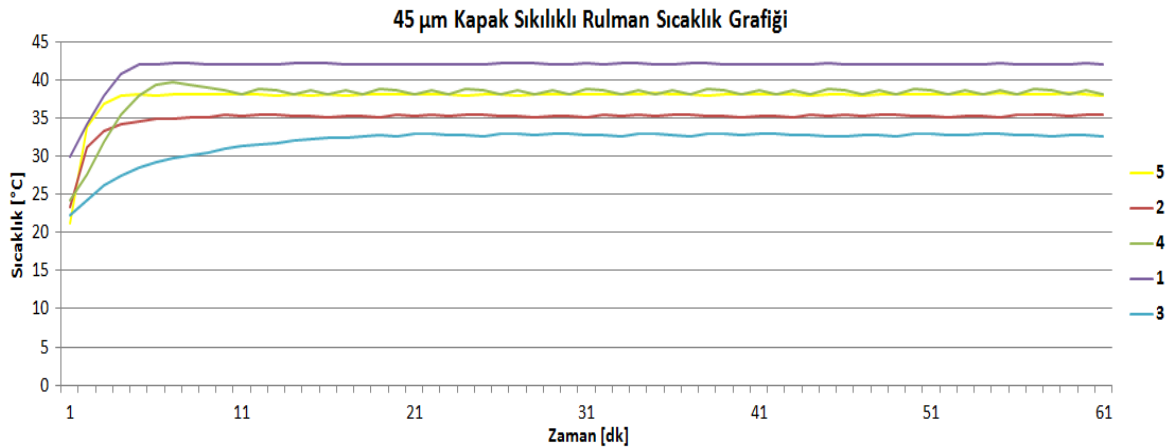
Yukarıda Şekil 4.11’de verilen grafikte 160 µm kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık grafikleri verilmiştir. Sıcaklığı en yüksek olan rulman 53,5°C ‘de sabitleyen 4 numaralı rulman iken sıcaklığı en düşük olan rulman 46°C ‘de sabitleyen 2 numaralı rulmandır.

4 numaralı rulmanın sürtünme momenti değeri de maksimumken, 2 numaralı rulmanın sürtünme momenti minimumdur.



Şekil 4.12. 105 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği

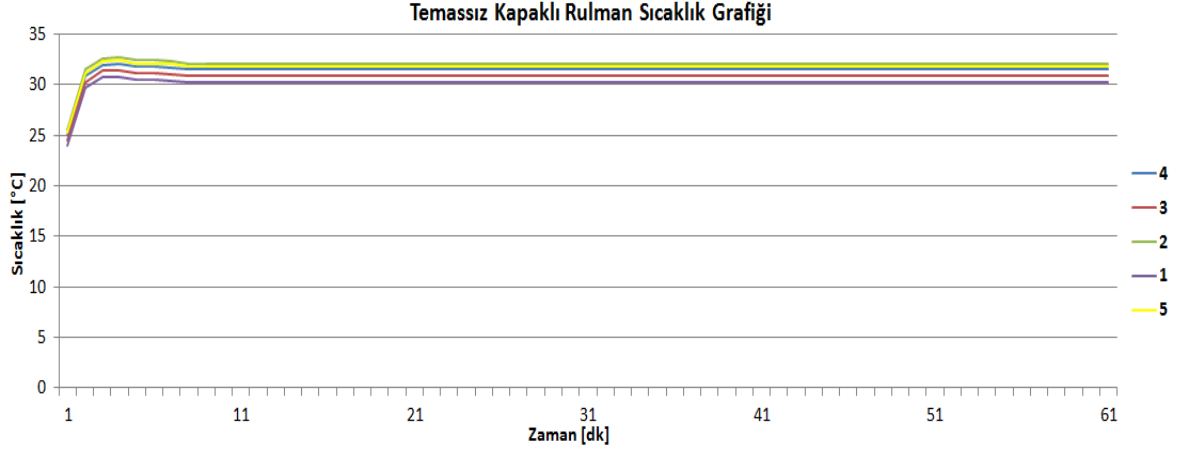
Yukarıda Şekil 4.12’de verilen grafikte 105 µm kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık grafikleri verilmiştir. Sıcaklığı en yüksek olan rulman 53,2°C ‘de sabitleyen 1 numaralı rulman iken sıcaklığı en düşük olan rulman 40,7°C ‘de sabitleyen 4 numaralı rulmandır. 1 numaralı rulmanın sürtünme momenti değeri de maksimumken, 4 numaralı rulmanın sürtünme momenti minimumdur.



Şekil 4.13. 45 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği

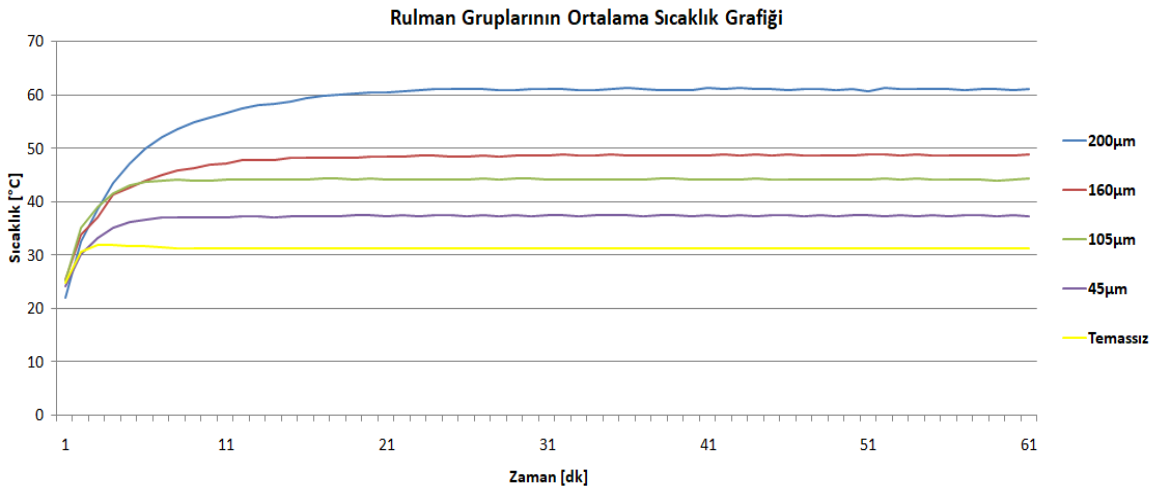
Yukarıda Şekil 4.13’te verilen grafikte 45 µm kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık grafikleri verilmiştir.

Sıcaklığı en yüksek olan rulman 42,1°C 'de sabitleyen 1 numaralı rulman iken sıcaklığı en düşük olan rulman 32,8°C 'de sabitleyen 3 numaralı rulmandır. 1 numaralı rulmanın sürtünme momenti değeri de maksimumken, 3 numaralı rulmanın sürtünme momenti minimumdur.



Şekil 4.14. Temassız kapaklı rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık grafiği

Yukarıda Şekil 4.14'te verilen grafikte temassız sac kapaklı rulmanların sıcaklık grafikleri verilmiştir. Sıcaklığı en yüksek olan rulman 32,1°C 'de sabitleyen 2 numaralı rulman iken sıcaklığı en düşük olan rulman 30,2°C 'de sabitleyen 1 numaralı rulmandır. 2 numaralı rulmanın sürtünme momenti değeri de maksimumken, 1 numaralı rulmanın sürtünme momenti minimumdur.

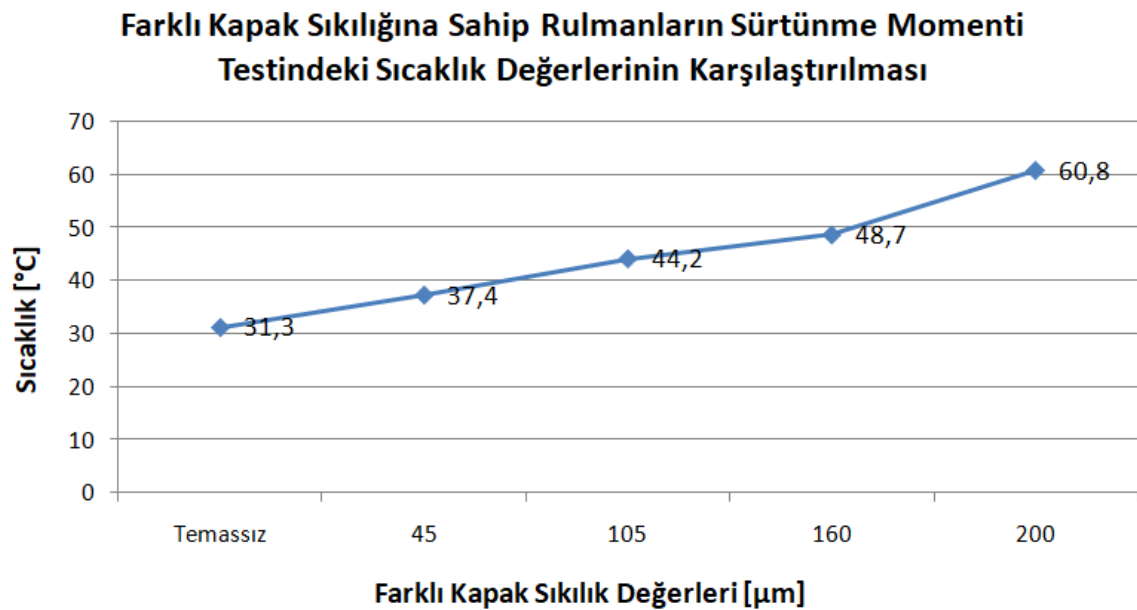


Şekil 4.15. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi ortalama sıcaklık grafiği

Farklı kapak sıklığındaki rulman gruplarının ortalama sıcaklık grafiği yukarıda Şekil 4.15'te verilmiştir. Aşağıda bu rulmanların ortalama sıcaklık değerleri tabloda verilmiştir. En yüksek rulman sıcaklığı 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanlardayken, en düşük sıcaklık ortalaması temassız olan kapaklı rulmanlara aittir. 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklığı diğer rulman gruplarının birbiri arasındaki farka nazaran biraz daha fazladır. Aşağıda Çizelge 4.7'de sürtünme momenti testindeki rulmanların sıcaklık sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi sıcaklık sonuçları

Kapak Sıklığı Grubu	Ortalama Sıcaklık Değerleri [°C]			Sonuçların En Düşük Sıcaklık Değerine Göre Oranı
	1 Saat	İlk 10 dakika	Son 50 dakika	
200 µm	58,3	46,6	60,8	$(60,8/31,3)= 1,94$
160 µm	47,5	41,9	48,7	$(48,7/31,3)= 1,55$
105 µm	43,7	41,2	44,2	$(44,2/31,3)= 1,41$
45 µm	36,9	34,9	37,4	$(37,4/31,3)= 1,19$
Temassız	31,3	31,1	31,3	1



Şekil 4.16. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sürtünme momenti testi ortalama sıcaklık sonuçları

Yukarıda Şekil 4.16’da verilen test sonuçlarına göre; 200 µm kapak sıklığındaki rulmanlar 60,8°C ortalama sıcaklık değerinde sabitlenirken, 160 µm kapak sıklığındaki rulmanlar yaklaşık 49 °C civarında sabitlenmiştir. Bu iki grup arasındaki sıcaklık farkı 11,8°C iken, 160 µm kapak sıklığındaki rulmanlar ile 44,2 °C civarında sabitleyen 105 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık farkları 4,8 °C’dir. 37,4°C sıcaklıkta sabitleyen 45 µm kapak sıklığına sahip rulmanların 105 µm kapak sıklığına sahip olan rulmanlar ile arasındaki fark 6,8 °C’dir. 31,3°C sıcaklıkta sabitleyen temassız sac kapaklı rulmanların 45 µm kapak sıklığına sahip rulmanlar ile arasındaki sıcaklık farkı 6,1 °C’dir.

4.7. Sıcaklık Testi ve Sonuçların Teorik Olarak Rulman Ömrüne Olan Etkisi

Sıcaklık testi sonucunda rulmanların çalışma sıcaklıklarının kapak sıklıklarına göre değişimi incelenmiştir. Rulman sıcaklığı rulman ömrünü etkileyen en önemli değişkenlerin başında gelmektedir. Dolayısıyla bu testin sonucunda elde edilecek sıcaklık verileri ile rulmanların teorik olarak çalışma ömür süreleri hesaplanmıştır. Bu sayede; rulman kapak sıklıklarının sıcaklık üzerinde etkisi ve rulman ömrü üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.8. Sıcaklık testinde kullanılan rulmanların özellikleri

Kullanılan Rulman	6008 2RSR
Rulman Kapak Tipi	Radyal temaslı sızdırmazlık elemanı
Lastik Kapak Malzemesi	NBR
Rulman İçerisinde Kullanılan Gres Miktarı	Rulman iç boşluğu hacminin %30'u
Radyal Boşluk	C3
Kafes Tipi	J (Sac kafes)
Kullanılan Rulman Kapak Sıklık Grupları	200 µm
	160 µm
	105 µm
	45 µm
	Temassız

Yukarıda Çizelge 4.8’de sıcaklık testlerinde kullanılan 6008 rulmanlarının genel özellikleri verilmiştir. Sıcaklık testinde kullanılan rulmanların sürtünme momenti testinde kullanılan rulmanlardan tek farkı, bu rulmanlara gres basılmasıdır. Gerçekte elastomer kapaklı rulmanlar gresli yağlama ile kullanılırlar.

Sıcaklık testi koşullarında rulmanlara aşağıda Çizelge 4.9’da görüldüğü gibi 2000 N radyal yük ve 6000 rpm değerinde bir devir sayısı uygulanmaktadır.

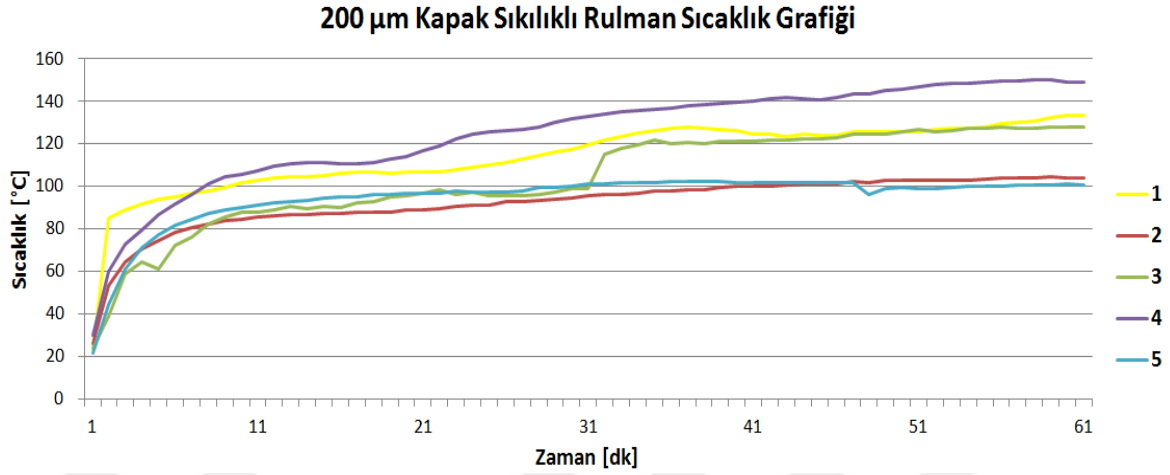
Çizelge 4.9. Sıcaklık testi koşulları

Devir [rpm]	6000
Radyal Yük [N]	2000
Test Süresi [dakika]	60
İç bilezik	dönüyor
Dış bilezik	sabit
Sıcaklık Verisi Toplama Frekansı [Hz]	1/30

NBR elastomer kapak malzemesinin sürekli çalışma sıcaklığı 100-110°C civarında ve maksimum anlık çalışma sıcaklığı 120-130°C sıcaklığa kadar çalışmaktadır. Bu sıcaklık değerlerinden sonra kauçuk malzemede bozulmalar başlayabilir. Dolayısıyla test koşulları bu sıcaklıkları çok geçmeyecek devir ve yükleme koşullarında yapılmaya çalışılmıştır. Buradaki amaç elastomer kapak sıklıkları arasındaki farkın rulman çalışma sıcaklığı üzerindeki etkisini tespit edebilmektir.

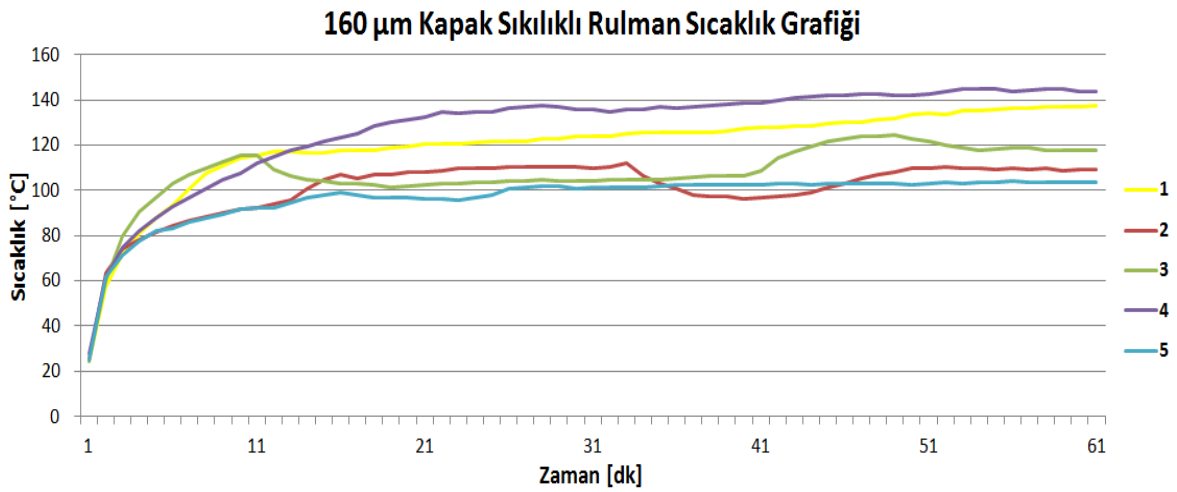
Kauçuk malzeme yapısı bozulduğunda farklı davranışlar göstererek asıl incelenmek istenen durumun incelenmesini engelleyebilir. Testin sonucunda; rulmanlar belirli sıcaklık değerlerinde, kapaklarda ciddi aşınma olmadan stabil olarak çalışmaktadır. Kapaklarda ciddi aşınmalar olmadan bu sıcaklık değerlerinde büyük değişimler olması beklenmemektedir. Dolayısıyla test sonucunda stabil hale gelen rulman dış bilezik sıcaklığı, rulmanın çalışma sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Bu sonuçlara göre rulmanın geliştirilmiş ömür hesabına göre teorik olarak ömür hesapları yapılmıştır.

4.7.1. Sıcaklık testi sonuçları



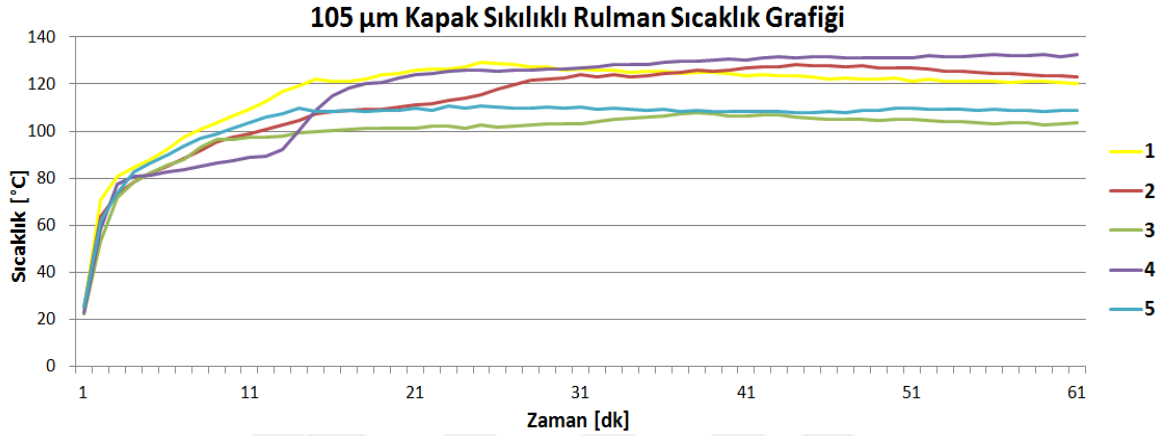
Şekil 4.17. 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği

200 µm kapak sıklıklı rulmanların sıcaklık testi sonuçları yukarıda Şekil 4.17'deki grafikte verilmiştir. Bu rulman grubunun kendi arasındaki sıcaklık dağılımı görüldüğü üzere geniş bir bant aralığına sahiptir. 4 numaralı rulman 150°C sıcaklıkta sabitlenirken, 5 numaralı rulman 100°C sıcaklıkta sabitlenmiştir. Maksimum ve minimum sıcaklıktaki rulmanlar arasındaki sıcaklık farkı 50°C'dir. Bu rulmanlar arasındaki kapak sıklığı farkı bu kadar bir sıcaklık farkı doğuracak şekilde değildir. Sıcaklık testine alınan rulmanlar gres ile yağlanmıştır ve 2000 N yük uygulanmıştır. Kapak sıklığından dolayı sıcaklıkları birbirine yakın çıkması beklenen rulmanların, gres ve yük değişkeni devreye girdiğinde sıcaklık değerleri beklenenden farklı sonuçlandığı gözlenmiştir.



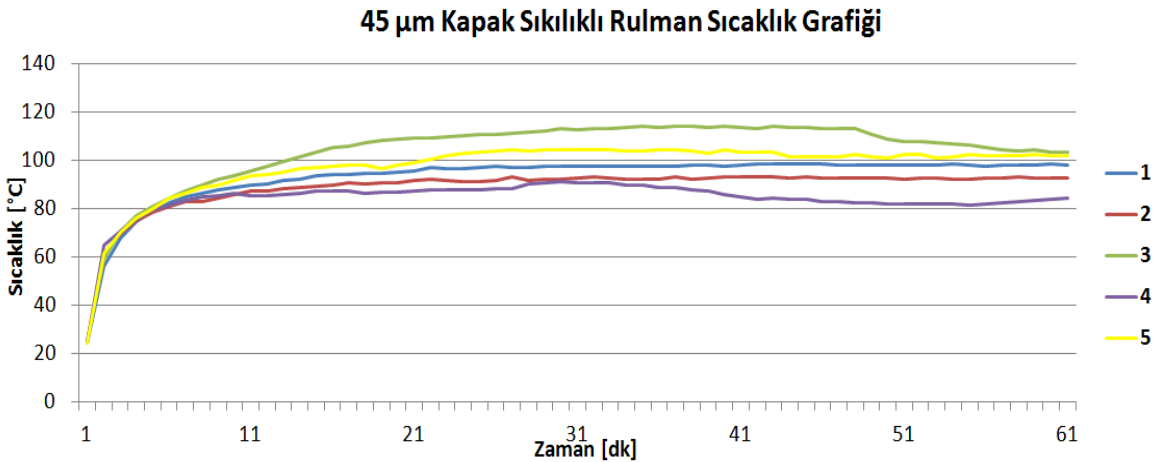
Şekil 4.18. 160 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği

160 μm kapak sıklıklı rulmanların sıcaklık testi sonuçları yukarıda Şekil 4.18’de verilmiştir. Bu rulman grubunun kendi arasındaki sıcaklık dağılımı görüldüğü üzere geniştir. 4 numaralı rulman 145°C sıcaklıkta sabitlenirken, 5 numaralı rulman 103°C sıcaklıkta sabitlenmiştir. Maksimum ve minimum sıcaklıktaki rulmanlar arasındaki sıcaklık farkı 42°C’dir.



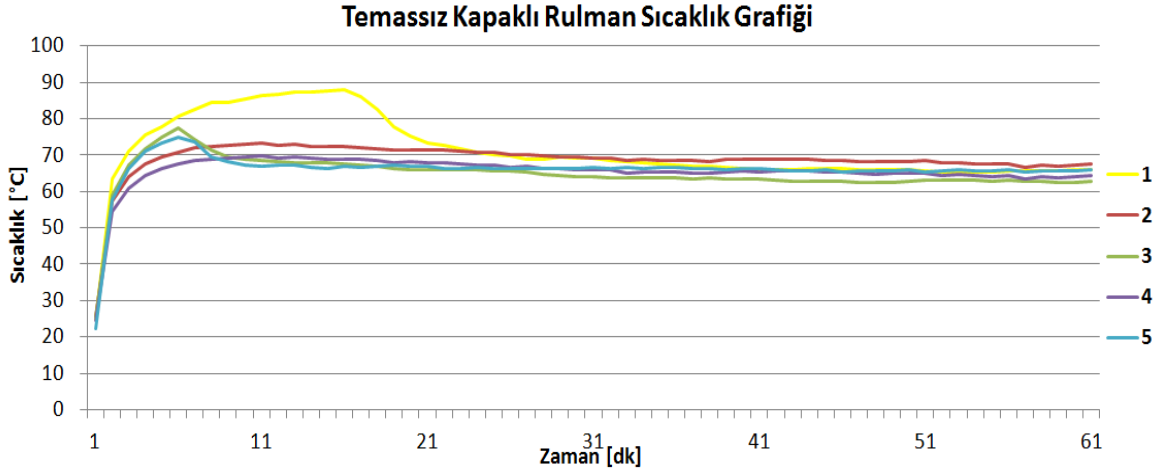
Şekil 4.19. 105 μm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği

105 μm kapak sıklıklı rulmanların sıcaklık testi sonuçları yukarıda Şekil 4.19’da verilmiştir. Bu rulman grubunun kendi arasındaki sıcaklık dağılımı görüldüğü üzere geniştir. 4 numaralı rulman 132°C sıcaklıkta sabitlenirken, 3 numaralı rulman 103°C sıcaklıkta sabitlenmiştir. Maksimum ve minimum sıcaklıktaki rulmanlar arasındaki sıcaklık farkı 29°C’dir.



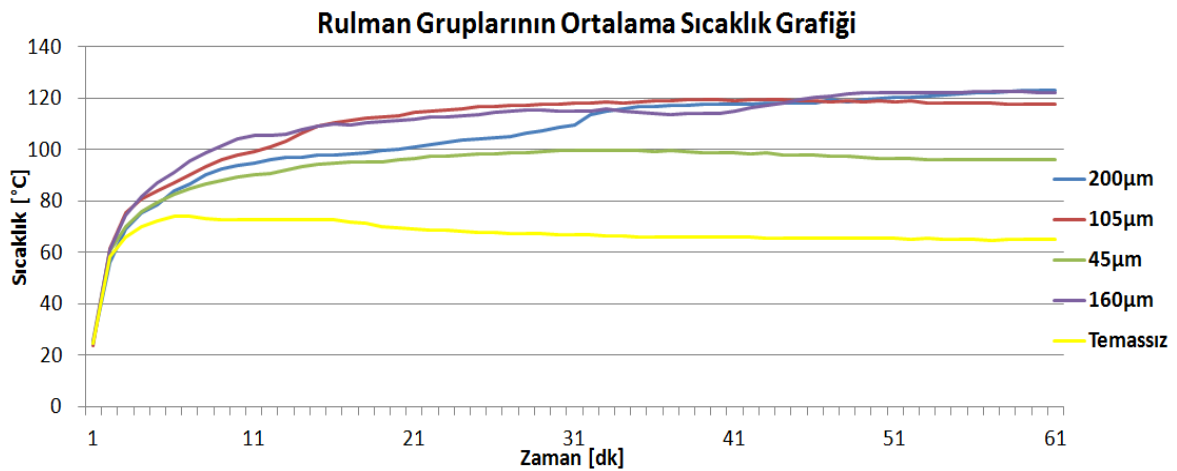
Şekil 4.20. 45 μm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği

45 μm kapak sıklıklı rulmanların sıcaklık testi sonuçları yukarıda Şekil 4.20’de verilmiştir. Bu rulman grubunun kendi arasındaki sıcaklık dağılımı görüldüğü üzere geniştir. 3 numaralı rulman 104°C sıcaklıkta sabitlenirken, 4 numaralı rulman 84°C sıcaklıkta sabitlenmiştir. Maksimum ve minimum sıcaklıktaki rulmanlar arasındaki sıcaklık farkı 20°C ’dir.



Şekil 4.21. Temassız kapaklı rulmanların sıcaklık testi sıcaklık grafiği

Temassız kapaklı rulmanların sıcaklık testi sonuçları yukarıda Şekil 4.21’de verilen grafikte verilmiştir. Bu rulman grubunun kendi arasındaki sıcaklık dağılımı dar bir aralıktadır. 2 numaralı rulman 67°C sıcaklıkta sabitlenirken, 3 numaralı rulman 64°C sıcaklıkta sabitlenmiştir. Maksimum ve minimum sıcaklıktaki rulmanlar arasındaki sıcaklık farkı 3°C ’dir.

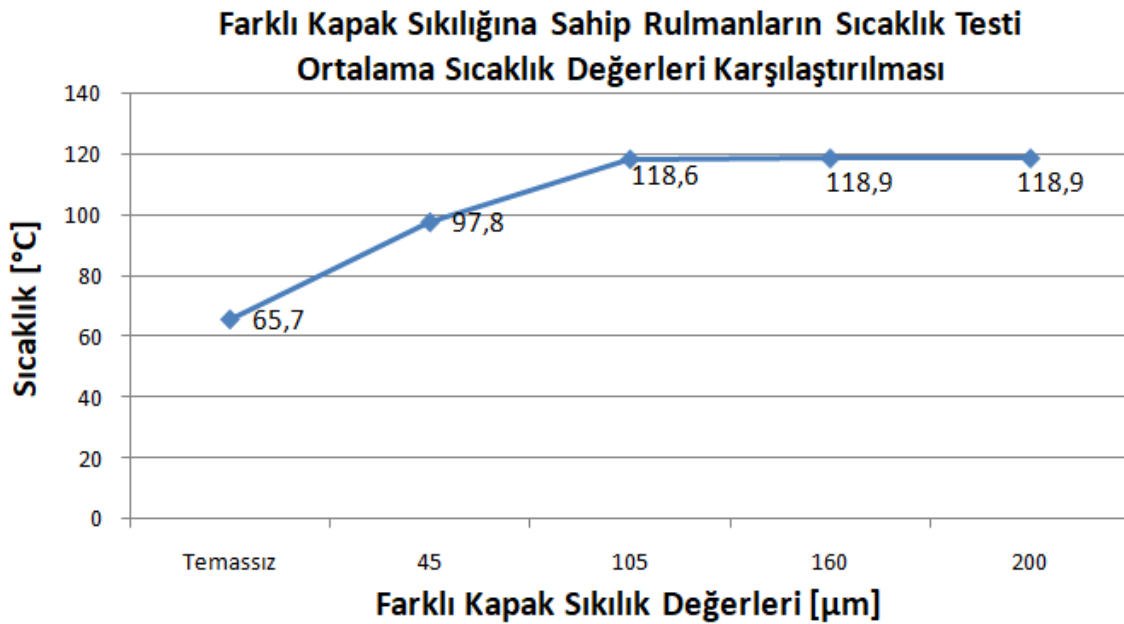


Şekil 4.22. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık testi ortalama sıcaklık grafiği

Yukarıda verilen Şekil 4.22'den görüldüğü üzere temassız ve 45 µm kapak sıklığına sahip rulmanların sıcaklık değerleri geri kalan üç kapak sıklığındaki rulman grubuna nazaran belirgin şekilde düşük olduğu gözlenmiştir. 200 µm, 160 µm ve 105 µm kapak sıklığına sahip rulman gruplarının sıcaklık değerleri aynı seviyede sabitlenmiştir. Aşağıda Çizelge 4.10'da sıcaklık testi sonuçları ortalama ve maksimum sıcaklıklara göre verilmiştir.

Çizelge 4.10. Sıcaklık testi sonuçları

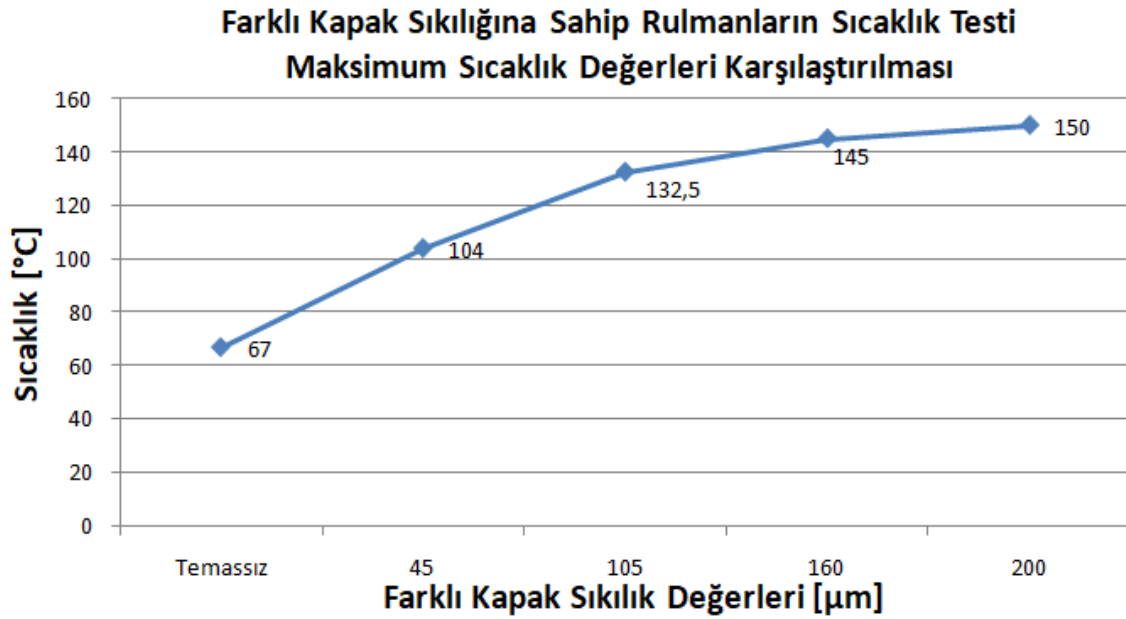
Rulman Kapak Sıklıkları	Ortalama Sıcaklık Değerleri Son 30 dakika [°C]	Sonuçların En Düşük Sıcaklığa Göre Oranları	Maksimum Rulman Sıcaklık Değeri [°C]	Sonuçların En Düşük Sıcaklığa Göre Oranları
200 µm	118,9	118,9/65,7=1,81	150	150/67= 2,23
160 µm	118,9	118,9/65,7=1,81	145	145/67= 2,16
105 µm	118,6	118,6/65,7=1,80	132,5	132,5/67= 1,97
45 µm	97,8	97,8/65,7=1,48	104	104/67= 1,55
Temassız	65,7	1	67	1



Şekil 4.23. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık testi ortalama sıcaklık değerleri

Farklı kapak sıklığındaki rulman gruplarının ortalama sıcaklık grafiği yukarıda Şekil 4.23'te verilmiştir. Kapak sıklık değerlerinin rulman sıcaklığına etkisi 105 µm kapak sıklığından sonra değişmemektedir. 105 µm, 160 µm, 200 µm kapak sıklığındaki rulmanların ortalama sıcaklıkları yaklaşık 119°C civarındadır. Temassız kapak 65,7°C sıcaklık ortalamasıyla en düşük sıcaklığa sahip rulman grubudur.

45 μm kapak sıklığındaki rulmanların ortalama sıcaklık değeri $97,8^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu değerlendirmeye göre 6000 rpm dönme hızına sahip ve 2000 N radyal yük altında çalışan rulmanların çalışma sıcaklıkları 105 μm kapak sıklık değerinden sonra aynı seviyede gelmektedir. Dolayısıyla bu koşullar altında daha düşük sıcaklık değerlerinde çalışacak sürtünmesi düşük rulman tasarımı yapılması gerekirse kapak sıklık değerinin 105 μm değerinden düşük olarak tasarlanması gerekmektedir. Yüksüz ve 3000 rpm dönme hızında yapılan sürtünme momenti testinde kapak sıklıkları arasında belirgin bir sürtünme ve sıcaklık farkları doğru orantılı olarak tespit edilmiştir. Fakat sıcaklık testi sonucunda kapak sıklıkları arasındaki fark sürtünme testi sonucunda elde edilen veriler gibi belirgin çıkmamıştır. Yüksek radyal yük, yüksek dönme devir sayısı ve rulman iç boşluğunun %30'u kadar yağlama için kullanılan gres gibi değişkenler rulman kapak sıklıkları arasındaki farkı her kademedeki kapak sıklığında ortaya çıkmasını engellemektedir.



Şekil 4.24. Farklı kapak sıklığındaki rulmanların sıcaklık testi maksimum sıcaklık değeri sonuçları

Farklı kapak sıklığındaki rulman gruplarında maksimum sıcaklığa sahip olan rulmanlarının grafiği yukarıda Şekil 4.24'te verilmiştir. Rulman kapak sıklığı arttıkça, rulman sıcaklığı azalarak artmaktadır.

Temassız kapaklı rulmanın maksimum sıcaklığı 67°C, 45 µm kapak sıklığındaki rulmanın maksimum sıcaklığı 104°C, 105 µm kapak sıklığındaki rulmanın maksimum sıcaklığı 132,5°C, 160 µm kapak sıklığındaki rulmanın maksimum sıcaklığı 145°C, 200 µm kapak sıklığına sahip rulmanın maksimum sıcaklığı 150 °C'dir. Bu değerlendirmeye göre 6000 rpm dönme hızına sahip ve 2000 N radyal yük altında çalışan rulmanların çalışma sıcaklıkları kapak sıklığı arttıkça azalarak artmaktadır. Maksimum sıcaklık farkları temassız kapaklı rulman, 45 µm kapak sıklıklı rulman ve 105 µm kapak sıklıklı rulman arasındadır. 105 µm kapak sıklığından sonra rulman çalışma sıcaklığı artışı düşük olmaktadır.

4.8. Rulman Ömrü Teorik Hesabı

Rulmanların ömür hesabı standart hale getirilmiştir. Bu hesaplamalardaki formül ve izlenen metotlar geçmişte ISO ve büyük rulman üreticileri tarafından yapılan testlere dayandırılır. Rulman ömrü hesaplama yöntemleri farklı kabullere göre değişmektedir. Yaygın ve basit olarak kullanılan basit ömür (basic rating life) hesabıdır. DIN ISO 281 (Rolling Bearings- Dynamic Load Ratings and Rating Life) standardına göre bilyalı rulman basit ömrü aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

$$L_{10} = (C_r / P_r)^3 \quad (4.11)$$

Bu denklemde ifade edilen;

C_r : Dinamik radyal yük sayısı [Newton] (Basic dynamic radial load rating)

P_r : Dinamik eşdeğer radyal yük [Newton] (Dynamic equivalent radial load)

L_{10} : Basit ömür [milyon devir] Burada ifade edilen 10 sayısı istatistiksel olarak ifade edilen bir tanımdır.

Hesaplanan rulman ömür değerinin elimizdeki rulmanlardan %90'ının bu ömrü tamamlayacağını, geri kalan %10'luk rulmanın hesaplanan ömür değerini tamamlayamayabileceğini ifade eder. L_{50} gibi değerlerde rulman üreticilerinin bazen kullandığı ömür ifadeleridir. Fakat en yaygın kullanılan ve kabul edilen L_{10} ömrüdür. L_{10} ömrü güvenilirlik katsayısı 1'dir. Dolayısıyla hesaplanan rulman ömrünü 1 ile çarpıldığında L_{10} ömrü elde edilmiş olur.

Örneğin; L_5 ömrü hesaplanmak istenilirse hesaplanan ömür değerinin 0,64 katsayısıyla çarpılması gerekir. Burada L_5 ömrü hesaplanan ömür değerini rulmanların %95'inin sağlayacağını ifade etmektedir.

a_1 : güvenilirlik için ömür modifikasyon faktörü (life modification factor for reliability)

C_r rulmanın bir milyon devir sayısına teorik olarak dayanabildiği sabit değişmeyen radyal yük değeri olarak tanımlanmıştır. C_r değerinin sabit bilyalı rulmanlar için hesaplanması ise aşağıdaki denklemler ile ifade edilir.

$$C_r = b_m f_c (i \cos \alpha)^{0,7} Z^{2/3} D_w^{1,8} \quad D_w \leq 25,4 \text{mm} \quad (4.12)$$

$$C_r = 3,647 b_m f_c (i \cos \alpha)^{0,7} Z^{2/3} D_w^{1,4} \quad D_w > 25,4 \text{mm} \quad (4.13)$$

D_w = Bilya çapı [mm]

i : rulman eğer çift sıralı ise 2, tek sıralı ise 1 alınır.

α : nominal kontak açısı [°]

Z : yuvarlanma elemanı sayısı (rulman eğer çift sıralıysa da tek sırada ki yuvarlanma elemanı sayısı alınır. Bunun sebebi formülde tek ve çift sıralar “ i ” değeri ile dikkate alınmıştır.)

b_m : farklı rulman tipi ve dizaynları için değişen faktör; modern ve yaygın olarak kullanılan, iyi imalat tecrübelerine göre yüksek kalitede sertleştirilmiş rulman çeliğiyle yapılan üretim

f_c : Rulman bileşenleri geometrisine göre değişen faktör

D_{pw} : Bölüm dairesi çapı [mm] (Rulmandaki yuvarlanma elemanlarının merkezinin çapı)

P_r değerinin hesaplanması aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir.

$$P_r = X F_r + Y F_a \quad (4.14)$$

X : radyal yük faktörü

Y : aksel yük faktörü

F_r : Radyal yük [N]

F_a : Eksenel Yük [N]

X ve Y değeri radyal sabit bilyalı rulmanlar için ISO 281 standartındaki çizelgeye göre seçilir. Eğer uygulamada eksenel yük yoksa Y faktörü “0”, X faktörü “1” alınır.

4.8.1. Geliştirilmiş rulman ömrü

Yıllardan bu yana basit rulman ömür hesaplaması L_{10} kriteri bir rulmanın performansını kanıtlanmasında yeterli gözükmekteydi. Fakat çoğu uygulama için; belirlenmiş yağlama ve kirlilik koşullarında, farklı ve daha hassas bir hesaplama yöntemi gerekliliği olmuştur. Rulman çeliği yorulma yük limiti aşılmadıkça, modern yüksek kaliteli rulman çeliğiyle, yuvarlanma elemanında belirli bir Hertz kontak gerilmesinin aşağısında ve uygun koşullar altında rulman ömrü L_{10} ömrü ile kıyaslandığında çok daha uzun olabilir. Bununla birlikte uygun olmayan koşullar altında elde edilecek rulman ömrü L_{10} ömründen çok daha kısa olabilir [26]. Aşağıda ISO 281 standardına göre geliştirilmiş rulman ömrü hesaplama formülü verilmiştir.

Burada a_1 katsayısı güvenilirlik için ömür modifikasyon faktörü, a_{ISO} katsayısı ise ömür modifikasyon katsayısıdır.

$$L_{nm} = a_1 a_{ISO} L_{10} \quad (4.15)$$

L_{nm} : Geliştirilmiş rulman ömrü

Sistem yaklaşımı için ömür geliştirme faktörü

Eğer yağlama koşulları, rulman temizliği ve diğer işletme koşulları olumlu olursa, belirli bir yük altında modern yüksek kalitedeki rulman için teorik olarak sonsuz ömür elde edilebilir. Yüksek kalitede malzeme ve iyi üretim kalitesine sahip çoğu rulmanın yorulma gerilmesi limiti yaklaşık olarak 1500 MPa değerindeki kontak gerilmesidir. Teorik olarak rulmanlardaki yuvarlanma elemanlarındaki kontak basınç değeri 1500 MPa değerini geçmezse o rulman ömrü teorik olarak sonsuza gider. Düşük üretim hassasiyeti ve düşük malzeme kalitesi, düşük yorulma gerilmesi limiti ile sonuçlanır.

Fakat çoğu uygulamada yuvarlanma elemanı ve bilezik yüzeyi arasında oluşan kontak gerilmesi 1500 MPa değerinden yüksektir, buna ek olarak rulman işletme koşullarında oluşan ek gerilmelerde rulman ömrünü azaltacaktır [26].

Bu duruma örnek olarak;

- yuvarlanma yollarında oluşan batmalar kenar gerilmelerine sebep olur.
- yuvarlanma yolu yuvarlanma elemanı arasında oluşabilecek ince yağ filmi gerilme değerini artmasına neden olur.
- yüksek sıcaklık malzemenin yorulma limitini düşürür.
- rulman iç bileziğinin sıkı bir şekilde şaftta geçmesi çevresel gerilmeye sebebiyet verebilir.

Rulman ömrüne etki eden farklı etkiler birbirine bağlıdır. Örneğin; hız, sıcaklık, viskozite gibi değişkenler rulman ömrünü direkt etkiler. Dolayısıyla yorulma ömrü hesaplaması sistem yaklaşımı uygundur ve bu hesaplama sistemi birbirinden bağımlı şekilde rulman ömrüne etki eden faktörlerin değişim ve birbiri ile alakasını göz önünde bulundurmaktadır. Geliştirilmiş rulman ömrü hesaplamalarında pratik yaklaşımlar ISO 281 standardında yapılmıştır. Bu yaklaşımlar yorulma limiti, kirlilik faktörü, yağlama durumunu göz önünde bulundurur.

ISO 281 standardında rulman ömrü hesaplamasında göz önünde bulundurulmayan radyal boşluğun ömre etkisi, hizasızlık sebebiyle meydana gelebilecek moment yükü, moment yükü sebebiyle eğilme, rulman yuvarlanma elemanlarındaki yük dağılımı ISO 16281 standardında rulman ömrü hesabı yapılırken göz önünde bulundurulur. Fakat bu çalışmada yapılan testlerde saf radyal yük kullanıldığından moment yükü bulunmamaktadır, dolayısıyla bu ömür hesaplama yöntemi bu çalışmada anlatılmamıştır.

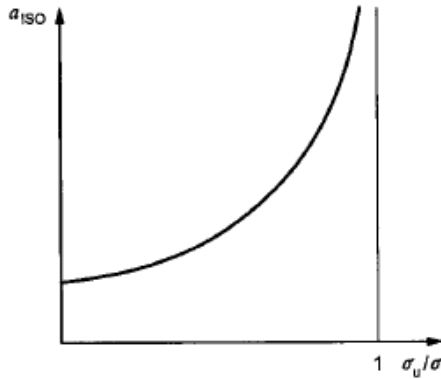
Yorulma yük limiti

Ömür geliştirme katsayısı olan a_{ISO} ; σ_u/σ değerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

$$a_{ISO} = f(\sigma_u/\sigma) \quad (4.16)$$

σ_u : yuvarlanma yolu malzemesi yorulma gerilmesi limiti [N/mm²]

σ : gerçek gerilme [N/mm^2]



Şekil 4.25. a_{150} katsayısının σ_u/σ değerine göre değişimi grafiği

C_u yorulma gerilmesi limit değerine ulaşılan yük değeridir. σ_u en ağır şekilde yüklenmiş yuvarlanma yolu ve yuvarlanma elemanı arasındaki yorulma gerilmesidir [26]. σ_u/σ oranı C_u/P oranı şeklindeki bir yaklaşımla da ifade edilebilir, dolayısıyla a_{150} değeri aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$a_{150} = f(C_u/P) \quad (4.17)$$

Yukarıda Şekil 4.25'te görüldüğü gibi eğer eşdeğer rulman yükü yorulma yük limiti değerine eşit olursa, a_{150} değeri sonsuza gitmektedir. Yani rulman ömrü teorik olarak sonsuz olmaktadır. Fakat eşdeğer rulman yükü, yorulma yük limitinden büyük oldukça bu oran 1 değerinin altına düşer ve a_{150} katsayısı sonsuzdan daha düşük değerlere sahip olur.

C_u değerinin hesaplanmasında aşağıda verilen etkenler düşünülmelidir.

- Rulman tipi, boyutu ve iç geometrisi
- Yuvarlanma elemanı ve yuvarlanma yolu profili
- Üretim kalitesi
- Yuvarlanma yolu malzemesinin yorulma limiti

C_u değerinin hesaplanması ISO 281 standardında detaylı olarak anlatılmıştır. Bu çalışmada bu detay anlatılmamıştır.

Ömür geliştirme faktörünü bulabilmek için pratik metotlar

Modern teknoloji a_{ISO} katsayısını belirleyebilmeyi bilgisayar destekli teori, ampirik testler ve pratik deneyimleri birleştirerek mümkün kılmaktadır. Rulman tipinin, yorulma yükünün, rulman yükünün yanı sıra ISO 281 standardındaki a_{ISO} faktörü aşağıdaki etkileri göz önünde bulundurur.

- Yağlama (yağlayıcı tipi, viskozite, rulman hızı, rulman boyutu, katkı maddeleri)
- Çevre (kirlilik seviyesi, sızdırmazlık elemanları)
- Kirlilik partikülleri (rulman boyutuna göre partikül sertliği ve boyutu, yağlama metodu, filtreleme)
- Montaj işlemi (montaj esnasındaki temizlik) [26]

Rulman radyal boşluğu ve yanlış merkezlenmesinin (hizasızlık) rulman ömrüne etkisi ISO/TS 16281 standardında verilmiştir. Aşağıda a_{ISO} değerinin belirlenmesinde kullanılan değişkenler verilmiştir ve a_{ISO} faktörü bu değişkenlerin bir fonksiyonudur.

$$a_{ISO} = f(e_c C_u / P, k) \quad (4.18)$$

e_c : kirlilik faktörü

C_u : yorulma yükü limiti [N] (fatigue load limit)

P : dinamik eşdeğer yük [N] (dynamic equivalent load)

k : viskozite oranı (viscosity ratio, v/v_1)

Kirlilik faktörü(e_c)

Yağlayıcı katı partiküller tarafından kirlendiğinde, bu katı partiküllerin yuvarlanma yolu ve yuvarlanma elemanları arasında ezilerek aşırı yüklenmesi ile yuvarlanma yolunda kalıcı batma izleri oluşabilir. Bu batma izleriyle lokal gerilmeler artar ve bu durumda rulman ömrünün azalmasına sebep olur. Yağlayıcı tabakasında oluşan kirlilik nedeniyle azalan rulman ömrü kirlilik faktörü e_c tarafından hesaba katılır. Katı partiküller nedeniyle azalan rulman ömrü aşağıdaki değişkenlere bağlıdır.

- Tip, boyut, sertlik ve partikül sayısı
- Yağlayıcı filmi kalınlığı (viskozite oranı)
- Rulman boyutu

Kirlilik faktörü, aşağıda verilen kirlilik seviyeleri tipik yağlanmış rulmanlar için aşağıda verilen Çizelge 4.11'den alınabilir. Daha hassas ve detaylı kirlilik faktörü değeri ISO 281 standardında EK-A bölümündeki farklı sıvı yağ filtreleri ve gresle yağlama diyagramlarından veya denklemlerinden bakılarak hesaplanabilir. Kirlilik faktörü değeri farklı sertlik ve tokluktaki partiküllerin karışımı için geçerlidir. Eğer ISO 4406 standardında belirtilen temizlik sınıflarına göre maksimum partikül boyutunu çokça aşan partiküller mevcut ise rulman ömrü hesaplanan ömür değerinin çok daha altında olacaktır.

Çizelge 4.11. Rulmanların kirlilik seviyesine göre e_c katsayısının belirlenmesi [26]

Kirlilik Seviyesi	e_c	
	$D_{pw} < 100\text{mm}$	$D_{pw} > 100\text{mm}$
Aşırı Temizlik Laboratuvar koşulları	1	1
Yüksek Temizlik Aşırı ince filtreden yağ filtresi; gresli ve sızdırmaz kapaklı rulmanlar	0,8-0,6	0,9-0,8
Normal Temizlik İnce filtreden yağ filtresi; gresli ve kapaklı rulmanlar	0,6-0,5	0,8-0,6
Hafif Kirlilik Yağlayıcıda hafif kirlilik	0,5-0,3	0,6-0,4
Tipik Kirlilik Kaba filtreleme; aşındırıcı partiküller ve dış ortamdan içeri giren partiküller	0,3-0,1	0,4-0,2
Ciddi Kirlilik Rulman çevresi yoğun kirli ve yetersiz sızdırmazlık	0,1-0	0,1-0
Aşırı Ciddi Kirlilik	0	0

Su veya diğer sıvıların kirliliğinin rulman ömrüne bu standartta göz önünde bulundurulmamıştır. Çok ciddi kirlilik durumunda (very severe contamination) rulmanın bozulması, yüksek ihtimalle aşınmadan dolayı gerçekleşecektir ve hesaplanan ömür değerinin çok altında bir ömür olacaktır.

Viskozite oranının hesaplanması

Bir yağlayıcının verimliliği öncelikli olarak yuvarlanma temas yüzeyleri arasındaki yüzey ayrılmasının derecesiyle belirlenir. Yağlama tabakasının ayrılması durumu viskozite oranı ile ifade edilmektedir. Aşağıda viskozite oranı formülü verilmiştir.

$$k = v/v_1 \quad (4.19)$$

k : viskozite oranı

v : kinematik viskozite (işletme sıcaklığındaki)

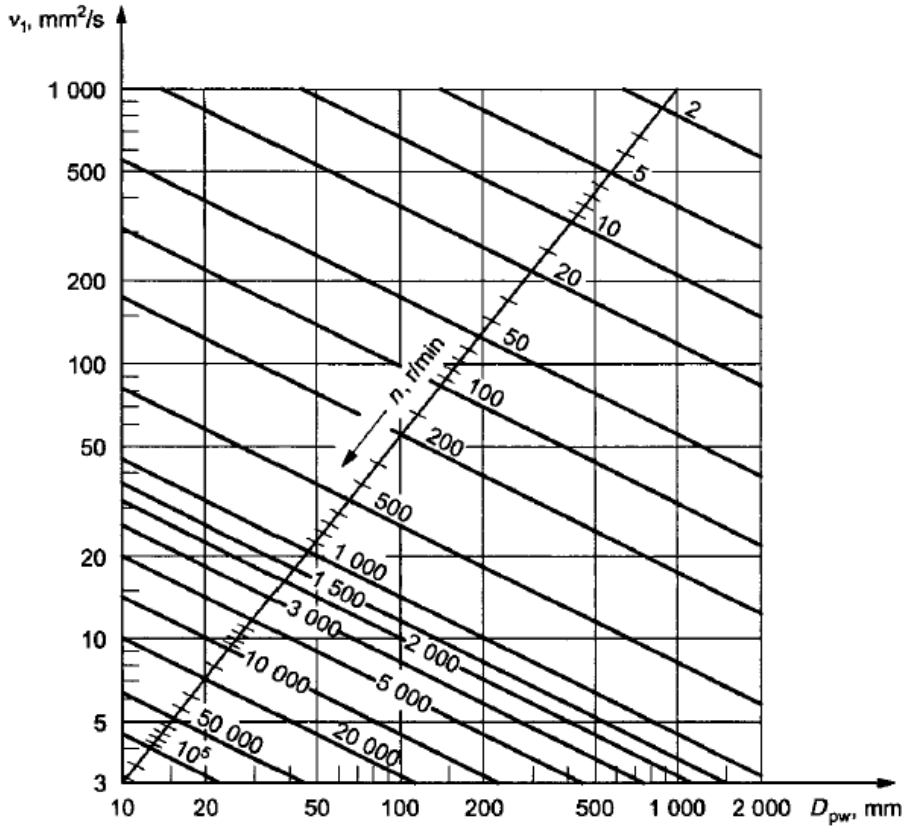
v_1 : kinematik referans viskozite

Yuvarlanma temas yüzeyleri arasında yeterli yağ film tabakasını oluşturmak için işletme sıcaklığında yağlayıcı belirli bir minimum viskozitede kalmalıdır. Aksi takdirde çok düşük viskozite değerlerinde yağ filmi kalınlığı çok ince olacaktır ve yağ film tabakası oluşması gerçekleşmeyebilir. Rulman ömrü işletme koşulundaki viskozite artırılarak uzatılabilir. Aşağıdaki denklemlere veya verilen grafiğe göre referans viskozite değeri bulunabilir. Verilen bu denklemler ve grafik gres ile yağlama içinde gresin baz yağı viskozitesi (base oil viscosity) esas alınarak kullanılabilir.

$$D_{pw}=0,5*(D+d) \text{ [mm]} \quad (4.20)$$

$$v_1 = 45000 n^{-0,83} D_{pw}^{-0,5} \quad n < 1000 \text{ rpm} \quad (4.21)$$

$$v_1 = 4500 n^{-0,5} D_{pw}^{-0,5} \quad n \geq 1000 \text{ rpm} \quad (4.22)$$



Şekil 4.26. Kinematik referans viskozite (v_1) belirlenmesi [26]

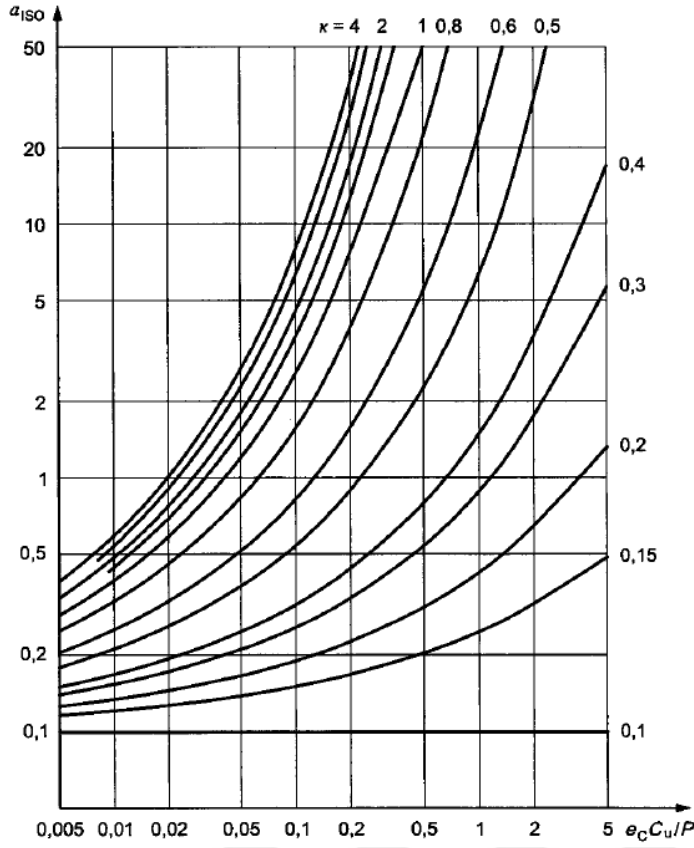
Yukarıda Şekil 4.26'da v_1 değerinin belirlenmesi için kullanılan grafik verilmiştir. Bu grafikte v_1 değeri, rulman devri ve rulmanın bölüm dairesi çapı değerlerine göre seçilmektedir.

Geliştirilmiş ömür katsayısının hesaplanması (a_{ISO})

a_{ISO} katsayısı aşağıda verilen fonksiyon denklemindeki değişkenlere göre hesaplanır.

$$a_{ISO} = f(e_c C_u / P, k) \quad (4.23)$$

Bu durumda a_{ISO} katsayısı radyal bilyalı rulmanlar için aşağıdaki grafiğe göre hesaplanabilir.



Şekil 4.27. a_{150} katsayısının belirlenmesi [26]

Yukarıda Şekil 4.27’de a_{150} katsayısının belirlenmesinde kullanılan grafik verilmiştir. Pratik değerlendirmede; $a_{150} \leq 50$ olmalıdır ve bu limit $(e_c \cdot C_u / P) > 5$ olduğunda geçerlidir.

$k > 4$ değeri için $k=4$ alınmalıdır.

$k < 0,1$ olduğunda a_{150} değeri eldeki denklem ve diyagramlar ile hesaplanamaz.

4.8.2. Sıcaklık testi sonucuna göre 6008 rulmanın ömür hesabı

Sıcaklık testi sonucuna göre farklı kapak sıkılığına sahip rulmanlar belli bir sıcaklık değerine ulaşmışlardır. Bu bölümde rulmanların kapak sıkılıklarına göre sıcaklık değerlerinin, rulman ömrüne etkisi tespit edilmiştir. Aşağıda verilen sıcaklık-rulman ömür grafiğinde sıcaklığın ne kadar önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Bu hesaplamalarda sıcaklık testlerinde ulaşılan sıcaklıklar, rulman içerisindeki gresin sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Sıcaklık testinde ölçülen sıcaklık değerleri rulman dış bileziği üzerinden ölçülen sıcaklık değeridir.

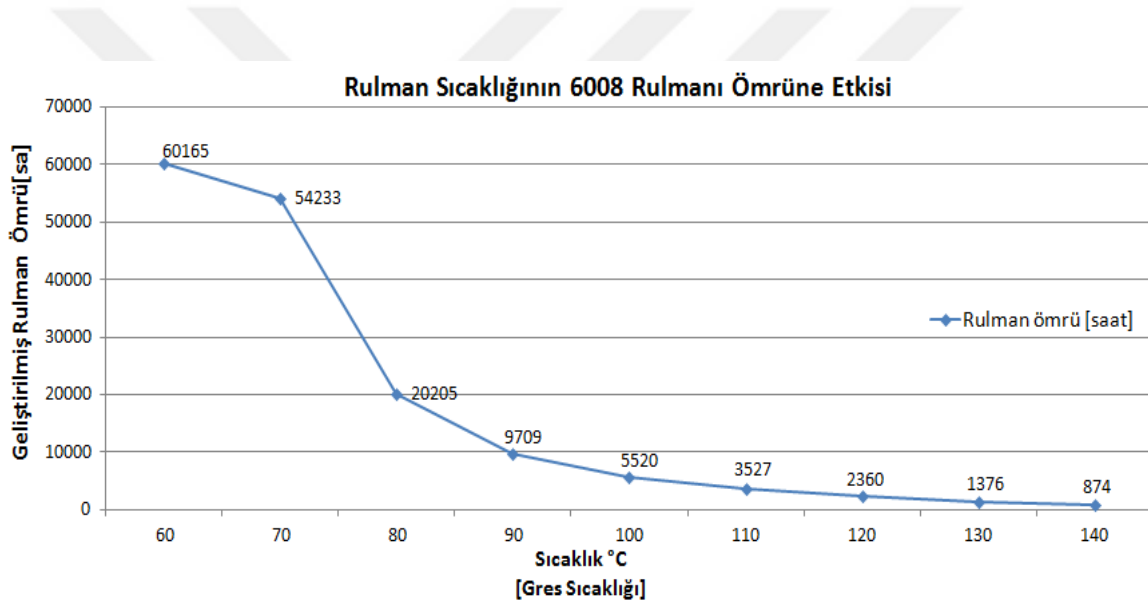
Gerçekte rulmanın dış bilezik sıcaklığı ve rulman içerisindeki gres sıcaklığı bir miktar farklıdır. Buradaki rulman ömrü hesaplama yönteminde bu fark ihmal edilmiştir.

Aşağıda ömrü hesaplanan rulmanların sıcaklık testi koşulları tekrardan verilmiştir.

Devir: 6000 rpm

Radyal Yük: 2000 N

Aşağıda ISO 281 standardına göre sıcaklık değişkenine göre rulmanların geliştirilmiş ömür değerleri hesaplanmıştır.



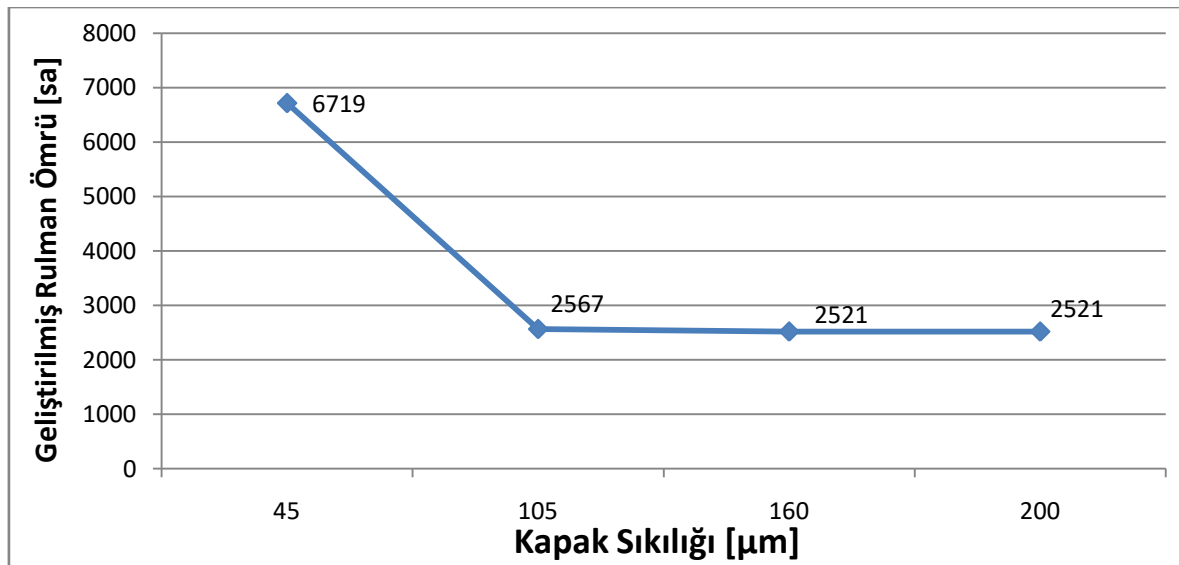
Şekil 4.28. 6008 rulmanı sıcaklık-ömür ilişkisi grafiği (ISO 281 standardına göre)

Yukarıda Şekil 4.28’de verilen grafikte görüldüğü gibi rulman içindeki gres sıcaklığı rulman ömrünü belirgin olarak etkilemektedir. Rulman ömrü 60°C gres sıcaklığında 60165 saat, 70°C sıcaklığında 54233 saat, 80°C sıcaklığında 20205 saat, 100°C sıcaklığında 5520 saat, 120°C sıcaklığında 2360 saat, 140°C sıcaklığında 874 saat rulman ömrü hesaplanmaktadır. Rulman ömrünü değiştiren en önemli parametrelerden olan sıcaklığın etkisi yukarıdaki grafikten görülmektedir. Dolayısıyla yapılan sıcaklık testi sonuçlarına göre elde edilen sıcaklık farkları arasında rulman ömrü değerleri aşağıdaki Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Sıcaklık testi sonuçlarına göre ortalama ve maksimum rulman sıcaklıklarına göre geliştirilmiş rulman ömrü değerleri

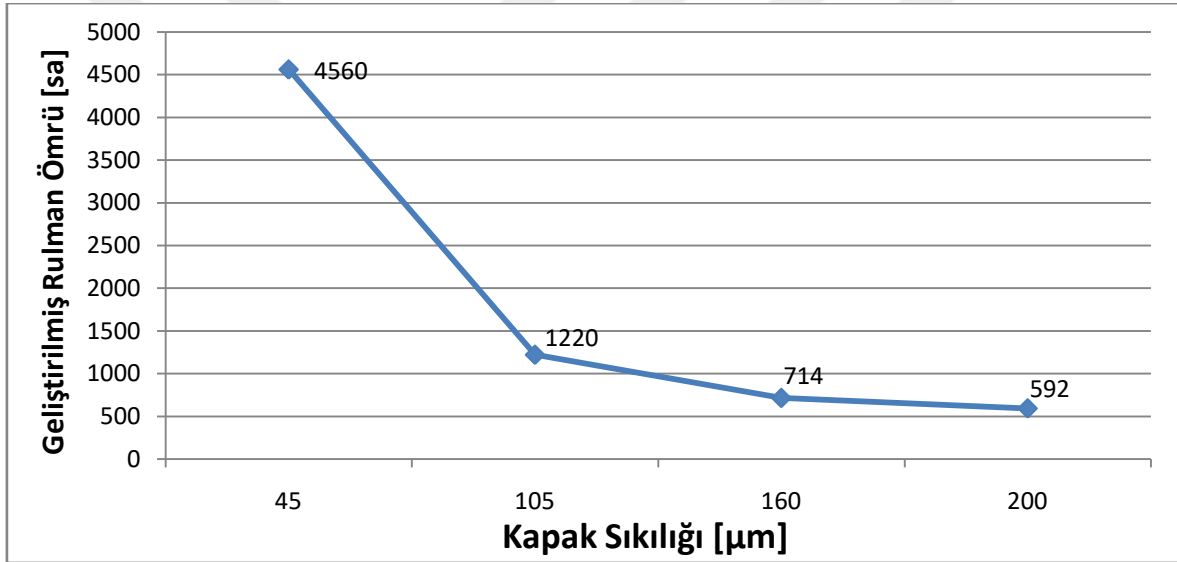
Kapak Sıklık Grubu	Ortalama sıcaklık [°C]	Rulman Ömrü [saat]	Maksimum sıcaklık [°C]	Rulman Ömrü [saat]
200 μm	118,9	2521	150	592
160 μm	118,9	2521	145	714
105 μm	118,6	2567	132,5	1220
45 μm	97,8	6719	104	4560
Temassız	65,7	60165	67	60165

Yukarıdaki çizelgede 65,7°C ve 67°C sıcaklıkta rulman ömür değerleri aynı hesaplanmıştır. Bu durumun sebebi ISO 281 standardına göre yapılan geliştirilmiş rulman ömrü hesabında eğer viskozite oranı (k) 4'ün üstünde çıkarsa teorik olarak bu hesapta viskozite oranı her zaman 4 alınmaktadır, dolayısıyla rulman ömrü değişmemektedir. 60-70°C sıcaklıklar arasında viskozite oranı 4'ün üzerinde çıkmaktadır, dolayısıyla bu sıcaklıklar arasındaki rulmanlarda teorik ömür hesabında fark oluşmamıştır. Viskozite oranı azaldıkça rulman ömrü azalmaktadır. Bu durum gerçekte şu şekilde açıklanabilir; rulman sıcaklığı arttıkça rulman içerisindeki yağlayıcı viskozitesi azalır (yağ incelir) ve yağ film kalınlığı azalmaktadır. Dolayısıyla yuvarlanma elemanları ile bilezik yuvarlanma yolu arasındaki temas kolaylaşır. Bu durumda metal-metale temas kolaylaşabileceğinden, rulman ömrünü olumsuz olarak etkiler.



Şekil 4.29. Kapak sıklık değerlerine göre 6008 rulman ömrü değişimi

Sıcaklık testi sonucuna göre ortalama rulman sıcaklıklarındaki rulmanların yukarıda Şekil 4.29'da kapak sıklık değerine göre değişen geliştirilmiş rulman ömrü değerleri verilmiştir. Rulman ömrü hesaplanırken ortalama rulman sıcaklıkları esas alınmıştır. Yukarıdaki şekildeki grafikte kapak sıklığına göre rulman ömründeki değişim 105 μm kapak sıklığından sonrada rulman ömrü neredeyse değişmemiştir. Rulman iç bileziği ile temassız olan sac kapaklı rulmanların ömür değeri 60165 saat olarak hesaplanmıştır ve grafiklerde verilmemiştir. Buradan anlaşılacağı üzere; rulman çalışma sıcaklığı üzerinde kapak temasının ve temas halindeki sıklık değerinin çok büyük etkisi vardır. Rulman ömrünü etkileyen en önemli parametrelerden olan çalışma sıcaklığı kapak sıklığı değerinden direkt olarak etkilenmektedir.



Şekil 4.30. Kapak sıklık değerlerine göre (maksimum sıcaklıklara göre) 6008 rulmanı ömrü değişimi

Sıcaklık testi sonucuna göre maksimum rulman sıcaklıklarındaki rulmanların yukarıda Şekil 4.30'da kapak sıklık değerine göre değişen geliştirilmiş rulman ömrü değerleri verilmiştir. Rulman ömrü hesaplanırken maksimum rulman sıcaklıkları esas alınmıştır. Yukarıdaki şekildeki grafikte kapak sıklığına göre rulman ömründeki değişim ortalama sıcaklıklara göre esas alınan hesaptaki değişime göre daha belirgindir. 105 μm kapak sıklığından sonrada rulman ömrü belirgin olarak azalmıştır fakat ömürdeki azalma eğrisi kapak sıklığı arttıkça azalmaktadır.



5. FARKLI KAPAK SIKILIĞINDA RULMAN KAPAKLARININ KONTAK KUVVETLERİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

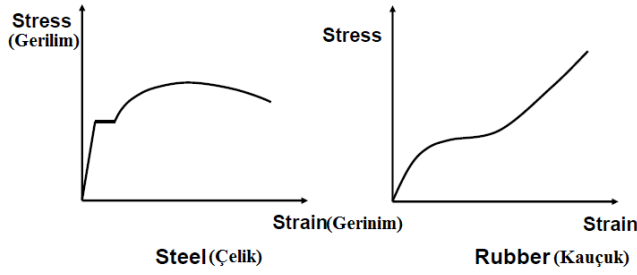
Çalışmanın bu bölümünde dört farklı kapak sıklığındaki lastik kapak iç dudağını belirlenen sıklılıklarla modelleyerek kapak montajından sonra, kontak halindeyken kapakta oluşan gerilmeleri, kapağın temasından dolayı oluşan kontak tepki kuvvetlerini ANSYS Workbench 2016 sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla tespit edilmiştir.

5.1.Kauçuk Kapakların Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi

Elastomer malzemelerin sonlu elemanlar modelini oluşturmak ve analizini yapmak için önemli üç parametre vardır. Bunlar; geometrik olarak modelin lineer olmaması, elastomer malzemenin mekanik davranışının lineer olmaması ve FEA programında kullanılacak kontak tipinin lineer olmamasıdır. Yapılacak analizlerde bu üç parametrenin lineer özellikte olmaması, tam olarak lineer olmayan (non-linear) bir analiz çözdürdüğümüz anlamına gelmektedir. Bu tip lineer olmayan analizlerde çözümün yakınsaması için kontak ayarları ve malzeme katsayıları dikkatli bir şekilde oluşturulmalıdır. Özellikle lineer olmayan kontak ayarları çözümü en çok etkileyen başlıca değişkendir.

5.1.1.Lineer olmayan (non-linear) malzeme özelliği

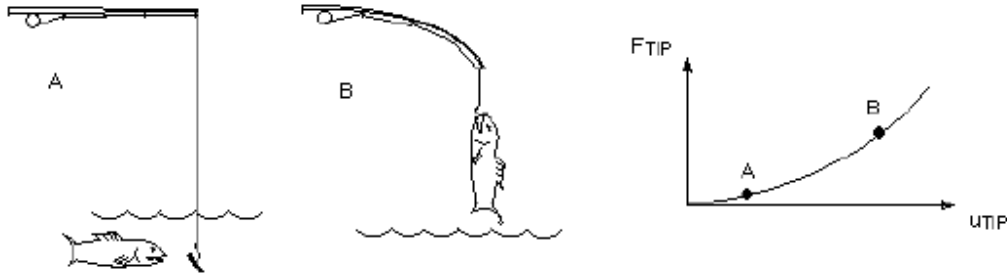
Elastomer malzemeler mekanik davranış olarak lineer olmayan malzeme davranışa sahip malzemelerdir. Metallerin çekme testi sonucunda belirli bir elastik modülü belirlenebilir. Hooke yasasının geçerli olduğu elastik bölgede metaller lineer davranış gösterirler. Tek eksenli çekme testi sonucu elde edilen gerilim-gerinim diyagramından metal malzemelerin elastik modülü çıkartılabilir. Bu grafikteki lineer doğrunun eğimi elastik modülü vermektedir fakat elastomer malzemeler için aynı durum geçerli değildir. Elastomer malzemeler mekanik bir deformasyon altında lineer olmayan bir davranış göstermektedirler. Kauçuk esaslı malzemelerin gerilme-gerinim diyagramları doğrusal değildir. Aşağıda bu durumu anlatan, örnek olarak verilen gerilme-gerinim grafikleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Çelik ve kauçuk malzemenin gerilim-gerinim grafiklerinin kıyaslanması [27]

Çok küçük bir gerinim değerinde kauçuk malzeme gerilme-gerinim grafiği doğrusu eğiminden kabaca elastik modül çıkarılabilir fakat bu malzemenin mekanik davranışının bütünüyle temsil edileceği bir değer olmayacaktır. En sağlıklı olan yaklaşım kauçuk malzemelerin mekanik davranışını, çekme testi yaparak gerilme-gerinim grafiğinden belirlemektir. Sadece bir adet çekme testi de kauçuk malzeme modeli oluşturmakta tam anlamıyla yeterli olmaz. Farklı deformasyon durumlarında; iki eksenli çekme, tek eksenli basma, saf kayma, çok eksenli çekme testi gibi testlerde yapılarak kauçuk malzeme sonlu elemanlar yazılımına daha sağlıklı bir şekilde tanıtılmalıdır.

5.1.2. Lineer olmayan geometri



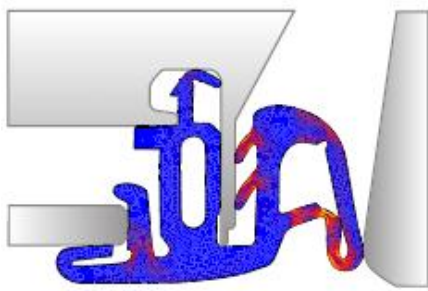
Şekil 5.2. Lineer ve lineer olmayan geometri karşılaştırması [27]

Bir yapı yüksek şekil değiştirmeye maruz kalıyorsa, değişen geometrik konfigürasyon lineer olmayan davranışa sebep olabilir. Yukarıda Şekil 5.2’de gösterildiği gibi A şeklinde hafif yük altında olta eğilmemekte, olta çubuğunun ucu esnek ve şekil değiştirmemektedir. Çünkü burada oltaya ağırlık yapan sadece yemdir ve oltanın ağırlığına göre çok hafiftir. Fakat B şekline bakıldığında oltanın ucuna büyük bir balık takılmıştır. Ağırlığın oltaya fazla gelmesinden olta eğilmiştir.

Bu durumda olta çubuğunun eğilmesinden dolayı moment kolu azalmıştır. Yükün hareketi ile olta çubuğunun katılık cevabı oluşur. Bu durumda geometri yüke göre değiştiğinden, sabit olmayan bir geometrik şekil olmaktadır.

5.1.3. Lineer olmayan kontak özellikleri

Kontağın lineer olmaması; birbiri ile temas halinde olan yada temas haline geçecek olan iki yüzeyin kontak durumunun hareket ile değişmesidir. Örneğin; rulman kapak montajı yapılırken rulman bileziklerinin sabit olması ve kapağın dış bilezikteki kapak yuvasına çakılması esnasında kapak yüzeyi ve bileziğin kapak yuvası yüzeyleri montaj hareketi ile sürekli değişen bir kontak durumuna sahiptir. Hareketin değişmesi ile kontak değişmekte dolayısıyla da elemanların katılık matrisleri değişmektedir. Montaj simülasyonlarında hareketle birlikte değişen bir kontak durumu olduğu için bu analizler de kullanılan kontak durumu lineer olmayan kontak türüdür.



Resim 5.1. Taşıt kapısının lastik fitilinin kapının açılıp kapanmasına göre şekil değişimi ile alakalı yapılan analiz [28]

Yukarıda Resim 5.1’de örnek olarak verilen taşıt kapısının lastik fitilinin kapının açılıp kapanmasına göre şekil değişimi ile alakalı yapılan analiz resmidir. Burada kapı fitilinin kapının metal yüzeyleriyle temas halinde olan bölümlerinin kontak durumu kapı açma kapama hareketi ile değişmektedir.

5.2. Hiperelastik Malzeme Modeli

Kauçuk malzemelerin sonlu elemanlar programında malzeme modelini oluşturmak amacıyla hazır kullanılacak matematik modeller ANSYS Workbench programında mevcuttur.

ANSYS programında kauçuk esaslı malzemeler viskoelastik yada hiperelastik olarak modellenebilir. Bu çalışmada viskoelastik etkiler göz önünde bulundurulmayarak lastik malzeme hiperelastik olarak modellenmiştir.

5.2.1. Kauçuk esaslı malzemelerin hiperelastik davranışı

Sonlu elemanlar modeli oluştururken yaygın olarak kullanılan iki temel malzeme modeli kullanılır. Bunlar; şekil değiştirme sabitlerine (strain invariants) bağlı olan polinomiyal bir fonksiyon olan Rivlin serisi ve uzama oranlarına (stretch ratios) bağlı olan şekil değiştirme enerji fonksiyonu olan Ogden formudur. Şekil değiştirme sabitlerine ve uzama oranlarına bağlı olan temel malzeme modelleri ticari olarak kullanılan sonlu elemanlar programlarına gömülü bir şekilde kullanılmaktadır. ANSYS programında; Neo-Hookean, Arruda-Boyce, Gent, Blatz-Ko, Mooney Rivlin, Yeoh, Ogden hiperelastik modelleri bulunmaktadır [29].

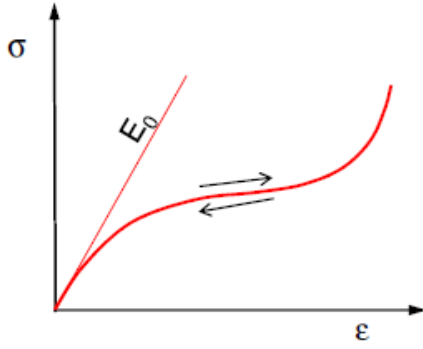
Hiperelastik malzeme modelleri kauçuk gibi malzemelerin malzeme izotropisi ve sıkıştırılamazlık kabulü ile lineer olmayan elastik davranışlarını ifade etmek için uygun hale getirilmiş modellerdir [30]. Genelde hiperelastik malzemeler şekil değiştirme enerji yoğunluğu fonksiyonu (strain energy density function) şeklinde ifade edilir. Bu terim sürekli ortamlar mekaniğine göre malzemenin içinde birim şekil değiştirmenin fonksiyonu olarak birim hacimde depolanan enerji olarak tanımlanır. Şekil değiştirme enerji fonksiyonunun geliştirilmesi ile aşağıdaki kabullenmeler genelde yapılır.

-malzeme mükemmel elastiktir.

-malzeme izotropiktir.

-malzeme sıkıştırılamazdır.

Bu çalışmada oluşturulan hiperelastik modellerde yukarıdaki kabuller geçerlidir. Aşağıda Şekil 5.3'te hiperelastik malzemelerin gerilme-gerinim grafiği verilmiştir. Hem çekme hem de basma gerilmesine maruz kalındığında malzemenin gerilme-gerinim grafiği aynı olmaktadır. Hiperelastik malzemelerin mükemmel elastik malzemeler olarak kabul edilmesi bu grafiktende görülmektedir.



Şekil 5.3. Hiperelastik malzeme gerilim-gerinim grafiği [31]

1948 yılında Rivlin'in yaptığı bir dizi çalışma sonucunda, Rivlin kauçuk türü malzemelerde mühendislik gerilmesi (σ) ile mühendislik şekil değişimi (ϵ) arasındaki bağıntının şekil değiştirme enerji fonksiyonu, W , ile ifade edilebileceğini belirterek;

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (5.1)$$

Eğer malzeme izotropik ise şekil değiştirme enerji fonksiyonu (W) aşağıdaki formüldeki gibi şekil değiştirme enerji sabitlerine bağlıdır.

$$\begin{aligned} W &= W(I_1, I_2, I_3) \\ I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ değerleri asal doğrultulardaki uzamalarıdır (principal stretches).

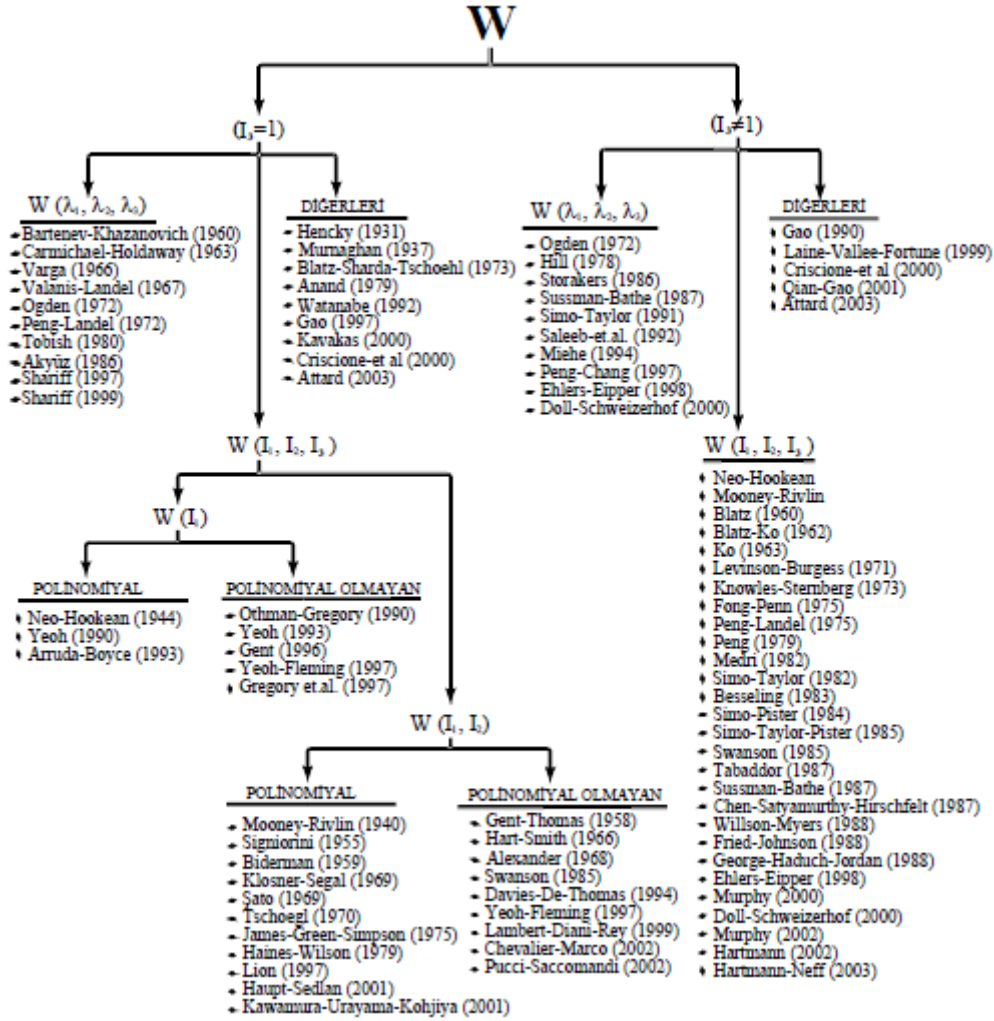
Ayrıca hiperelastik malzeme sıkıştırılmaz ise $I_3=1$ olur ve W formülü aşağıdaki formu alır.

$$W = W(I_1, I_2) \quad (5.3)$$

Böylece Rivlin, şekil değiştirme enerji fonksiyonunun şekil değiştirme invariantlarının fonksiyonu olduğunu belirtmiştir [32].

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (5.4)$$

Bu konudaki çalışmalar günümüzde de devam etmekte olup, araştırmacıların hedefi en basit formdaki gerilme şekil değiştirme bağıntısı elde etmektir. Literatürde yer alan ve bu amaca yönelik çalışmaların özeti aşağıdaki Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Kauçuk türü malzemeler için önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonlarının sınıflandırılması [32]

5.2.2. Temel hiperelastik malzeme modelleri

Kauçuk malzemeler farklı yapısal formlarda (örn; gözenekli veya az gözenekli gibi) ve kimyasal içeriklerde olabilir. Kauçuk malzemedeki kimyasal madde içeriğine göre malzemenin mekanik özellikleri ciddi şekilde değişmektedir.

Dolayısıyla kauçuk esaslı malzemeleri bilgisayar ortamında modelleyebilmek için farklı matematiksel modellere ihtiyaç vardır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri, geliştirilen matematiksel modellemeler ile sayısal olarak tanımlanabilmektedir. Birçok bilim adamı ve araştırmacı çeşitli kauçuk malzemeler için matematiksel malzeme modeller geliştirmiştir. Bu sayısal modellerden bazıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde sonlu elemanlar yazılımlarında bu malzeme modellerinin çoğu programlara gömülü olarak bulunmaktadır ve kullanıcının işini kolaylaştırmaktadır.

Neo-hookean formu

Şekil değiştirme enerji fonksiyonunu ilk defa Treloar kullanmıştır. Treloar yapmış olduğu çalışmada Neo-Hookean malzeme modelini farklı deformasyonlarda deneysel ve teorik verileri karşılaştırmıştır. Tek eksenli çekme deneyinde %40 şekil değişimi, basit kaymada %90 şekil değişimi ve eş iki eksenli çekme deneyinde %200 şekil değişimine kadar deneysel verilerle teorik veriler uyumaktadır. Tek eksenli basma deneyinde ise teorik ve deneysel sonuçlar oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Buradan Neo-Hookean malzeme modelinin küçük şekil değiştirme bölgesinde yeterli fakat büyük şekil değiştirme bölgesinde yetersiz olduğu görülmüştür [21]. Neo-Hookean modeli Mooney-Rivlin modelinin basitleştirilmiş versiyonudur [30]. Bu model Mooney-Rivlin formunun $C_{01}=0$ olan şeklidir ve yetersiz malzeme verisi olduğunda kullanılabilir. Kullanımı pratiktir ve kauçuk malzemelere nazaran küçük birim şekil değiştirme değerlerinde iyi bir yaklaşım olabilir. Fakat yüksek şekil değişimine sahip malzemelerde kullanıldığında malzemenin yüksek birim şekil değişimi kısımlarının grafiğini yakalayamayabilir [33].

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_e - 1)^2 \quad (5.5)$$

$$\mu/2 = C_{10} \quad (5.6)$$

$$\kappa_0 = \frac{2}{d} \quad (5.7)$$

C_{10} ve D_1 : Sıcaklığa bağlı malzeme katsayılarıdır. J_e : Elastik hacim oranı

κ_0 : hacimsel basınç katsayısı

Malzeme sıkıştırılmaz kabul edilirse; Neo Hookean formuna göre şekil değiştirme enerji fonksiyonu aşağıdaki gibi olur.

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) \quad (5.8)$$

Mooney rivlin formu

Elastomerlerin lineer olmayan gerilme analizleri için Mooney-Rivlin şekil değiştirme enerji fonksiyonu en yaygın kullanılan temel bağıntıdır [17]. Bu model izotropik kauçuk esaslı malzemelerin lineer olmayan davranışlarını yüksek bir hassasiyetle tahmin eden ilk hiperelastik modeldir [30]. Mooney Rivlin iki parametrelili modeli uzama ve kayma deformasyonunda orta seviyede yüksek birim şekil değişimine sahip malzemelerle iyi çalışır. Fakat yüksek seviyedeki uzamalarda gerilim-gerinim ilişkisini iyi yakalayamayabilir [33].

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J_{el} - 1)^2 \quad (5.9)$$

C_{10}, C_{01}, D_1 : Sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir.

I_1 ve I_2 birinci ve ikinci deviatorik birim şekil değiştirme sabitleridir. Aşağıdaki gibi tanımlanırlar;

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)}$$

$$\mu_o = 2(c_{10} + c_{01})$$

$$\kappa_o = \frac{2}{d}$$

(5.10)

ANSYS programında Mooney-Rivlin hiperelastik modelinin 2, 3, 5, 9 parametrelili versiyonları bulunmaktadır. Bu çalışmada Mooney-Rivlin formu hiperelastik model olarak kullanılmıştır.

Ogden formu

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

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 \right) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (5.11)$$

1972 yılında Ogden tarafından ileri sürülen fenomenoloji modeli invaryant esaslı olmak yerine asal doğrultudaki uzamalara dayalı bir modeldir. Bu model yüksek seviyedeki şekil değişimi değerlerine sahip malzemeler için kullanılabilir. Bu modeli kullanırken dikkat edilmesi gereken; tek bir test verisi ile bu modeli kullanmamaktır. Treolar'ın deneysel olarak uzama değerleri %700'lere kadar çıkan dolgusuz kauçukları ile Ogden modeli arasında iyi bir uyum gözlenmiştir [33].

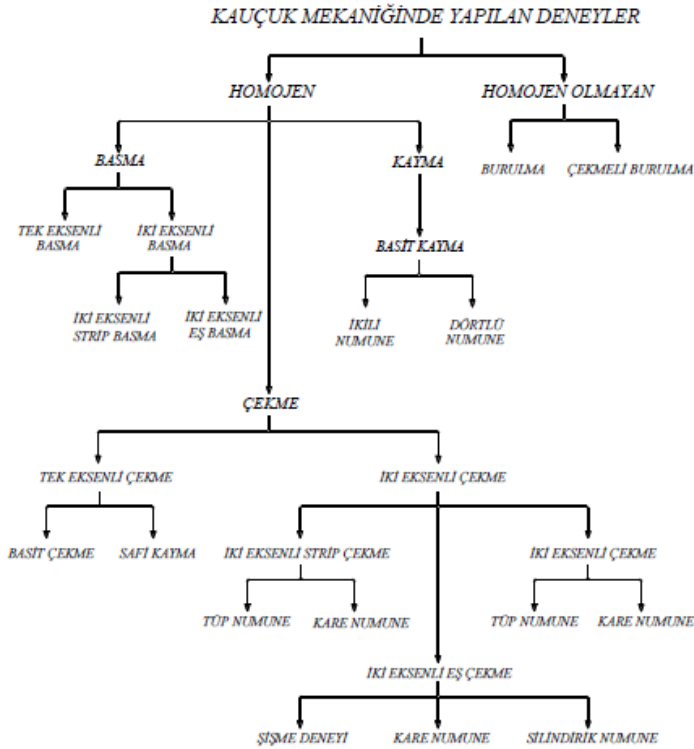
Yeoh formu

1993 yılında Yeoh kendi adını taşıyan bu fenomenoloji modelini ileri sürdü. Bu model sadece tek invaryanta dayalı olan 3.derecede polinomial forma sahiptir. Karbon siyah dolgulu kauçuk malzemelerin karakterize edilmesinde kullanılabilir ve yüksek uzama değerli malzemelerin mekanik davranışını ifade edebilir. Geniş uzama aralıklarında kullanılabilir ve sınırlı test verisi ile çeşitli deformasyon durumlarını simüle edebilir. Bu durum malzeme farklı malzeme testleri yapma ihtiyacını azaltmaktadır. Yeoh modeli indirgenmiş polinomial model olarakta adlandırılır ve formülü aşağıdaki gibidir [33].

$$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (5.12)$$

5.3. Kauçuk Esaslı Malzemelerin Gerilim-Birim Şekil Değişimi Davranışını Belirlemek İçin Yapılan Mekanik Testler

Kullanılacak hiperelastik malzeme modeli katsayılarını belirlemek için analizde kullanılacak olan malzemeye mekanik testler yapılarak, gerilim-gerinim verisi elde edilmelidir. Elde edilen gerilim-gerinim verisi, hiperelastik malzeme modeli seçilerek ANSYS programında eğri uydurma yöntemi yardımı ile hiperelastik malzeme modeli katsayıları çıkartılır. Çıkartılan bu katsayılar sayesinde bilgisayar ortamında elastomer malzememizin mekanik özelliklerini simüle edilmiş olur. Malzeme katsayılarını çıkartabilmek için literatürde yapılan çeşitli mekanik testler vardır. Aşağıda verilen Şekil 5.5'te kauçuk malzemeler ile yapılan bu tip testlerin özeti verilmiştir.

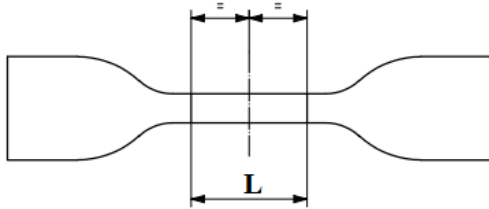


Şekil 5.5. Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler [32]

5.3.1. Tek eksenli çekme testi

Tek eksenli çekme testi elastomerler için yaygın kullanılan bir testtir. Bu testin ISO 37 ve ASTM D412 standartlarında nasıl yapılacağı ve test numunelerinin nasıl hazırlanması gerektiği belirtilmektedir. Elastomerler için yapılan ve test sonucunda gerilme-gerinim verisi elde edilecek testlerden uluslararası standart ile ifade edilen tek test tipidir.

ISO 37 standardında; standart dört farklı tipte test numunesi boyutları ve tanımı verilmiştir. Fakat standart dışı numunelerle de testler gerçekleştirilebilir, fakat elde edilen sonuçlar standarda dayandırılmamalıdır. Tek eksenli çekme deneyinde papyon şeklindeki kauçuk numuneler kullanılır. Aşağıdaki Şekil 5.6’da gösterildiği gibi bu numunelerin test ölçüm uzunluğu L ile gösterilen düz kısmıdır.



Şekil 5.6. Tek eksenli çekme testi papyon numunesi [34]

L: test uzunluğu [mm]

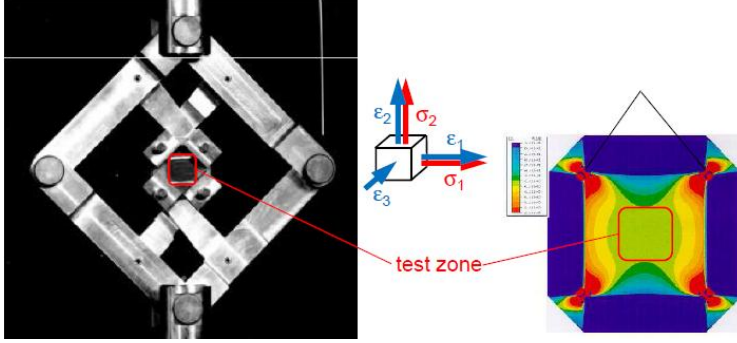
L uzunluğu ISO 37 standardına göre eninin en az 5 katı olmalıdır.

Pres tezgahının tutucu uçları arasında yerleştirilen numune belirli bir çekme hızı ile çekilir ve kopana kadar deforme edilir. Bu esnada test tezgahındaki yük hücreleri ölçtükleri kuvveti ve uzamayı kaydederler. Test sonucunda kuvvet uzama verisi elde edilir. L bölümündeki uzama temaslı ekstansometrelerle yada temassız olan lazer ekstansometreli test cihazları ile ölçülebilir. Bu sistemler test tezgahı üreticilerinin tercihine kalmıştır. Aşağıdaki Resim 5.2’de örnek bir lazer ekstansometreli tek eksenli çekme testi tezgahı resmi verilmiştir.



Resim 5.2. Tek eksenli çekme testi tezgahı [35]

5.3.2. İki eksenli çekme deneyi



Resim 5.3. İki eksenli çekme testi [36]

Bu testte kare şeklinde kauçuk plaka numuneleri kullanılır ve tek eksenli çekme testi mantığıyla aynıdır. Tek eksenli çekme testi pres tezgahında bu test gerçekleştirilebilir, fakat numune tutucusu kare numuneye göre dizayn edilip üretilmelidir. Yukarıdaki Resim 5.3 ve aşağıdaki Resim 5.4'te iki eksenli çekme testi tezgahıyla alakalı resimler gösterilmiştir. Bu testteki şekil değişimi sınırları tek eksenli çekme testine göre çok daha düşüktür. Bunun sebebi kauçuk numunenin dört kenarından sabitlenerek iki eksenli çekilmeleridir.



Resim 5.4. İki eksenli çekme testi düzeneği

5.3.3. Tek eksenli basma testi

Tek eksenli basma elastomerler için yaygın bir testtir. Analizlerde kullanmak amacıyla yapılan testlerde saf birim şekil değiştirme değerlerini elde etmek istenir fakat bu testte özellikle sağlıklı bir şekilde bunu başarmak zordur. Bunun sebebi test numunesi ile baskı levhası arasında sürtünme vardır ve test esnasında numune yana doğru genişleme hareketini tamamen serbest yapamamasıdır.

Düşük sürtünme düzeylerinde numune ve baskı plakası hatırı sayılır düzeyde bir kayma şekil değişimi gerçekleştirebilir. Bu durumda da gerilmenin şekil değişimine göre cevabı değişmektedir, çünkü bu testte amaçlanan tek eksendeki basma gerilmesinin tam olarak etkili olmasıdır. Kayma gerilmesinin dahil olması testin amacına uygun değildir. Genelde maksimum kayma birim şekil değişimi maksimum kompresyon birim şekil değişimini aşabilir [37].



Resim 5.5. Tek eksenli basma testi [38]

Yukarıda Resim 5.5'te test numunesi ve basma çeneleri resmi verilmiştir. Bu test için genelde 12 mm çapında, 29 mm boyunda kauçuk diskler kullanılır.

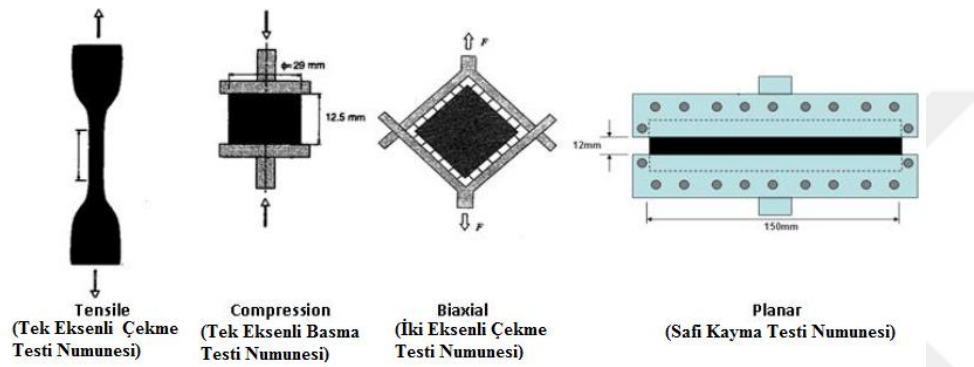
5.3.4. Safi kayma testi (Pure shear)

Safi kayma deformasyonu, basit çekme deformasyonu ile benzer olup, her iki deformasyonda tek bir doğrultuda kuvvet uygulanması sonucunda meydana gelmektedir. Fakat uygulanan tek eksenli kuvvet sonucunda basit çekme deformasyonunda bir yönde uzama ve diğer iki yönde eşit miktarda kısalma meydana gelmesine karşılık, safi kayma deformasyonunda bir yönde hiçbir deformasyon olmazken, kuvvet uygulanan yönde uzama diğer üçüncü yönde ise kısalma meydana gelmektedir. Aşağıda Resim 5.6'da bu testte kullanılan kauçuk plaka geometrisi ve tutucu çene gösterilmiştir.



Resim 5.6. Safi kayma testi

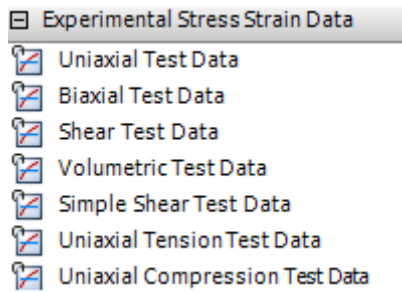
Literatürde bu konu ile alakalı yukarıdaki tabloda verildiği gibi bir çok test bulunmaktadır. Bu testlerin genel amacı kauçuk malzemeyi gerçek hayatta maruz kaldığı deformasyonlara göre en iyi şekilde simüle edebilmektir. Sadece tek eksenli çekme testi verisi ile oluşturulan bir hiperelastik model, bir çok test yapılarak oluşturulan hiperelastik modele göre daha kaba bir yaklaşımdır. Fakat tek eksenli çekme testinin kolay uygulanabilirliği ve yaygın olması bu testi diğer testlere göre daha yaygın kullanılmasını sağlamıştır. Yukarıda anlatılan testlerde kullanılan kauçuk numunelerin şekilleri aşağıda Şekil 5.7’de toplu olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Kauçuk malzeme testleri numuneleri

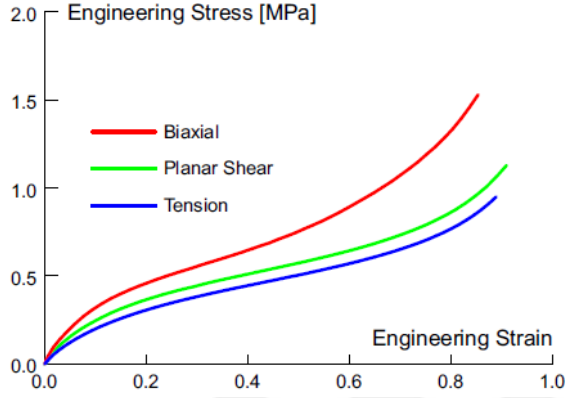
5.4. ANSYS Programında Hiperelastik Malzeme Modelleri

Yapılan tek eksenli çekme, iki eksenli çekme, safi kayma testi sonucunda elde edilen gerilim–gerinim verileri ANSYS programındaki aşağıda Resim 5.7’de gösterilen “DeneySEL Gerilim-Gerinim Verisi” bölümündeki test tiplerine göre seçilerek elastomer malzemenin gerilim-gerinim grafiği çizdirilir.



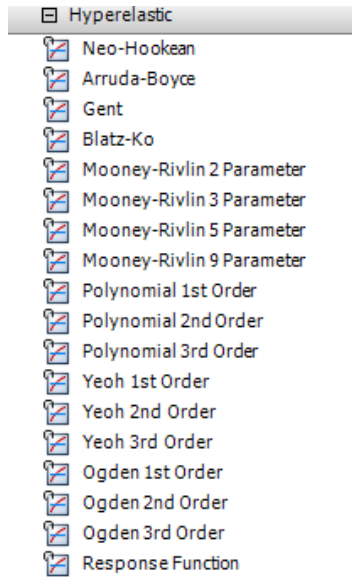
Resim 5.7. ANSYS Workbench programında deneysel gerilme-gerinim verisi tanımlama bölümü

Aşağıda Şekil 5.8’de örnek olarak yapılan üç farklı test sonucu kauçuk malzemeden elde edilen gerilme-gerinim grafiği verilmiştir. Bu çalışma için yaptırılan test sonuçları ve elastomer kapak tedarikçisinden alınan malzeme grafikleri, ORS firmasına ait özel veriler oldukları için bu çalışmada kullanılmamıştır. Mantık olarak izlenen yol ve aşağıdaki şekilde verilen grafikte tamamen aynıdır, sadece grafikteki sayısal değişkenler farklıdır.



Şekil 5.8. Üç farklı deformasyon tipinde örnek bir kauçuk malzeme gerilim-gerinim grafiği [39]

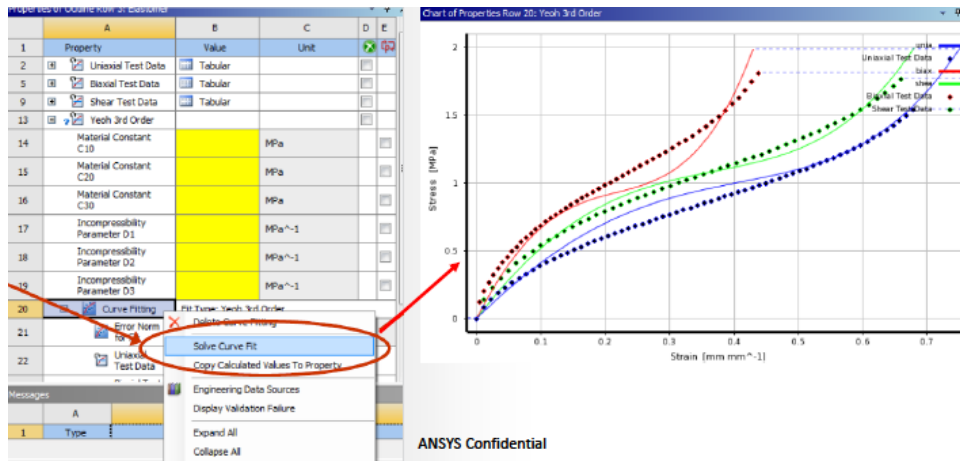
Bu şekilde analizde kullanacağımız malzememizin, mekanik testler sonucu elde edilen deneysel verisi programa tanıtmış olur. Bu kısımdan sonra analizlerde kullanılacak hiperelastik malzeme modeli belirlenmelidir. Bu model belirlenirken literatürde yaygın olarak kullanılan Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme modeli kullanılmıştır. Aşağıda Resim 5.8’de ANSYS programında mevcut olan hiperelastik modeller verilmiştir.



Resim 5.8. ANSYS Workbench programında hiperelastik malzeme modelleri

5.4.1. Ansys workbench programında eğri uydurma (curve-fitting) metodu ile hiperelastik malzeme katsayılarının çıkarılması

Elastomer malzemenin gerilme-gerinim verileri programa tanıtıldıktan ve hiperelastik malzeme modeli seçildikten sonra ANSYS programında hazır olarak kullanabileceğimiz eğri uydurma komutu kullanılır. Bu komut ile malzemelerin test sonucundaki gerilim-gerinim grafiklerine en yakın eğri çizilir. Çizilen bu eğri sonucunda gerçek verilere en yakın eğri elde edilmiş olur. Eğri uydurma sonucunda bu eğrinin en küçük kareler metoduyla çözülmesiyle, seçtiğimiz hiperelastik model malzeme katsayıları elde edilir.



Şekil 5.9. Eğri uydurma metodu ile test verilerinin değerlendirilmesi [40]

Yukarıda Şekil 5.9’da görüldüğü üzere; üç farklı deformasyon durumunda malzemenin gerilme-gerinim testleri sonucuna göre grafiği örnek olarak çizdirilmiş ve 3.dereceden Yeoh hiperelastik formu seçilmiştir. Kırmızı ile çizilen grafik iki eksenli çekme testi, yeşil ile çizilen grafik safi kayma testi sonucu, mavi ile çizilen grafik ise tek eksenli çekme testidir. Eğer elimizde sadece tek eksenli çekme testi sonucu verileri varsa malzeme modeli sadece tek eksenli çekme testi verilerine göre oluşturulabilir. Bu grafikler üzerinden geçen noktalı biçimde çizilen grafikler ise eğri uydurma metodu ile ANSYS programının çizdirdiği eğrilerdir. Sol tarafta sarı ile görünen ve boş olan malzeme parametreleri; seçilen matematiksel hiperelastik model formuna göre uydurulan eğrilerin çözdürülmesi ile elde edilir. Bundan sonra çözdürülmek istenen geometrik model, kontak ayarları ve sınır şartları programa tanıtılarak analiz sonucu elde edilir. Hiperelastik malzeme modeli seçilmesi ve oluşturulması hassas bir konudur. Eğri uydurma işleminin amacı test sonucu elde edilen gerçek eğriye seçilen malzeme modeli fonksiyonunun parametrelerinin bir şekilde en uygun biçimde uydurulmasıdır.

Sonuç olarak gerçekte ölçülen gerilme-gerinim ilişkisine en yakın malzeme davranışının bilgisayar ortamında oluşturulmasıdır. Gerçek bir malzeme davranışını elde edebilmek için birden fazla yükleme modu (tek eksenli çekme, kayma gibi) kullanılmalıdır.

Hiperelastik modeller için eğri uydurma işlemi dört alt birime ayrılır. İlk olarak gerilme-gerinim sonuçları programa girilirken uygun olmayan yada yanlış bir veri varsa, bu veriler düzeltilmelidir. İkinci adım olarak analizde kullanılacak hiperelastik malzeme modeli seçilmelidir. Üçüncü olarak eğri uydurma işlemi sonucu ortaya çıkan hata oranı değeri değerlendirilmelidir. Bu hata oranı gerçek eğriye göre uydurulan eğrinin hata oranını temsil eder ve eğer yüksek bir hata değerine sahipse, gerçek malzeme davranışından uzak bir malzeme davranışının göstergesidir. Son adım olarak, sonuç olarak elde edilen eğrinin nicel ve nitel olarak kıyaslanması yapılmalıdır [41].

Eğri uydurma yöntemi matematiksel olarak regresyon fonksiyonu sayesinde gerçekleşir. Regresyon işleminde en küçük kareler metodu kullanılır. En küçük kareler metodundaki hata değeri oluşturulan malzeme modelinin güvenilirliğini temsil eder. Yüksek hata değeri istenmeyen bir durumdur. Aşağıda Çizelge 5.1’de, bu duruma örnek bir çalışmadan alınan veriler hata oranları ile beraber gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Örnek bir tek eksenli çekme testi sonucunda oluşturulan hiperelastik malzeme modeli hata oranları [42]

Hyperelastic Model		Fit Test Data	Least Squared Error %	Fit Test Data	Least Squared Error %
Mooney Rivlin	2 parameters	-	60	-	96
	3 parameters	acceptable	15	-	95
	5 parameters	good	1	acceptable	30
	9 parameters	best	0,01	good	18
Ogden	Order 1	-	50	-	180
	Order 2	-	54	-	-
	Order 3	-	54	-	-
Neo-Hookean		-	65	-	180
Arruda-Boyce		acceptable	30	-	130
Gent		-	880	-	880
Yeoh	Order 1	-	60	-	180
	Order 2	-	40	-	140
	Order 3	good	5	-	100
Blatz-Ko		-	200	-	270

Yukarıdaki çizelgede eğri uydurma hata oranları farklı hiperelastik modeller için verilmiştir. Bu çalışma kumaşlar için yapılan bir çalışmadan örnek olarak alınmıştır. Yukarıda sol taraftaki kısımdaki hiperelastik malzeme modelleri sadece tek eksenli malzeme verisine göre, sağdaki hiperelastik modeller ise tek eksenli çekme, iki eksenli çekme ve safi kayma testi sonucunda elde edilen verilere göre oluşturulmuştur. Bu iki şekilden görüldüğü gibi tek bir test tipi kullanıldığında matematiksel olarak hata oranı çoklu test durumlarına göre çok daha düşük olmaktadır. Bunun sebebi üç farklı eğriye göre tek bir eğriye eğri uydurmak daha kolaydır. Fakat malzemenin gerçek davranışını da sağlıklı bir şekilde elde etmek için farklı testler yapmak daha gerçekçidir.

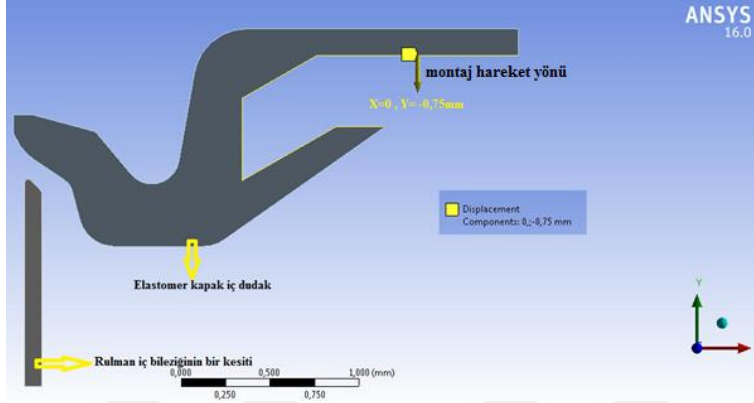
Yukarıdaki örnekte ayrıca hiperelastik malzeme modeli oluştururken kabul edilebilecek hata oranları da belirtilmiştir. Yukarıdaki çalışmada kullanılacak malzeme için en uygun modelin Mooney-Rivlin 9 parametrelili modeli olduğu görülmektedir. %30 hata oranı kabul edilebilir olarak ifade edilmiştir.

5.5. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Rulman elastomer kapağı geometrik olarak aksenal simetriktir, yani üç boyutlu modelden bir kesit alındığında tüm model için bu kesitteki şekil geçerlidir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada iki boyutlu geometrik model kullanılmıştır. Elastomer kapak tüm çevrede homojen olarak aynı kabul edilmiştir. Gerçekte bu durum tam anlamıyla doğru değildir, çünkü kapak imalatı esnasında kalıp yüzeylerinin tamamı ile aynı olmamasından dolayı çok küçük geometrik ve yüzeysel farklılıklar oluşur. Örnek olarak; kapak iç çapı her yerde aynı olmaz, farklı noktalarda çap değerleri değişebilir. Bu değişkenlikler toleranslar ile kontrol altına alınmıştır ve elastomer kapak tedarikçisi bu sınırlar dahilinde imalatını gerçekleştirmektedir. Çok küçük olan bu farklılıklar analiz programında sonucu etkileyecek değişkenliğe sahip değildir. Dolayısıyla genel olarak aksenal simetriye sahip geometri, iki boyutlu olarak modellenmiştir. İki boyutlu geometrik model oluşturmak üç boyutlu modellere göre çok daha kısa sürelidir ve pratik sonuçlar vermektedir.

ANSYS programında aksenal simetri eksenini “Y” eksenidir. Dolayısıyla geometrik model CAD programında oluşturulurken bu kurala dikkat edilmelidir. Aksi takdirde oluşturulan geometri tanıtmak istenilenden çok daha farklı bir geometri olacaktır.

Bu çalışmada oluşturulan iki boyutlu geometrik modeller AUTOCAD 2015 programında oluşturuldu ve ANSYS Workbench 2016 programında sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildi.



Şekil 5.10. 160 µm kapak sıkılığı için oluşturulan geometri

Yukarıda Şekil 5.10'da görüldüğü gibi rulman iç bileziğinin elastomer kapak ile kontak eden kısmı modellenmiştir, geri kalan kısımlar modelde kullanılmamıştır. Elastomer kapağın ise sadece iç dudak modellenmiştir. Dış bilezik kapak yuvasına çakılan dış dudak modellenmemiştir. Fakat y eksenindeki montaj mesafesi dış bilezik kapak yuvası ile kapak dış yuvası arasındaki mesafe referans alınarak kullanılmıştır. Kapağın dış bileziğe oturduğu durumdaki aldığı mesafe, montaj mesafesi olarak kabul edilmiştir. Yukarıda Şekil 5.10'da görüleceği üzere elastomer kapak içinde gerçekte bulunan takviye sacı modellenmemiştir ve resimde sarı çizgilerle gözüken kısımların hareketi X ekseninde sabitlenmiştir. Y ekseninde ise kapağın modellenirken ölçülen montaj mesafesi olan 0,75 mm negatif yönde hareket verilmiştir.

Gerçekte elastomer kapak; metal takviye sacı üzerine çok güçlü bir şekilde yapıştırılır, lastik kapak ile sac bitişik haldedirler. Elastomer ve metal malzeme arasındaki rijitlik farkından dolayı montaj esnasında takviye sacında herhangi bir hareket gerçekleşmediği kabul edilir. Montaj esnasında deforme olup şekil değiştiren kısımların hepsi lastik kısımlardır. Rulman iç bileziğinin ise X ve Y eksenlerindeki hareketi sabitlenmiştir. Gerçekte montaj prosesinde de bilezikler sabit, kapak pres ile rulman dış bileziğindeki yuvaya çakılmaktadır. Montaj prosesinden sonra rulman lastik kapağı iç dudakının duruşu ve kontak tepki kuvvetleri karşılaştırılacaktır.

5.5.1. Uygun ağ yapısının (mesh) oluşturulması

Sonlu elemanlar programlarında ağ yapısı oluşturmak analiz sonuçlarını etkileyen en önemli parametredir. Bir model oluşturulurken öncelikle kaba boyutlu elemanlara sahip bir ağ yapısı oluşturulur ve analizin sonuca ulaşması sağlanır. Sonrasında ağ yapısı eleman boyutu küçültülerek çözümler gerçekleştirilir. Belirli bir eleman boyutuna ulaştıktan sonra sonuçlardaki değişkenliğin az olması oluşturulan son modelin hassasiyetinin yeterli olduğunu göstermektedir. Bu şekilde bir çalışmanın yapılmasının bir diğer faydası ise çözüm zamanını çözüm hassasiyetine göre ayarlayabilmektir. Bir modele çok fazla ağ elemanı atılabilir fakat çözümü elde etmek günler sürebilir. Bunun yanında daha az eleman sayısıyla hassas ve doğru bir çözüm elde edilebilir. Bu uygulamaya ağ yapısı hassasiyet çalışması (mesh sensitivity study) denir. Aşağıda Çizelge 5.2’de gösterildiği gibi, bu ağ yapısı hassasiyetine göre altı adet model oluşturulmuştur ve ağ yapısı (mesh) hassasiyeti çalışması yapılmıştır. Çizelge 5.3’te ağ yapısı hassasiyet çalışması için oluşturulan modellere göre çözdürülen analizlerin sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.2. Ağ yapısı (mesh) hassasiyet çalışması

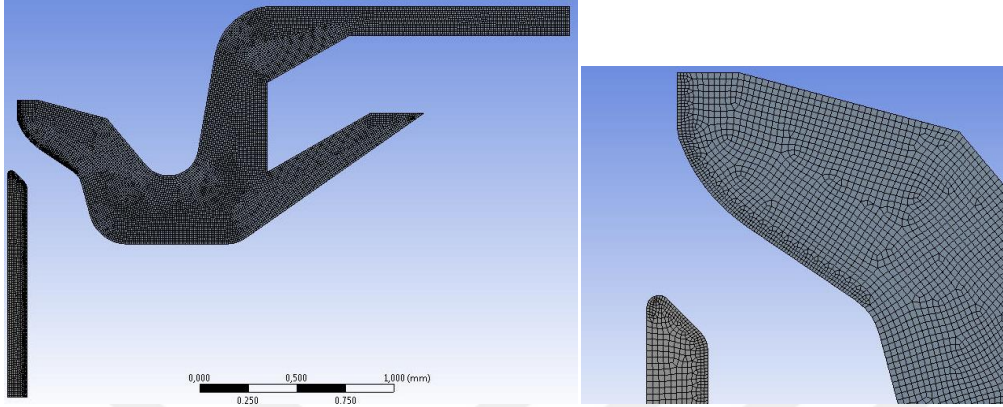
	Farklı Ağ Yapısı Model Numaraları					
	1	2	3	4	5	6
mesh sayısı	202	525	2122	12562	49700	197955
mesh kalitesi [%]	92,7	96,8	98,2	98,6	98,9	98,91
mesh boyutu [mm]	öntanımlı (default)	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025

Çizelge 5.3. Ağ yapısı (mesh) hassasiyet çalışmasına göre analiz sonuçları

Model No	Maksimum Gerilme [MPa]	Maksimum Gerinim	Maksimum Kontak Basıncı [MPa]	Kontak Tepki Kuvveti [N]			Kontak Penetrasyonu [μ m]
				X	Y	Total	
1	1,1586	0,10858	0,3912	4,165	0,6974	4,2232	7,5306
2	1,2025	0,11159	0,4651	4,216	0,7102	4,275	4,0786
3	1,3076	0,11904	0,6116	4,232	0,7073	4,2952	2,055
4	1,471	0,13096	1,0506	4,318	0,6403	4,3647	0,8929
5	1,5273	0,13496	1,5408	4,303	0,65692	4,3532	0,4003
6	1,5568	0,13704	1,7655	4,308	0,65798	4,3575	0,2179

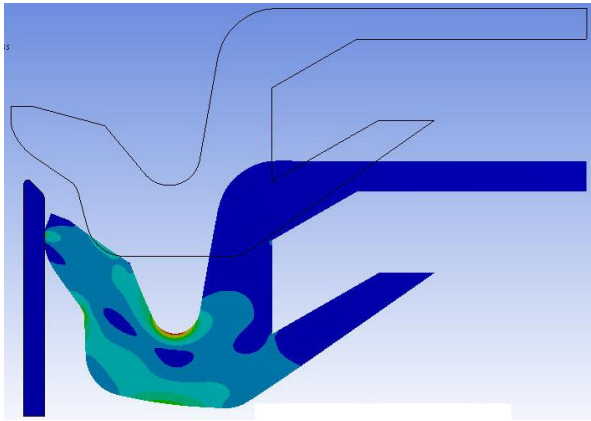
4 numaralı modelin çözüm süresi 739 saniye, 5 numaralı modelin 3990 saniye, 6 numaralı modelin 33624 saniye sürmüştür. Çözüm sürelerine göre değerlendirme yapıldığında 4 ve 5 numaralı modellerde az değişken doğru kabul edilebilecek sonuç ve aynı zamanda pratik bir zamanda çözümün elde edilmesi açısından da mantıklıdır.

Ayrıca 5 numaralı modelde kontak yüzeyleri arasında kontak penetrasyonu $0,4 \mu\text{m}$ gibi kabul edilebilecek düşük bir değerdir. 5 numaralı modeldeki ağ yapısı aşağıdaki Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11. $45 \mu\text{m}$ sıklıktaki kapak için oluşturulan ağ yapısının görünümü

Örnek olarak aşağıdaki Şekil 5.12’de analizi sonuçlanan $160 \mu\text{m}$ kapak sıklığına göre modellenmiş modelin eşdeğer (Von-Mises) gerilme sonucunu ve modelin montaj öncesinde ve sonrasındaki durumu verilmiştir.



Şekil 5.12. $160 \mu\text{m}$ kapak sıklığı için montaj halinde kapak iç dudak gerilme dağılımı ve montaj öncesi konum

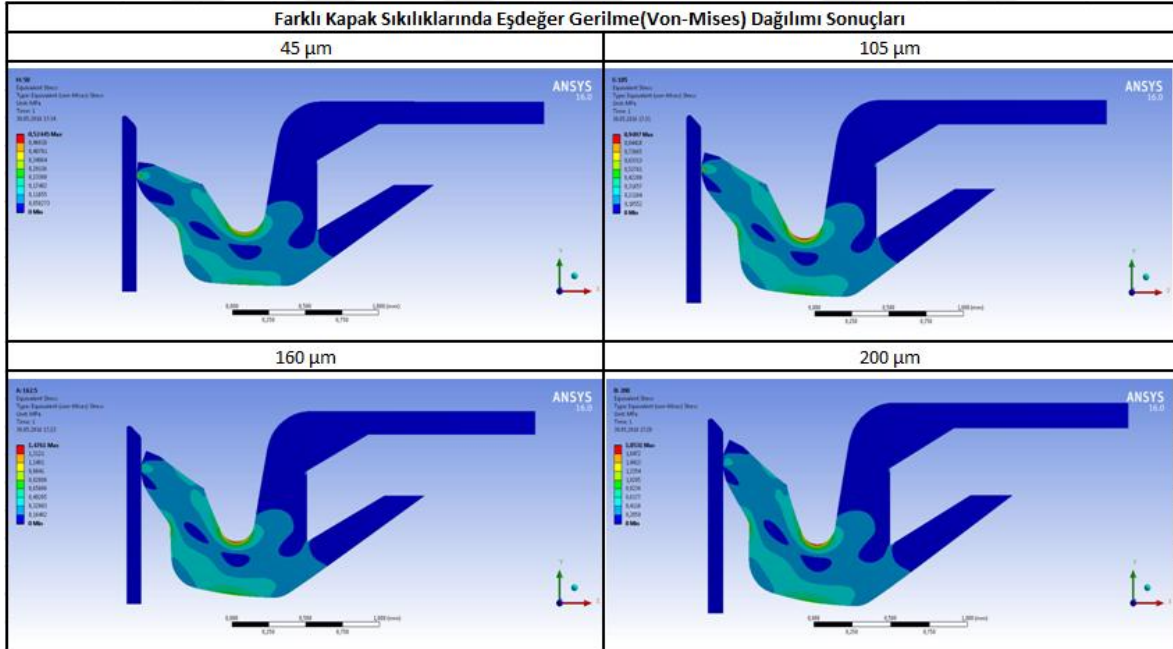
5.5.2. Kontak ayarlarının tanıtılması

Kontak kuvvetli bir lineer olmayan özelliktir, çünkü kontak yüzeyindeki normal ve teğetsel kontak katılığı (stiffness) değişen kontak durumları ile değişmektedir. Katılıkta gerçekleşen ani ve büyük değişimleri analizin çözümünün yakınsamasına zorluk çıkarmaktadır [43].

Bu analizde yüzeyler arası hareket olduğundan dolayı kontak ayarlarında sürekli olarak değişkenlik vardır. Yüzeylerin birbirleri ile ilişkisi hareket ile değişmektedir. Dolayısıyla önceden belirtildiği gibi lineer olmayan kontak ayarlarını uygun şekilde girmek sonuca ulaşılmasını etkileyecek faktördür.

ANSYS programında sürtünmeli veya sürtünmesiz kontak bu çalışma için kullanılabilir. Bu çalışmada sürtünmeli kontak tipi kullanılmıştır ve sürtünme katsayısı 0,15 olarak kabul edilmiştir. Burada önemli olan değişken ise kontak rijitlik katsayısıdır. Bu katsayı lineer olmayan kontaklı çözümlerin yakınsamasındaki en önemli parametrelerdendir. Seçilecek olan kontak tipine göre, eğer kontak; sürtünmeli, sürtünmesiz, bonded (bağlı,yapışık) veya no separation (iki yüzey arasında dikey yönde ayrılmaya izin vermez fakat kaymaya izin verir) ise kontak formülasyonu bu kontak tiplerine uygun seçilmelidir. Bu seçimlerin nasıl yapılacağı ve kullanım özellikleri ANSYS programı yardım menüsünde kontak menüsü detaylarında anlatılmaktadır.

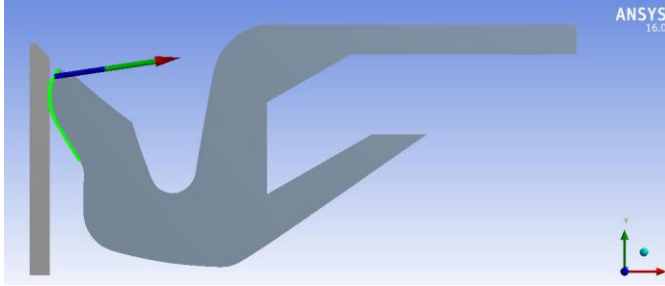
5.6. Analiz Sonuçları



Şekil 5.13. Farklı kapak sıkılıklarındaki elastomer kapakların iç dudaklarındaki eşdeğer gerilme dağılımları

Yukarıda Şekil 5.13'te analiz sonuçları eşdeğer gerilme cinsinden gösterilmiştir.

Sonuçlara bakıldığında kapak sıklığı arttıkça kapak iç dudağındaki gerilmeler ve şekil değişimlerinin arttığı gözükmektedir. 45 μm kapak sıklığına göre çok daha sıkı olan 200 μm kapak sıklığının kapak iç dudağındaki sıkıştırma miktarındaki fark bariz olarak sonuçlardan gözükmektedir.

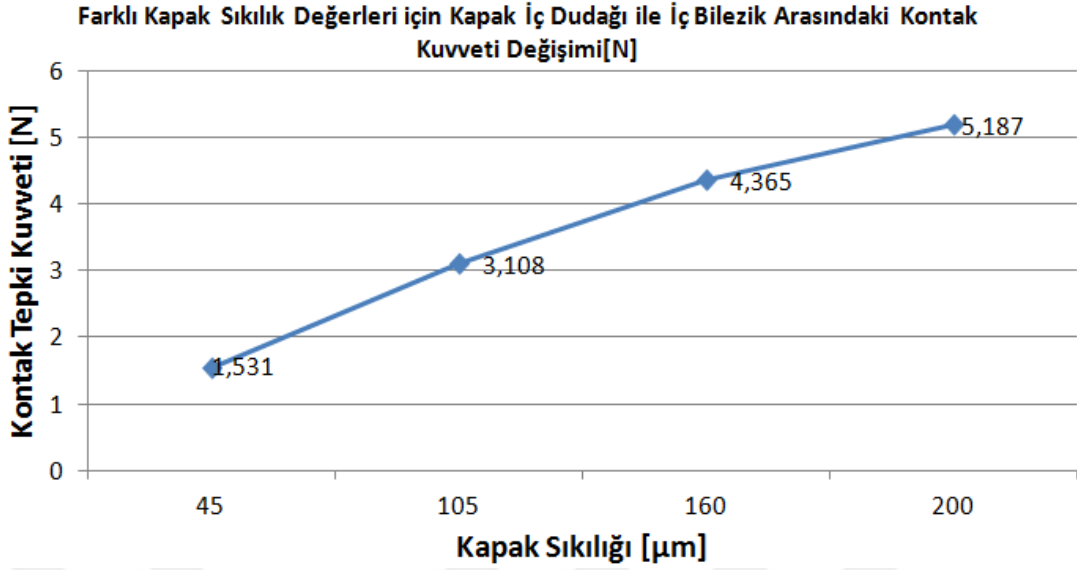


Şekil 5.14. 200 μm kapak sıklığındaki toplam kontak tepki kuvvetinin gösterilişi (diğer kapak sıklıkları için olan resimler benzer olduğu için verilmemiştir.)

Yukarıdaki Şekil 5.14'te sonlu elemanlar analizi sonucunda 200 μm kapak sıklığındaki kapağın rulman bileziği ile kontak tepki kuvveti gösterilmiştir. Yüzeyler arasında oluşan tepki kuvvetinin çoğu x eksenine doğrultusundadır, kuvvetin küçük bir kısmı y eksenine doğrultusundadır. Aşağıda Çizelge 5.4'te farklı kapak sıklıklarında sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan kontak kuvveti sonuçları verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi tepki kuvveti ağırlıklı olarak x eksenine doğrultusunda oluşmaktadır. Kapak sıklık değeri arttıkça kapak iç dudağındaki deformasyon arttığından kapak üzerinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme değeri de artmaktadır.

Çizelge 5.4. Farklı kapak sıklıklarına göre kapak iç dudağı ile rulman iç bileziği arasındaki kontak kuvveti FEA sonuçları

Kapak Sıklığı [μm]	Maksimum Eşdeğer Gerilme [MPa]	Kontak Tepki Kuvveti [N]		
		X	Y	Toplam
45	0,538	1,514	0,227	1,531
105	0,949	3,074	0,461	3,108
160	1,476	4,317	0,648	4,366
200	1,853	5,13	0,77	5,187



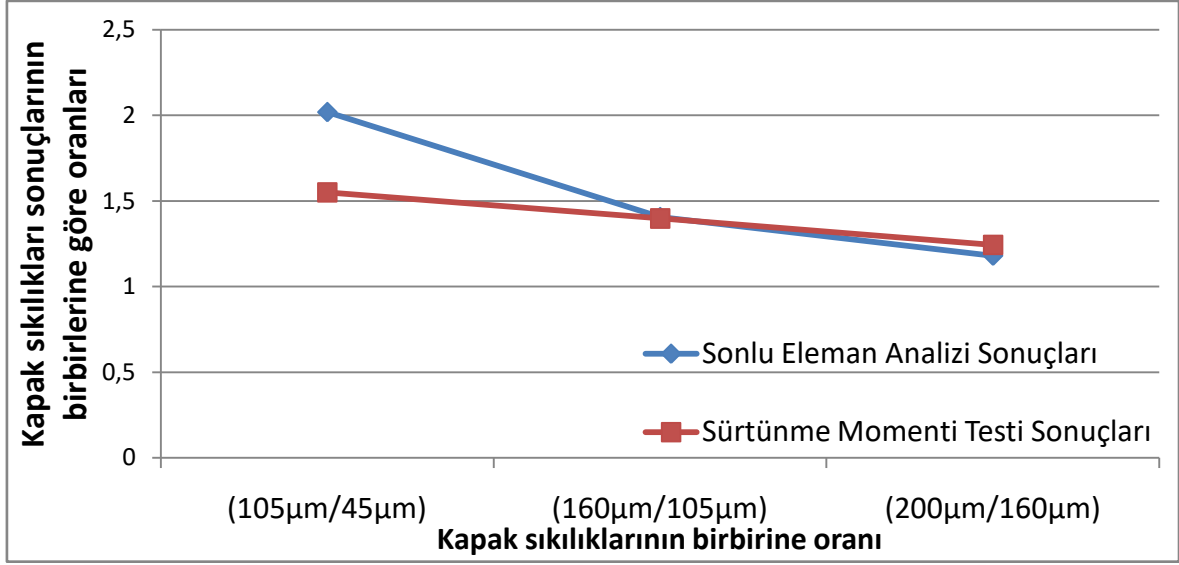
Şekil 5.15. Farklı kapak sıklıklarına göre kapak iç dudağı ile rulman iç bileziği arasındaki toplam kontak kuvvetinin değişim grafiği

Yukarıda Şekil 5.15'te görüldüğü gibi sonlu elemanlar analizi sonucunda, kapak sıklık değerleri arttıkça lastik kapak iç dudağı ile rulman iç bileziği arasındaki tepki kuvveti artmaktadır. Bu sonuç yapılan sürtünme momenti testleri sonuçlarıyla benzer doğrusal artışı göstermiştir. Kauçuk kapak ile metal arasında artan bu temas kuvveti, rulman sürtünmesini arttıran en önemli parametredir.

Farklı kapak sıklıklarında, sürtünme momenti testi ve analiz sonuçları birbirine göre oranlanarak aşağıda Çizelge 5.5'te verilmiştir. Bu tablodaki sonuçlar birimsizdir, sürtünme momenti testi ve analiz sonuçlarının birbiriyle olan ilişkisinin tespiti amacıyla oluşturulmuştur.

Çizelge 5.5. FEA sonuçları ve test sonuçlarının oranlanarak kıyaslanması

Kapak Sıklığı [μm]	Sürtünme Momenti Testi Sonuçlarının Ortalamalarının Birbirine Oranı [Nm]	Sonlu Elemanlar Analizi Kontak Kuvveti Sonuçlarının Birbirine Oranı [N]
105/45	$0,0755/0,0487=1,55$	$3,10/1,53=2,02$
160/105	$0,1056/0,0755=1,40$	$4,36/3,10=1,41$
200/160	$0,1314/0,1056=1,24$	$5,18/4,36=1,18$



Şekil 5.16. Sürtünme testi sonuçları ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının birimsizleştirilerek birbirine oranlanarak kıyaslanması

Yukarıda Şekil 5.16 ve Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi sürtünme momenti testinde elde edilen sonuçların kapak sıklıklarına göre birbirine oranlanmıştır. Aynı yöntem sonlu elemanlar analizinde elde edilen kontak tepki kuvveti değerleri için yapılmıştır. Sonuç olarak sonuçlar birimsizleştirilerek yapılan test ve analiz sonuçları arasında oransal bir bağıntı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yukarıdaki grafiğe bakıldığında sonuçlar arasındaki oransal durum birbiriyle benzerdir. Sadece 105µm/45µm kapak sıklıklarının sonuçları oranlandığında arada fark oluşmaktadır. Bu durum dışında diğer kapak sıklıkları için elde edilen sonuçların birbiri ile oranları uyum göstermektedir. Yapılan sürtünme momenti testi sonucuna göre kapak sıklığının artmasıyla artan rulman sürtünmesi, yapılan sonlu elemanlar analizi sonucuna göre de değerlendirildiğinde benzer bir artış eğilimi analiz sonuçlarında da yukarıdaki sonuçlardan gözüktüğü gibi tespit edilmiştir. Bu durum, sonuçlar arasında mantıklı bir ilişki olduğunu göstermiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rulman performansını etkileyen en önemli parametrelerden olan kapak sıklığı ve tasarımıdır. Çalışmada yapılan test sonuçlarında incelendiğinde yüksek kapak sıklığına sahip bazı rulmanların sıcaklık testlerinde 150°C'ye ulaştığı görüldü. Bu sıcaklık rulmanın sürekli çalışma sıcaklığı olarak kabul edildiğinde bu rulmanda kullanılan NBR elastomer kapak malzemesi kimyasal olarak bozulmaya başlayacaktır ve sızdırmazlık özelliğini kaybedecektir. Çünkü NBR malzemesi 125°C sıcaklık değeri üzerinde kısa süreli olsa bile kullanılmamalıdır, aksi takdirde bu malzemede kimyevi bozunmalar gerçekleşir, dolayısıyla kapak sızdırmazlık görevini yerine getiremez. Buradan anlaşılacağı üzere rulman kapak sıklığı rulman ömrünü direkt etkileyen bir parametredir. Yüksek sıcaklığa çıkan bu rulmanda yapılması gereken, daha yüksek sıcaklığa dayanabilecek kapak malzemesi kullanmaktır veya dizayn parametresi olan kapak sıklığını daha hafif hale getirerek rulman çalışma sıcaklığı düşürülmelidir. Daha yüksek sıcaklığa dayanıklı kapak malzemesinin seçilmesi rulman maliyetini arttırır. Dolayısıyla dizayn yapılırken kapak sıklığını eğer mümkünse çalışma koşullarına göre ayarlayabilmek öncelik olmalıdır. Eğer bu şekilde çözüm elde edilemiyorsa, kapak malzemesi değişikliği seçeneği seçilmelidir.

Yapılan sürtünme momenti testleri sonucu, yük uygulanmayan rulmanlarda kapak sıklığı arttıkça rulman sürtünme momentinde neredeyse doğrusal olan bir artış gözlenmiştir. Örneğin; 45 µm kapak sıklığındaki rulman grubu sürtünme momenti 48,7 Nmm iken 105 µm kapak sıklığına sahip rulman grubu sürtünme momenti 75,5 Nmm ve 200 µm kapak sıklığına sahip rulman grubu sürtünme momenti 131,4 Nmm olduğu tespit edildi. Sürtünme momenti testi sonucunda rulman çalışmasını belirgin şekilde etkileyen en büyük değişkenlik kapak sıklıkları arasındaki farktır. Kapak sıklığı değişkenliğinin rulman performansı üzerindeki etkisi açıkça belirlenmiştir.

Yapılan sıcaklık testleri sonucu, yük uygulanan rulmanlarda kapak sıklığı arttıkça rulman sıcaklıklarındaki artış sürekli olarak doğrusal olarak artmamaktadır. Ayrıca 105 µm kapak sıklığı değerine kadar rulmanların ortalama sürtünmesi yükselmekte, bu kapak sıklığı değerinden sonra rulmanların sıcaklık değerlerinde yüksüz yapılan sürtünme momenti testindeki gibi belirgin bir fark gözlenmemektedir. Rulmanlar 105 µm kapak sıklığından sonra ortalama sıcaklıkları 118°C civarında gelmektedir.

2000 N radyal yük uygulanan rulmanlarda, yük uygulanmayan rulmanlar gibi kapak sıklığının rulman performansına etkisi bariz olarak belirlenmemiştir. Burada 2000 N değerinde uygulanan yükün rulman çalışma performansına etkisi olmuştur ve belirli bir kapak sıklığı eğerinden sonra rulman sıcaklık değerlerinde önemli farklılıklar gözükmemektedir. Fakat maksimum sıcaklıkta çalışan rulmanlar düşünüldüğünde kapak sıklığı değişimine sürekli sıcaklık artışı mevcuttur, bu artış doğrusal olmamakla birlikte azalarak artan bir doğruya sahiptir.

Kapak sıklığının artması; teoride ve pratikte rulman çalışma sıcaklığının yükselmesi demektir. Bu durumdan dolayı rulman ömrü kapak sıklığından olumsuz olarak etkilenmiştir. Fakat kapağın görevi sebebiyle rulmanı dış etkilerden koruması da unutulmamalıdır. Rulman sıcaklığını düşürmek amacıyla çok hafif kontağa sahip rulman tasarımı yapılırsa bu durumda yağ sızdırmazlığı istenilen şekilde sağlanamayabilir. Bu durumun tersi düşünüldüğünde, rulman tasarımı yaparken kapak sıklığı gereğinden fazla seçilirse, rulmanda gereksiz bir sıcaklık artışı olacaktır ve bunun sonucunda rulman ömrü olumsuz etkilenecektir. Bundan dolayı bu çalışmada yapılan farklı kapak sıklıklarının incelenmesi önemlidir.

Sonlu elemanlar analizi programında farklı kapak sıklıkları modellenerek, rulman iç bileziği ile kapak iç dudak arasındaki temas kuvveti belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda artan kapak sıklığı ile temas kuvveti doğrusal olarak artmaktadır. Analiz sonuçları, rulmanlara yük uygulanmayan sürtünme momenti testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sebebi sürtünme momenti testi yapılan rulmanlar arasındaki tek değişkenin kapak sıklıkları olmasıdır. Yük uygulanan sıcaklık testleri sonuçlarının değerlendirilmesi sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre yorumlanamaz. Bunun sebebi; sıcaklık testlerinde uygulanan 2000 N radyal yük analizlerde bir değişken olarak simüle edilmemiştir.

Radyal temaslı elastomer kapakların sürtünmesi dışında, aksenal temaslı ve hem aksenal hem radyal temaslı elastomer kapak dizaynlarında rulman sürtünmesi üzerindeki etkileri incelenmelidir.

Rulman elastomer kapak dizaynı kapak sıklığı gibi rulman performansı için çok önemli bir parametredir. Farklı kapak dizaynlarının rulman performansı üzerindeki etkisi başka bir çalışmada incelenebilir.

Rulman içerisindeki değişkenlik arttıkça ve yük, devir gibi dış etkiler rulmana uygulandığında rulman performansının kapak sıklığına göre değişimini belirlemek zorlaşmaktadır. Bunun ana nedeni; rulmana uygulanan yüksek devir ve yük gibi değişkenlerin, kapak sıklığı değişimi etkisine ağır basmasıdır. Bu sebepten dolayı sürtünme momenti testinde yüksek devir kullanılmamış ve rulmanlara yük uygulanmamıştır. Sadece kapak sıklıklarının rulman üzerindeki etkisi tespit edilmiştir.

Yapılan testler sonucunda; rulman çalışma sıcaklığı üzerinde kapak temasının ve temas halindeki sıklık değerinin çok büyük etkisi olduğu tespit edilmiştir. Rulman ömrünü etkileyen en önemli parametrelerden olan çalışma sıcaklığı, kapak sıklığı değerinden direkt olarak etkilenmektedir. Rulman dizaynı yapılırken bu parametrenin etkisi iyi düşünülmelidir.



KAYNAKLAR

1. İnternet: ORS. rulman. Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ş.. 2017-12-19. URL:<https://ors.com.tr/tr/page/42/rulman-nedir->
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fors.com.tr%2Ftr%2Fpage%2F42%2Frulman-nedir-&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
2. Sada, T. (2017). Loss reduction of rolling bearings for automobile. *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 1.
3. Takimoto, M., Ishikawa, T., and Harada, K. (2011). Technical development of automotive wheel bearing seals(Muddy-water resistant seal, low temperature environment seal and super low-torque seal). *JTEK Engineering Journal*, 64, 68.
4. SKF Group. (2013). *Rolling bearings catalogue*. SKF Group, 40, 296, 24, 58, 59, 149, 98.
5. Belevi, M., Özses, Ç., Demirsoy, M. (2012). *Rulmanlı yataklar*. Dokuz Eylül Üniversitesi, 3.
6. Temiz, V. (2012). *Makine elemanları rulmanlı yataklar ders notları*. İTÜ, 7-8.
7. İnternet: teknikport.2017-12-19.URL:<http://www.teknikport.com/2012/03/rulman-2/>
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.teknikport.com%2F2012%2F03%2Frulman-2%2F&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
8. İnternet: RULSAN. 2017-12-19. URL:<http://rulsan.com.tr/oynak-bilyali-rulmanlar/>
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Frulsan.com.tr%2Foynak-bilyali-rulmanlar%2F&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
9. İnternet: 2017-12-19. URL:<http://catalog.ubx-usa.com/>
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fcatalog.ubx-usa.com%2F&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
10. İnternet: 2017-12-19. URL:http://www.made-in-china.com/multi-search/roller%2Bbearings/F1--PP_cylindrical%2Broller%2Bbearing/1.html
http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.made-in-china.com%2Fmulti-search%2Froller%252Bbearings%2FF1--PP_cylindrical%252Broller%252Bbearing%2F1.html&date=2017-12-19, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
11. İnternet: 2017-12-19. URL:<http://www.degisimrulman.com/konik-makarali-rulmanlar/>
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.degisimrulman.com%2Fkonik-makarali-rulmanlar%2F&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
12. İnternet: SKF.2017-12-19. URL:<http://evolution.skf.com/us/skf-polymer-products-and-components/>
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fevolution.skf.com%2Fus%2Fskf-polymer-products-and-components%2F&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.

13. İnternet: 2017-12-19. URL:<https://www.diy-india.com/shop/bearings-19/>.
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.diy-india.com%2Fshop%2Fbearings-19%2F&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
14. Vahapoğlu V. (1998). *Kauçuk Türü Malzemelerin Malzeme Sabitlerinin Eş-İki Eksenli Çekme Deneyi İle Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
15. Karatas A. (2001). *Elastomer Malzemelerin Statik ve Dinamik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
16. Vahapoğlu, V. (2013). Kauçuk türü malzemeleri sınıflandırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 32.
17. Gent, A. N. (2012). *Engineering with rubber how to design rubber components* (Third edition). Munich: Hanser Publishers, 2, 221, 223, 402-406, 15, 17.
18. Flitney, R. (2014). *Seals and sealing handbook* (Sixth edition). Oxford: Elsevier, 371, 395.
19. Ciesielski, A. (1999). *An introduction to rubber technology*. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 112, 18, 113, 22.
20. Simpson, R. B. (2002). *Rubber basics*. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 77, 81, 94, 103.
21. Soyel D. (2008). *Sonlu Elemanlar Metodu İle NR/SBR Tipi Elastomer Esaslı Malzemelerin Davranış Modellerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 17, 20.
22. Horve, L. (1996). *Shaft seals for dynamic applications*. New York: Marcel Dekker Inc., 13-14.
23. Gupta, S. D., Mukhopadhyay, R., Baranwal, K. C., Bhowmick, A. K. (2014). *Reverse engineering of rubber products concepts tools and techniques*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 5, 7.
24. White, J. R., De, S. K. (2001). *Rubber technologist's handbook*. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 50, 77-78.
25. Harris, T. A., Kotzalas M. N. (2006). *Essential concepts of bearing technology*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 5-6.

26. International Standart Organization. (2010). *Rolling bearings dynamic load ratings and rating life english translation of DIN ISO281:2010-10*. Berlin: International Standart Organization, 11-12, 18, 25-32, 44.
27. ANSYS. (2010). *Ansys advanced training introduction to nonlinearities*. ANSYS Inc., 16-17.
28. MSC Software. (2010). *Nonlinear finite element analysis of elastomers*. MSC Software, 4.
29. Ghaemi, H., Behdinin, K., Spence, A. (2006). On the development of compressible pseudo-strain energy density for elastomers application to finite element. *Journal of Materials Processing Technology*, 318.
30. Carlescu, V., Prisacaru, G., Olaru, N. D. (2014). FEM simulation on uniaxial tension of hyperelastic elastomers. *Applied Mechanics and Materials*, 659 (2014), 57-62.
31. Jakel, R. (2010). *Analysis of hyperelastic materials with mechanica theory and application examples*. PTC Global Services, 8.
32. Vahapoğlu V. (2006). *Kauçuk Türü Malzemelerin İnelastik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Trabzon, 3-7.
33. Shazhad, M., Kamran, A., Siddiqui, M. Z., Farhan, M. (2015). Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material. *Materials Research Online Version*, 2.
34. International Standart Organization. (2011). *Rubber, vulcanized or thermoplastic determination of tensile stress-strain properties ISO37*. Berlin: International Standart Organization, 5.
35. İnternet: Instron. . 2017-12-19. URL:<http://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical>.
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.instron.us%2Fen-us%2Fproducts%2Ftesting-systems%2Funiversal-testing-systems%2Felectromechanical&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2017.
36. Duncan, B. (1999). Test methods for determining hyperelastic properties of flexible adhesives, *Report of Centre for Materials Measurement and Technology National Physical Laboratory*, 3.
37. Miller, K. Testing elastomers for hyperelastic material models in finite element analysis, *Testing and Analysis Axel Physical Testing Service*, 3.

38. Axel Products Inc. (2006). *Testing brief compression or biaxial extension*. Ann Arbor: Axel Products Inc., 1.
39. MSC Software. (2010). *Whitepaper nonlinear finite element analysis of elastomers*. MSC Software, 26.
40. Miller, K. (2014). *Experiments and fitting of advanced polymer models in ANSYS*. Axel Products 2014 Regional Conference, 28.
41. Rackl, M. (2015). Curve fitting for ogden, yeoh and polynomial models. *Osybayerische Technische Hochschule Regensburg Mechanical Engineering Department*, 1-2.
42. Ruiz, M. J. G., Gonzalez, L.Y.S. (2006). Comparison of hyperelastic material models in the analysis of fabrics, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 321.
43. ANSYS. (2009). *Workbench mechanical structural nonlinearities introduction to contact lecture chapter 3*. ANSYS Inc., 3.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SARIGÖZ, Kağan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.08.1990, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : +90 506 924 66 06
 e-mail : kagansarigoz@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Osmangazi Üniversitesi / Makina Müh.	2013
Lise	Gazi Üniversitesi Vakfı Özel Fen Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	TUSAŞ TAI	Takım Tasarım Mühendisi
2014-2017	Ortadoğu Rulman Sanayi Ticaret A.Ş.	Mamul Dizayn Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

Hobiler

Yüzme, Fitness, Basketbol, Seyehat etmek



GAZİ GELECEKTİR..