



T.C.  
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI



**RULMANLARDA ISIL İŞLEMİN FAYDALI  
RULMAN ÖMRÜNE ETKİSİNİN KESTİRİMCİ  
BAKIM YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**TUNCER DENİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KIRŞEHİR  
2025**



T.C.  
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI



**RULMANLARDA ISIL İŞLEMİN FAYDALI  
RULMAN ÖMRÜNE ETKİSİNİN KESTİRİMCİ  
BAKIM YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**TUNCER DENİZ**

**YÜKSEK LİSANS**

**DANIŞMAN**

**Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ**

**KIRŞEHİR**

**2025**

**KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI**  
**ETİK BEYANI**

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değeriklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 01/08/2025

Öğrenci  
Tuncer DENİZ

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	<b>I</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>III</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>VI</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>VII</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Amaç.....	2
1.2. Önem .....	3
1.3. Problem.....	4
1.4. Tanımlar.....	5
<b>2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>7</b>
2.1. Rulmanların Endüstrideki Önemi .....	7
2.1.1. Isıl işlem ve rulman ömrü üzerindeki etkileri .....	8
2.1.2. Kestirimci bakımın tanımı ve önemi.....	8
2.2. Rulmanlar ve Çalışma Prensibi .....	9
2.2.1. Rulman çeşitleri .....	11
2.2.2. Rulmanların yapısal özellikleri .....	16
2.2.3. Yorulma ve kırılma mekanizmaları .....	19
2.3. Isıl İşlem Teknikleri.....	23
2.3.1. Isıl işlemin tanımı ve genel süreçleri .....	24
2.3.2. Rulman çeliklerinde kullanılan ısıl işlem çeşitleri.....	25
2.3.3. Isıl işlemin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri.....	31
2.4. Kestirimci Bakım Yaklaşımları .....	35
2.4.1. Kestirimci bakımın temel ilkeleri .....	36
2.4.2. Rulmanlarda kestirimci bakım uygulamaları.....	37
2.4.3. Kestirimci bakım teknolojileri ve yöntemleri .....	41
2.5. Isıl İşlem ve Rulman Ömrü Üzerine Etkileri.....	44
2.5.1. Isıl işlemin rulman ömrüne etkilerinin literatürdeki örnekleri.....	45
2.5.2. İşlem sıcaklığı ve süresinin optimizasyonu .....	46
2.5.3. Isıl işlemin yorulma ömrüne etkisi .....	49

2.6. Kestirimci Bakım ve Isıl İşlemin Entegrasyonu.....	52
2.6.1. Entegrasyonun operasyonel avantajları .....	53
2.6.2. Kestirimci bakım veri analizi.....	54
2.6.3. Uygulama örnekleri ve vaka analizleri .....	57
2.7. İlgili Literatür Taraması ve Önceki Çalışmalar .....	60
<b>3. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>63</b>
3.1. T700 Turboshaft Motoru ve Çalışma Sistemi .....	63
3.1.1. İnpıt modül bearingi.....	68
3.1.2. Motor bearingi .....	70
3.2. Metot.....	71
3.2.1. Sertlik testi .....	72
3.2.2. Isıl işlem farklılıklarının belirlenmesi.....	73
3.2.3. Titreşim testi .....	74
3.2.4. İç çap-dış çap ölçümü .....	77
3.3. Simülasyon ve Test Koşulları.....	81
3.4. Veri Toplama ve Analiz .....	81
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>85</b>
4.1. Bulgular .....	85
4.1.1. Isıl işlem sıcaklığının rulman ömrüne etkisinin değerlendirilmesi.....	85
4.1.2. Isıl işlem sıcaklığının titreşim ve tork değerlerine etkisinin değerlendirilmesi.....	91
4.1.3. Motor giriş rulmanının non-linear dinamik analizi ve simülasyonu.....	97
4.2. Tartışma .....	99
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>101</b>
5.1. Temel Sonuçlar.....	101
5.2. Temel Öneriler.....	101
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>103</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>111</b>
<b>EK-1</b> Kongre Katılım Belgesi.....	111
<b>EK-2</b> Makale Bildirisi.....	112
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>113</b>

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ hocama büyük bir içtenlikle teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında gerek sorularıyla gerekse altı ayda bir yapılan tez izleme komitesi sunumlarında tezin şekillenmesinde ve nihai hale gelmesinde katkıları olan değerli jüri üyelerim Prof. Dr. Osman ÖRNEK ve Prof. Dr. Nihat ARIKAN 'a teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Tezi yazma sürecimde sorularıma verdikleri cevap ile bana destek olan U/H Tek. Kd. Bçvő Sinan EREN, U/H Tek. Kd. Bçvő. Gökhan ÇELEBİ ve Fatih YILMAZ'a teşekkür ederim.

Tezimi, başta eşim Cennet olmak üzere özellikle yeni doğan oğlum AYBARS'a ithaf ederim.

Ağustos, 2025

Tuncer DENİZ

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### RULMANLARDA ISIL İŞLEMİN FAYDALI RULMAN ÖMRÜNE ETKİSİNİN KESTİRİMCİ BAKIM YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

**Tuncer DENİZ**

**KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI**

**Danışman:** Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ  
Yıl: 2025, Sayfa: 113

**Jüri:** Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ  
Prof. Dr. Osman ÖRNEK  
Prof. Dr. Nihat ARIKAN

Bu çalışma, rulmanlarda ısıl işlem prosedürlerinin farklı işletme koşullarında rulmanın kalan faydalı ömrüne etkisinin kestirimci bakım yöntemiyle incelemek amacıyla yapılmıştır. Skorsky (S70-A) helikopterin transmission kısmında kullanılan yüksek torka maruz input modül rulmanı ile helikopterin motorunda kullanılan yüksek sıcaklığa maruz 4 numaralı rulman materyal olarak kullanılmıştır. Her iki rulman tipinden 3'er adet alınmış ve 500 saat uçuş yaptıktan sonra farklı sıcaklıklarda temperlenerek oda ortamında soğumaya bırakılmıştır. Input modül rulmanı için ısıl işlem sıcaklıkları 500-600-700°C ve motor rulmanları için ısıl işlem sıcaklıkları 850-800-750°C referans olarak alınmıştır. Gerekli kontrolleri yapıldıktan sonra rulmanların beş tanesinin faal olduğu anlaşılmış, sadece bir motor rulmanın gayri faal olduğu görülmüştür. Gayri faal yani kullanılamaz hale gelen motor rulmanı aynı yerde kullanılan aynı tip başka bir 500 saat uçmuş motor rulmanı ile değiştirilmiş ve aynı sıcaklıkta temperlenip oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Diğer beş rulmanın geçtiği kontrollerden geçmiş ve faal olduğu görülmüştür. Bu rulmanlar daha sonra aynı çalışma koşulları test bremzesinde simüle edilerek belirli aralıklarda titreşim, tork, sıcaklık, basınç değerleri alınmış ve ömürleri analiz edilmiştir. Çıkan sonuçlar değerlendirildiğinde 1200 saat ömürleri olan her bir rulmanın 1200 saat ömrünü tamamlayamadığı. Motor rulmanı için 750°C 'de ısıl işleme tabi tutulan rulmanın diğer motor rulmanlarına göre daha fazla kalan faydalı ömrü olduğu, 500°C'de temperlenen input modül rulmanının diğer sıcaklıklarda ısıl işlem gören rulmanlara göre kalan faydalı ömrünün fazla olduğu değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Isıl işlem, Kestirimci bakım, Titreşim, Faydalı ömür.

## **ABSTRACT**

### **MASTER'S THESIS**

#### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON BEARING ON THE REMAINING USEFULL LIFE OF THE BEARING USING THE PREDICTORY MAINTENANCE METHOD**

**Tuncer DENİZ**

**KIRŞEHİR AHİ EVRAN UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF ADVANCED TECHNOLOGIES**

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Merdin DANIŞMAZ  
Year: 2025, Pages:113

**Juries:** Assoc. Prof. Dr. Merdin DANIŞMAZ  
Prof. Dr. Osman ÖRNEK  
Prof. Dr. Nihat ARIKAN

This study was conducted to investigate the effect of heat treatment procedures on the remaining useful life of bearings under different operating conditions using predictive maintenance method. The input module bearing subjected to high torque used in the transmission part of the Skorsky (S70-A) helicopter and bearing number 4 subjected to high temperature used in the engine of the helicopter were used as materials. Three pieces of each bearing type were taken and after 500 hours of flight, they were tempered at different temperatures and left to cool in the room environment. The heat treatment temperatures for the input module bearing were 500-600-700°C and the heat treatment temperatures for the motor bearings were 850-800-750°C as reference. After the necessary checks were made, it was understood that five of the bearings were active, only one motor bearing was found to be inactive. The inactive, that is, unusable motor bearing was replaced with another 500 hours flown motor bearing of the same type used in the same place and tempered at the same temperature and left to cool at room temperature. The other five bearings passed the controls and were found to be active. These bearings were then simulated in the same working conditions test rig and vibration, torque, temperature, pressure values were taken at certain intervals and their lifetimes were analyzed. When the results were evaluated, it was evaluated that each bearing with 1200 hours of life could not complete 1200 hours of life. For the motor bearing, it was evaluated that the bearing subjected to heat treatment at 750 ° C had a longer remaining useful life than other motor bearings, and the input module bearing tempered at 500°C had a longer remaining useful life than the bearings heat treated at other temperatures.

**Key Words:** Heat treatment, Predictive maintenance, Vibration, Useful life

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

<b>Tablo 3.1.</b> Motor bearingi test değerleri (850°C) .....	<b>81</b>
<b>Tablo 3.2.</b> Motor bearingi test değerleri (800°C) .....	<b>82</b>
<b>Tablo 3.3.</b> Motor bearingi test değerleri (750°C) .....	<b>82</b>
<b>Tablo 3.4.</b> İntput modül bearingi test değerleri (500°C ) .....	<b>83</b>
<b>Tablo 3.5.</b> İntput modül bearingi test değerleri (600°C ) .....	<b>83</b>
<b>Tablo 3.6.</b> İntput modül bearingi test değerleri (700°C ) .....	<b>83</b>
<b>Tablo 4.1.</b> 850°C’de fırınlanmış motor bearingi ömür izlenimi .....	<b>86</b>
<b>Tablo 4.2.</b> 800°C’de fırınlanmış motor bearingi ömür izlenimi .....	<b>87</b>
<b>Tablo 4.3.</b> 750°C’de fırınlanmış motor bearingi ömür izlenimi .....	<b>87</b>
<b>Tablo 4.4.</b> 700°C’de fırınlanmış input modül bearingi ömür izlenimi .....	<b>88</b>
<b>Tablo 4.5.</b> 600°C’de fırınlanmış input modül bearingi ömür izlenimi .....	<b>89</b>
<b>Tablo 4.6.</b> 500°C’de fırınlanmış input modül bearingi ömür izlenimi .....	<b>90</b>
<b>Tablo 4.7.</b> Motor bearingi test değerleri (850°C) .....	<b>92</b>
<b>Tablo 4.8.</b> Motor bearingi test değerleri (800°C) .....	<b>92</b>
<b>Tablo 4.9.</b> Motor bearingi test değerleri (750°C) .....	<b>93</b>
<b>Tablo 4.10.</b> İntput modül bearingi test değerleri (500°C) .....	<b>94</b>
<b>Tablo 4.11.</b> İntput modül bearingi test değerleri (600°C) .....	<b>95</b>
<b>Tablo 4.12.</b> İntput modül bearingi test değerleri (700°C) .....	<b>95</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 2.1. Kestirimci bakım akış şeması .....	10
Şekil 2.2. Sabit bilyalı rulman.....	12
Şekil 2.3. Makaralı rulman.....	14
Şekil 2.4. İğneli rulman.....	16
Şekil 2.5. Rulman geometrisi .....	19
Şekil 2.6. Sertleştirme sonrası malzeme iç yapısı .....	25
Şekil 2.7. Temperleme sonrası malzeme iç yapısı .....	25
Şekil 2.8. Normalleştirme sonrası malzeme iç yapısı .....	26
Şekil 2.9. Yüzey sertleştirme sonrası malzeme iç yapısı .....	27
Şekil 2.10. Isıl işlem sonrası mikroyapısal bozukluk.....	31
Şekil 2.11. T700 ısıl işlem süreci .....	45
Şekil 3.1. T700 Turboshaft motoru .....	62
Şekil 3.2. Motor rulmanı teknik resimi .....	63
Şekil 3.3. Motor rulmanının monte edildiği kompresör kısmı.....	64
Şekil 3.4. Giriş mekanizması rulmanı ve monte edildiği sistem.....	65
Şekil 3.5. Giriş mekanizması rulmanı teknik resimi (ITEM 115) .....	66
Şekil 3.6. S-70A Helikopteri güç aktarma şeması .....	67
Şekil 3.7. İnter modül bearingi.....	68
Şekil 3.8. Motor bearingi iç yapısı .....	69
Şekil 3.9. İnter modül bearingi sertlik değeri.....	70
Şekil 3.10. Motor bearingi sertlik değeri .....	71
Şekil 3.11. İnter modül bearingi titreşim testi.....	72
Şekil 3.12. Motor bearingi titreşim testi .....	73
Şekil 3.13. Değiştirilen motor bearingi titreşim testi .....	74
Şekil 3.14. İnter modül bearingi dış kafes çap ölçümü .....	75
Şekil 3.15. İnter modül bearingi masura çap ölçümü.....	76
Şekil 3.16. İnter modül bearingi iç bilezik çap ölçümü .....	76
Şekil 3.17. Motor bearingi kafes ölçümü .....	77
Şekil 3.18. Motor bearingi iç bilezik çap ölçümü .....	78
Şekil 4.1. 850°C’de fırınlanmış motor bearingi .....	85
Şekil 4.2. 800°C’de fırınlanmış motor bearingi .....	86
Şekil 4.3. 750°C’de fırınlanmış motor bearingi .....	87
Şekil 4.4. 700°C’de fırınlanmış inter modül bearingi .....	88
Şekil 4.5. 600°C’de fırınlanmış inter modül bearingi .....	89
Şekil 4.6. 500°C’de fırınlanmış inter modül bearingi .....	90
Şekil 4.7. Motor rulmanı test değerleri .....	93
Şekil 4.8. İnter modül rulmanı test değerleri.....	95
Şekil 4.9. Analiz koşulları ve mesh yapısı .....	97
Şekil 4.10. Analiz sonuçları a) gerilim, b) yer değiştirme c) gerinim d) deformasyon .....	98

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
P	: Ball Bearing:3, Roller Bearing:1013
P	: Eşdeğer dinamik bearing yükü (kN)
L10	: Milyon Devir Cinsinden Temel Ömür Oranı
a1	: Ömür Ayarlama Faktörü
aSKF	: Ömür Dönüşüm Faktörü
°C	: Santigard Derece, Sıcaklık Birimi
C	: Temel Dinamik Yük Oranı (kN)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
MAIN MODÜLE	: Ana Aktarma Elemanı
CMM	: Coordinate Measuring Machine
RPM	: Devir/Dak (Revolutions Per Minute)
INPUT MODÜL	: Giriş Mekanizması
T-700	: Helikopter Motor Modeli
DÜZLEM 1/2	: İç/Dış bileziklerin Referans Yüzeyleri
52100 (100Cr6)	: Rulman Çeliği Standardı
ÇAP 1	: Rulman Nominal İç/Dış Çapı
FREEWHELL UNİT	: Serbest Döner Ünite
S-70	: Skorsky Helikopter Modeli
ITEM	: Teknik Resimde Parçaya Verilen Referans Numarası
MOTOR BEARİNG	: Yüksek Sıcaklıkta Çalışan Motor Rulmanı

## 1. GİRİŞ

Rulmanlar, makinelerdeki döner veya doğrusal hareketlerin düşük sürtünmeyle, hassas ve güvenilir şekilde gerçekleşmesini sağlayan temel mekanik bileşenlerdir. İç ve dış bilezikler arasında yer alan yuvarlanma elemanları sayesinde, hem radyal hem de aksel yükleri taşır ve hareketin düzgün bir şekilde iletilmesini sağlarlar. Rulmanlar, havacılık, otomotiv, enerji üretimi, ağır sanayi ve endüstriyel makineler gibi çok çeşitli alanlarda kullanılır. Bu kritik kullanım alanları, rulmanların uzun ömürlü, dayanıklı ve güvenilir olmasını zorunlu kılar. Rulmanların ömrü; kullanılan malzemenin türü, çalışma ortamı, yükleme koşulları, montaj doğruluğu, yağlama durumu ve uygulanan yüzey işlemleri gibi birçok faktörden etkilenir. Özellikle ısıl işlem teknikleri, rulman üretim sürecinde mekanik özellikleri iyileştirmek ve performansını artırmak için önemli rol oynar. Sertleştirme, sementasyon, normalleştirme ve temperleme gibi işlemler, rulman çeliğinin mikroyapısını değiştirerek yüzey sertliğini, yorulma direncini ve aşınmaya karşı dayanıklılığını artırır. Ancak bu işlemlerin etkinliği, uygulama sıcaklığı, süre, soğutma ortamı ve işlem sonrası yapılacak kontroller gibi parametrelerin doğru şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bunun yanı sıra, rulmanın sahadaki kullanım süresini etkileyen en önemli unsurlardan biri de bakım stratejisidir. Özellikle kestirimci bakım yöntemleri, rulmanın çalışma esnasındaki titreşim, sıcaklık, basınç gibi verilerini analiz ederek arızaları önceden öngörmeyi ve rulmanların kullanım süresini optimize etmeyi mümkün kılar. Bu bağlamda, ısıl işlem ve kestirimci bakım, rulman performansını artırmaya yönelik birbirini tamamlayan iki temel mühendislik yaklaşımı olarak öne çıkar.

Bu çalışma, rulmanlarda uygulanan ısıl işlem tekniklerinin rulmanların faydalı ömrü üzerindeki etkilerini kestirimci bakım yöntemleri ile analiz etmeyi amaçlamaktadır. Rulmanlar, dünya genelindeki birçok endüstriyel ve mühendislik uygulamasında kritik bir bileşen olarak yer alır. Bu nedenle, rulmanların performansını ve dayanıklılığını maksimize etmek, üretim verimliliği ve maliyet etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır. Isıl işlem, rulman çeliklerinin mekanik özelliklerini iyileştirerek bu komponentlerin yorulma ömrünü artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu işlemlerin rulman ömrü üzerindeki etkilerini anlamak, uygulanan ısıl işlem parametrelerinin optimizasyonunu gerektirir.

Bu çalışmada, rulmanların ısıl işlem sonrası performansını değerlendirmek için çeşitli kestirimci bakım teknikleri kullanılacaktır. Kestirimci bakım, ekipman arızalarını

önlemek ve bakım faaliyetlerini optimize etmek için ekipmanın durumunu sürekli olarak izlemeyi ve analiz etmeyi içerir. Bu yaklaşım, özellikle yüksek maliyetli arızaların önlenmesi ve üretim sürekliliğinin sağlanması açısından büyük öneme sahiptir. Çalışmada, rulmanlarda sıklıkla uygulanan sementasyon, normalleştirme ve sertleştirme gibi ısı işlem yöntemlerinin detaylı bir analizi yapılacak ve bu işlemlerin rulman ömrü üzerindeki spesifik etkileri ortaya kondu.

Ayrıca, bu çalışmada ısı işlem parametrelerinin, rulman malzemelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenecek. Bu bağlamda, farklı ısı işlem uygulamalarının yorulma direnci, sertlik ve tokluk gibi kritik malzeme özelliklerini nasıl etkilediği üzerinde durulacaktır. Çalışmanın sonucunda, rulmanların daha uzun ömürlü ve daha dayanıklı hale gelmesi için optimal ısı işlem koşullarının belirlenmesine yönelik öneriler sunulacaktır. Ayrıca bu çalışma rulmanların ömrünü uzatma ve endüstriyel uygulamalarda arıza oranlarını düşürme potansiyeli taşımaktadır. Kestirimci bakım tekniklerinin ve ısı işlem uygulamalarının entegrasyonu, endüstriyel tesislerin bakım stratejilerini daha verimli bir şekilde planlamalarına olanak tanıyacak ve böylece hem maliyetleri düşürecek hem de ekipmanların çalışma sürelerini maksimize edecektir. Bu çalışmanın sonuçları, rulman üreticilerine ve kullanıcılarına, rulmanların performansını artırma ve bakım maliyetlerini azaltma konusunda değerli bilgiler sağlayacak ve bu alandaki bilgi birikimine katkıda bulunacaktır.

## **1.1. Amaç**

Bu çalışmanın temel amacı, rulmanlarda uygulanan ısı işlem tekniklerinin bu komponentlerin faydalı ömrü üzerindeki etkilerini anlamak ve kestirimci bakım yöntemleri kullanarak bu etkileri analiz etmektir. Rulmanların endüstrideki geniş uygulama alanları düşünüldüğünde, rulman ömrünü etkileyen faktörlerin detaylı bir şekilde incelenmesi, üretim verimliliği ve operasyonel güvenilirlik açısından büyük önem taşır. Isı işlem, rulman çeliklerinin mekanik ve yapısal özelliklerini iyileştiren kritik bir süreçtir. Bu işlem, malzemelerin yorulma direncini, sertliğini ve dayanıklılığını artırarak rulmanların daha uzun süreli ve etkin kullanımını sağlamayı hedefler. Ancak, ısı işleminin rulmanların performansı üzerindeki spesifik etkileri karmaşık ve çok yönlüdür, bu nedenle bu etkilerin doğru bir şekilde anlaşılması için kapsamlı testler ve analizler gerekir.

Bu çalışmanın bir diğ er amacı da rulmanlarda kullanılan ısı l işlem yöntemlerinin optimizasyonuna yönelik bilgiler sunarak, endüstriyel uygulamalarda bu komponentlerin ömrünü uzatmaktır. Çalışma, çeşitli ısı l işlem parametrelerinin rulman ömrü üzerindeki etkilerini detaylı olarak inceleyerek, hangi işlem koşullarının en etkili olduğunu belirlemeyi hedefler. Bu süreçte, sıcaklık, süre ve atmosfer gibi ısı l işlem parametrelerinin rulman malzemelerinin özellikleri üzerindeki etkileri değ erlendirilecek ve bu parametrelerin optimal kombinasyonları araştırılacaktır.

Son olarak, bu çalışma kestirimci bakım tekniklerinin rulmanların ısı l işlem sonrası performansının değ erlendirilmesinde nasıl kullanılabileceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Kestirimci bakım, ekipman arızalarını önceden tahmin etme ve önleme yeteneğ i sağlar, bu da üretim süreçlerinde kesintilerin ve arıza kaynaklı maliyetlerin azaltılmasına katkıda bulunur. Çalışma, rulmanlara uygulanan ısı l işlemlerin uzun vadeli performansı üzerindeki etkilerini anlamak için durum izleme, titreşim analizi ve sıcaklık takibi gibi tekniklerden yararlanacak. Bu teknikler, ısı l işlem sonrası rulmanların sahadaki gerç ek zamanlı performans verilerini toplayarak, işlem koşullarının rulman ömrü üzerindeki etkilerini objektif bir şekilde değ erlendirmemizi sağlayacaktır. Bu yaklaşım, rulmanların daha etkili ve verimli kullanımını destekleyerek endüstriyel tesislerin operasyonel verimliliğ ini artırmaya yardımcı olması beklenir.

## 1.2. Önem

Bu çalışmanın önemi, rulmanların endüstriyel uygulamalardaki kritik rolü ve ısı l işlemin bu komponentlerin faydalı ömrü üzerindeki potansiyel etkileri göz önünde bulundurulduğ unda daha iyi anlaş ılmaktadır. Rulmanlar, dünya genelinde enerji üretimi, otomotiv, havacılık ve üretim endüstrileri gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Bu bileş enlerin verimliliğ i, makinelerin genel performansını ve dayanıklılığ ını doğ rudan etkiler, bu da rulmanların ömrünü uzatma ç abalarını stratejik bir öneme sahip kılar. Isıl işlem, rulman malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirerek, daha uzun ömür ve daha yüksek yük taşı ma kapasitesi sağlar. Bu nedenle, ısı l işlem tekniklerinin ve parametrelerinin doğ ru şekilde anlaş ılması ve uygulanması, operasyonel maliyetleri düş ürmek ve üretim sürekliliğ ini sağlamak için büyük önem taş ır. Ayrıca, ısı l işlemin rulmanların performansı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemek, endüstriyel uygulamalarda bakım stratejilerini iyileştirme ve arıza oranlarını azaltma potansiyeli sunar. Bu, özellikle yüksek maliyetli arızaların ve üretim duruş larının önlenmesi gereken sektörlerde daha büyük bir öneme sahip olmaktadır. Kestirimci bakım

teknikleri ile entegre edilen ısıtım işlem uygulamaları, rulmanların saha performansını gerçek zamanlı olarak izleme ve analiz etme imkanı sunar. Bu yaklaşım, rulman arızalarının önceden tespit edilmesine olanak tanıyarak, planlı bakım faaliyetlerinin daha etkin bir şekilde yürütülmesini sağlar.

Bu çalışmanın sonuçları, rulman üreticilerine, kullanıcılarına ve bakım mühendislerine, rulmanların ömrünü etkileyen faktörler hakkında derinlemesine bilgiler sunarak, daha bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olacaktır. Rulmanların daha uzun süre dayanmasını sağlayacak işlem koşullarının belirlenmesi, endüstriyel tesislerin operasyonel verimliliğini artırmanın yanı sıra enerji tasarrufu ve çevresel etkilerin azaltılması gibi ek faydalar da sağlar. Bu nedenle, bu tez çalışması, endüstriyel uygulamalarda rulman kullanımının optimize edilmesi ve bakım maliyetlerinin azaltılması açısından büyük bir öneme sahiptir.

### **1.3. Problem**

Bu tez çalışmasının odaklandığı ana problem, rulmanlarda uygulanan ısıtım işlem tekniklerinin rulmanların faydalı ömrü üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması ve bu etkilerin kestirimci bakım yöntemleri ile yeterince analiz edilmemesidir. Rulmanların işlevselliği ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili olan ısıtım işlem süreçlerinin, hangi koşullar altında optimal performans sağladığına dair bilgiler eksiktir. Bu bilgi boşluğu, endüstriyel uygulamalarda rulmanların etkin kullanımını ve maksimum ömrünü elde etmeyi engellemekte, bu da maliyet artışlarına ve operasyonel verimsizliklere yol açmaktadır.

Isıtım işlem, rulmanların malzeme özelliklerini önemli ölçüde değiştirerek, yorulma ömrünü, sertliği ve dayanıklılığı artırabilir. Ancak, bu işlemlerin uygulanma şekli ve parametreleri, rulmanların sahadaki gerçek performansı ile her zaman doğrudan bir ilişki göstermeyebilir. Bu durum, işlem parametrelerinin optimizasyonunu zorlaştırır ve rulmanların beklenen performansını sağlamasını engelleyebilir. Ayrıca, endüstriyel tesislerde kullanılan kestirimci bakım yöntemleri, genellikle ısıtım işlem sonrası rulmanların durumunu ve performansını etkili bir şekilde izleme ve değerlendirme konusunda yetersiz kalabilir. Bu yöntemlerin yetersizliği, planlanmamış arızaların ve üretim kesintilerinin önlenmesi konusunda ciddi engeller oluşturur.

Bu çalışma, ısıtım işlem uygulamalarının rulman ömrü üzerindeki özellikli etkilerini detaylı bir şekilde inceleyerek, bu işlemlerin en uygun koşullarını belirlemeyi ve kestirimci bakım uygulamalarını bu bilgilerle bütünleşmiş yapmayı hedeflemektedir.

Bu şekilde, rulmanların daha uzun ömürlü ve güvenilir olması sağlanarak, endüstriyel tesislerin maliyetlerini düşürmelerine ve operasyonel sürekliliklerini artırmalarına olanak tanınacaktır.

#### 1.4. Tanımlar

Bu tez çalışmasında, rulmanların ısıtılma sonrası performansının incelenmesi ve kestirimci bakım yöntemleri ile analiz edilmesi süreçlerinde kullanılan çeşitli terimler ve kavramlar belirli tanımlarla ele alınacaktır. Bu tanımlar, konuların daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve araştırma alanında terminolojik tutarlılık oluşturmak için önemlidir.

- Rulman: Yük taşıyan elemanlar olarak tasarlanmış, genellikle metalik malzemelerden yapılmış, döner veya lineer hareketler sırasında sürtünmeyi azaltmak ve hareketi kolaylaştırmak için kullanılan mekanik birimlerdir.
- Isıtılma İşlem: Metallerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bir dizi ısıtılma ve soğutma işlemleridir. Bu işlemler, malzemelerin sertlik, tokluk ve yorulma direnci gibi özelliklerini değiştirmek amacıyla yapılandırılmıştır.
- Kestirimci Bakım: Ekipmanın gelecekteki arızalarını önlemek, bakım faaliyetlerini zamanında planlamak ve operasyonel verimliliği artırmak amacıyla kullanılan, ekipmanın durumunu sürekli olarak izleme ve analiz etme sürecidir.
- Yorulma Ömrü: Malzemenin, belirli bir yük altında, belirli bir süre ve koşullar altında kırılma veya arıza göstermeden çalışabileceği süreyi ifade eder.
- Sementasyon: Özellikle çelik rulmanların yüzey sertliğini artırmak ve çekirdeğinin tokluğunu korumak için kullanılan bir ısıtılma işlemidir. Bu işlem sırasında, karbon veya diğer elementler yüzeye nüfuz ettirilerek malzemenin yüzey özellikleri iyileştirilir.
- Normalleştirme: Malzemenin mikroyapısını homojenleştirmek ve istenmeyen gerilmeleri gidermek amacıyla malzemenin belirli bir sıcaklıkta ısıtılıp hava ortamında soğutulması işlemidir.

Sertleştirme ve Alınma: Çeliğin belirli bir sıcaklıkta ısıtılmasını ve ardından su veya yağ gibi bir soğutma ortamında hızla soğutulmasını içeren bir ısıtılma sürecidir. Bu işlem, malzemenin sertlik seviyesini maksimize ederken, alınma işlemi ile elde edilen yüksek sertlik seviyesinin getirebileceği kırılma azaltılır.

Bu tanımlar, çalışmanın ilerleyen kısımlarında sıklıkla referans verilen kavramlar olacak ve araştırmanın daha net ve anlaşılır bir şekilde ilerlemesine yardımcı olacaktır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Rulmanların Endüstrideki Önemi

Rulmanlar, endüstriyel uygulamaların temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilir ve hemen hemen her türlü makine ve hareketli sistemin işleyişinde kritik bir role sahiptir. Bu bileşenler, döner veya kayar hareketler sırasında yük taşıma ve hareketin sürtünme katsayısını azaltma görevi görür. Rulmanların sağladığı bu temel fonksiyonlar, enerji verimliliğinin artırılmasına, makine ömrünün uzatılmasına ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına büyük katkıda bulunur. Örneğin, enerji üretiminden otomotiv sanayiine, havacılıktan inşaat ekipmanlarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Kitai ve ark., 2021).

Rulmanlar, enerji tasarrufu sağlamaları, operasyonel verimlilikte artış ve üretim kapasitesinin maksimize edilmesi gibi endüstride ekonomik avantajlar da sunar. İyi tasarlanmış ve doğru şekilde uygulanan rulman sistemleri, endüstriyel tesislerin daha düşük enerji tüketimi ve daha az atık malzeme üretmesine yardımcı olur. Bu durum, sürdürülebilir üretim pratiklerinin ve çevresel yönetmeliklere uyumun önem kazandığı günümüzde büyük bir değer taşır. Rulmanların endüstriyel sistemlerdeki işlevselliği, onların uygun malzeme seçimi, doğru montajı, etkin yağlanması ve kontrollü çalışma koşullarıyla doğrudan ilişkilidir. Goel ve ark. (2014), mikro yapısı optimize edilmiş ısıtılmış rulmanların, yorulmaya karşı daha dirençli hale geldiğini ve özellikle ağır yük altında çalışan makinelerde %40'a varan ömür artışı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, Goyal ve Pabla (2016), periyodik bakım ve durum izleme tekniklerinin uygulanmasıyla rulmanların hizmet dışı kalma süresinin %25 azaltılabildiğini ortaya koymuştur. Modern üretim ortamlarında rulmanlar artık sadece pasif bileşenler değil; sensör destekli, kestirimci bakım sistemlerine entegre edilmiş akıllı unsurlar hâline gelmiştir. Sheng ve ark. (2023), entegre sensörlü rulman sistemlerinin titreşim, sıcaklık ve yük verilerini analiz ederek, bakım planlamasının dijital ortamda daha doğru yapılmasına katkı sağladığını ifade etmektedir. Tüm bu gelişmeler, rulmanların sadece hareketi kolaylaştıran elemanlar değil, aynı zamanda sistem güvenilirliğini ve sürdürülebilir üretimi destekleyen stratejik bileşenler olduğunu ortaya koymaktadır. Rulmanların gelişimi ve optimizasyonu, endüstriyel süreçlerin daha da verimli ve çevre dostu hale gelmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Li ve Deng, 2023).

### **2.1.1. Isıl işlem ve rulman ömrü üzerindeki etkileri**

Isıl işlem, metallerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan, sıcaklık ve soğuma süreçlerinden oluşan bir yöntemdir. Bu işlem, özellikle rulmanlar için kritik öneme sahiptir çünkü doğru ısıl işlem teknikleri, rulman çeliklerinin sertliğini, yorulma direncini ve aşınma dayanıklılığını artırabilir. Goel ve ark. (2014), sertleştirme işleminin, rulmanların yüzey sertliğini artırarak, ağır yük ve yüksek hızda çalışma koşullarına karşı dayanıklılığı önemli ölçüde geliştirdiğini belirtmiştir. Rulmanların ömrü üzerinde ısıl işlemin büyük bir rol oynadığını vurgulayan Li ve Deng (2023), yüzey sertliği ile iç yapının uyumlu olmasının, rulmanların performansını optimize ettiğini ifade etmektedir. Diğer yandan, sementasyon işlemi, rulman çeliğinin yüzeyinde karbon yoğunluğunu artırarak, yüzey sertliğini yükseltirken, çekirdek bölgesinin daha esnek ve dayanıklı olmasını sağlar (Zhang ve ark., 2018). Bu işlem, rulmanın kırılma riskini azaltırken, aşırı yüklenmelere karşı da daha dayanıklı hâle gelmesini sağlar.

Isıl işlemin, rulman malzemesinin mikro yapısı üzerinde önemli etkileri olduğu da yapılan çalışmalarda görülmektedir. Goel ve ark. (2014) ve Yadav (2017), normalleştirme işleminin, malzemenin iç yapısındaki dengesiz gerilmeleri ortadan kaldırarak rulmanın daha homojen bir yapıya sahip olmasını sağladığını ve böylece yorulma direncini artırdığını bildirmiştir. Ancak, aşırı ısıl işlem uygulamaları, özellikle yüksek sıcaklıkta sertleştirme işlemi, malzemenin kırılma dayanıklılığını artırabilir ve çatlak oluşumuna neden olabilir (Mustafa, 2021). Buna karşın, doğru sıcaklık ve soğuma hızının seçilmesiyle bu olumsuz etkiler önlenebilir. Goyal ve Pabla (2016), sertleştirme işleminin doğru şekilde yapıldığında, rulmanların ömrünün %30'a kadar uzayabileceğini ortaya koymuşlardır. Bunun yanı sıra, Sheng ve ark. (2023), sıcaklık artışlarının rulmanlarda sıcak gerilmelere yol açabileceğini, bu nedenle işlem sıcaklıklarının dikkatlice kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, ısıl işlemin doğru şekilde uygulanması, rulmanların dayanıklılığını ve verimliliğini artırarak, endüstriyel sistemlerin uzun ömürlü olmasına katkı sağlar.

### **2.1.2. Kestirimci bakımın tanımı ve önemi**

Kestirimci bakım, bir sistem veya ekipmanın arızalanmadan önceki belirtileri ve trendlerini izleyerek, düzenli bakım ve onarımları planlamayı amaçlayan bir bakım yöntemidir. Geleneksel bakım yöntemlerinden farklı olarak, kestirimci bakım, arızaların

beklenmedik bir şekilde meydana gelmesini önlemek için veri analizi ve tahmin modelleri kullanır. Bu şekilde, ekipmanın daha uzun süre ve daha güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar.

Kestirimci bakımın önemi, birçok açıdan öne çıkar. İlk olarak, sistem veya ekipman arızalarının beklenmedik maliyetlerini azaltır. Beklenmedik arızaların giderilmesi, genellikle yüksek acil durum maliyetleriyle sonuçlanırken, kestirimci bakım sayesinde planlı bakım ve onarımlarla bu maliyetler önceden tahmin edilebilir ve azaltılabilir (Zhu ve ark., 2020).

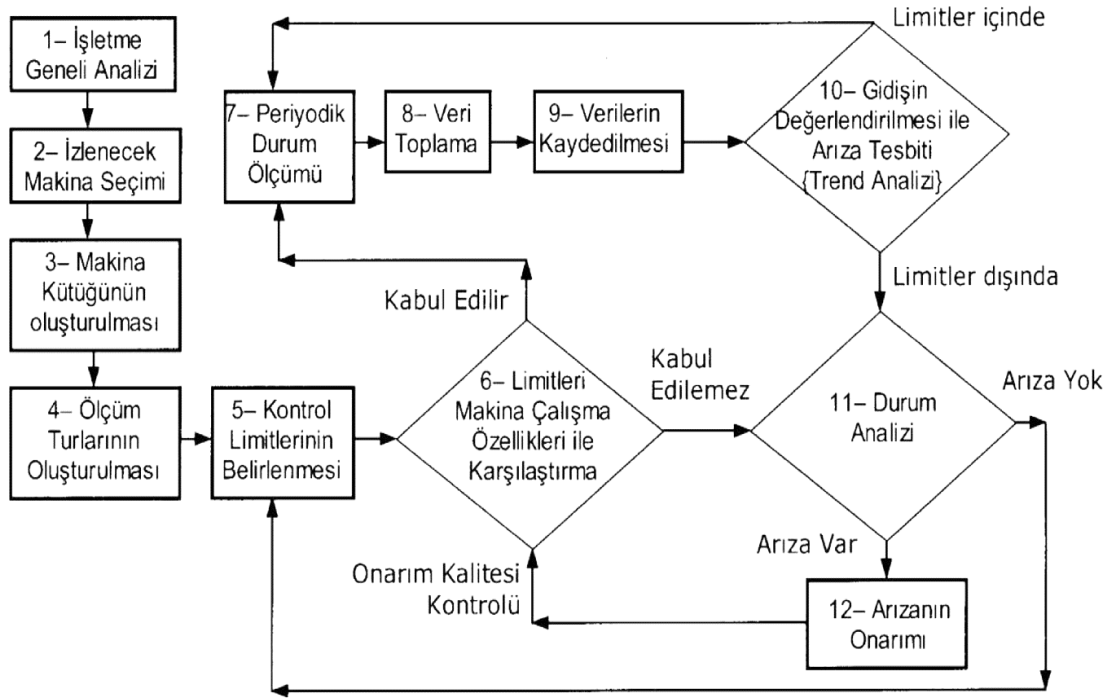
Kestirimci bakım, ekipmanın daha uzun bir ömre sahip olmasını sağlar. Sürekli izleme ve analiz sayesinde, aşırı yüklenme, aşınma, yağ eksikliği gibi sorunlar erken tespit edilerek önlenir. Bu da ekipmanın daha az aşınmasına ve daha uzun süre verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanır (Luo ve ark., 2019).

Kestirimci bakım, iş güvenliği açısından da önemlidir. Beklenmedik arızalar, sadece maliyetlerle sınırlı kalmaz, aynı zamanda iş güvenliği risklerini de artırır. Örneğin, bir makine arızası operatörler için ciddi tehlikeler oluşturabilir (Yang ve ark., 2020). Kestirimci bakım, bu tür riskleri azaltarak işyeri güvenliğini artırır.

Son olarak, kestirimci bakım, üretkenliği artırır. Planlı bakım ve onarımlar, ekipmanın daha az kesintiye uğramasını ve daha uzun süre çalışmasını sağlar. Bu da üretim sürecinin daha verimli olmasını ve işletmenin karlılığının artmasını sağlar. Tüm bu nedenlerle, kestirimci bakım modern endüstriyel tesislerde önemli bir strateji haline gelmiştir. Veri analizi, sensör teknolojisi ve yapay zekâ gibi ileri teknolojilerin kullanımıyla, kestirimci bakımın etkinliği ve yaygınlığı sürekli olarak artmaktadır. Bu da işletmelerin daha güvenilir, verimli ve karlı olmalarını sağlar.

## **2.2. Rulmanlar ve Çalışma Prensipleri**

Rulmanlar, mekanik sistemlerdeki dönme hareketi gerektiren parçalar arasında sürtünmeyi azaltmak, yükleri taşımak ve doğru hizalamayı sağlamak için kullanılan temel bir bileşendir. Genellikle, iç ve dış bilezikler arasında yer alan ve genellikle bilye, makara veya iğneli elemanlardan oluşan yuvarlanma elemanları sayesinde çalışırlar. Rulmanların temel amacı, yükleri desteklemek ve eksenel hareketleri kolaylaştırmaktır.



**Şekil 2.1.** Kestirimci bakım akış şeması

Rulmanlar, birçok farklı tip ve boyutta gelir ve çeşitli uygulamalara yönelik olarak tasarlanır. Bilye rulmanlar, hafif yüklerin ve yüksek hızların olduğu uygulamalarda sıkça kullanılırken, makaralı rulmanlar daha yüksek yükler ve daha düşük hızlar için daha uygundur. Küresel rulmanlar, eksen eğik açılarda desteklemek için tasarlanmıştır ve bu nedenle biraz eksoyel hareket kabiliyetine sahiptirler ( Wang ve ark., 2020).

Rulmanların çalışma prensibi, iç ve dış bilezikler arasındaki yuvarlanma elemanlarının dönmesine dayanır. Yuvarlanma elemanları, yüklerin taşınmasını kolaylaştırarak sürtünmeyi azaltır ve böylece daha düşük güç tüketimi ve daha pürüzsüz bir hareket sağlar. Rulmanların doğru ve yeterli şekilde yağlanması da bu sürecin önemli bir parçasıdır, çünkü yağlama aşınmayı azaltır ve rulmanın ömrünü uzatır.

Rulmanların montajı ve bakımı da kritik öneme sahiptir. Yanlış montaj veya düzensiz bakım, rulmanlarda hatalı işlev veya erken arızaya neden olabilir. Dolayısıyla, rulmanların doğru şekilde monte edilmesi ve düzenli olarak bakımının yapılması gerekmektedir. Rulmanlar, mekanik sistemlerin verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlayan temel bir bileşendir. Doğru rulman seçimi, uygun montaj ve düzenli bakım ile sistem performansı artırılabilir ve ömrü uzatılabilir. Bu nedenle, mühendisler ve endüstriyel kullanıcılar, rulmanların çalışma prensipleri ve uygun kullanımını konusunda geniş bir anlayışa sahip olmalıdır.

### 2.2.1. Rulman çeşitleri

Rulmanlar, geniş bir yelpazede farklı tiplerde ve yapıda gelirler ve çeşitli uygulamalara göre tasarlanmışlardır. Her bir rulman türü, belirli bir kullanım senaryosuna ve gereksinimlere göre uygun performans sağlamak üzere tasarlanmıştır (Y. Guo ve ark., 2023).

Bilye rulmanlar, en yaygın olarak kullanılan rulman türlerinden biridir. Bu rulmanlar, iç ve dış bilezikler arasındaki yükleri taşımak için bir dizi küresel bilye kullanılarak çalışır. Bilye rulmanlar, hafif yükler ve yüksek hızlar gerektiren uygulamalar için idealdir. İç ve dış bilezikler arasında azalan sürtünme ile mükemmel bir dönme performansı sağlarlar.

Makaralı rulmanlar, daha yüksek yükler ve daha düşük hızlar gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bu rulmanlar, iç ve dış bilezikler arasında bir dizi makara veya silindirik eleman kullanılarak çalışır. Makaralı rulmanlar, yüksek yük kapasitesine sahip olmalarıyla bilinir ve genellikle döner eksenlerin desteklenmesi için kullanılırlar.

Küresel rulmanlar, aksel açıda bir eğilim veya yanal hareketlerin olduğu uygulamalarda kullanılır. Bu rulmanlar, iç bilezikte bir eğiklik bulunan bir dış bilezik ve iç halka arasında bir bilye tertibatına sahiptir. Küresel rulmanlar, eğimli yüklere ve aksel hareketlere uyum sağlayabilirler, bu da onları geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir hale getirir.

Rulman blokları, genellikle bir rulman ile bir yatak kutusunun birleştirilmesiyle oluşturulan bir ünedir. Rulman blokları, montajı kolaylaştırmak ve döner eksenlerin desteklenmesini sağlamak için yaygın olarak kullanılır. Bu bloklar, ağır yükler altında çalışan uygulamalarda sıkça kullanılır ve farklı malzemelerden üretilirler.

Lineer rulmanlar, döner hareketin doğrusal harekete dönüştürülmesi gerektiği uygulamalarda kullanılır. Lineer rulmanlar, iç ve dış bilezikler arasındaki yuvarlanma elemanlarının doğrusal hareketine dayanır ve genellikle raylar veya kızaklar üzerinde hareket ederler. Bu rulmanlar, CNC makineleri, endüstriyel robotlar ve otomasyon sistemleri gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılır (Cui ve ark., 2022).

Rulmanlar, mekanik sistemlerin verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlayan temel bir bileşendir. Her bir rulman türü, belirli bir kullanım senaryosuna ve gereksinimlere uygun olarak tasarlanmıştır ve doğru rulman seçimi, sistem performansını artırabilir ve ömrünü uzatabilir. Bu nedenle, mühendisler ve endüstriyel kullanıcılar, farklı rulman türlerinin özelliklerini ve uygun kullanımını anlamalı ve ihtiyaçlarına en uygun olanı seçmelidirler.

### 2.2.1.1. Bilyalı rulmanlar

Bilyalı rulmanlar, iç ve dış bilezikler arasında bir dizi bilye kullanılarak çalışan ve genellikle hafif yükler ve yüksek hızlar gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir rulman türüdür. Bu rulmanlar, bilyeler arasındaki temas yüzeyinin sürtünmesini azaltarak düşük güç tüketimi ve pürüzsüz bir dönme sağlarlar (Y. Guo ve ark., 2023). Bilyalı rulmanlar, çok çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalarda kullanılmaktadır, örneğin, otomotiv, makine imalatı, elektronik cihazlar, ev aletleri ve daha birçok alanında.

Bilyalı rulmanların temel bileşenleri iç ve dış bileziklerdir. İç bilezik, genellikle dış çapı sabit olan ve genellikle mili destekleyen bilezik olarak kullanılır. Dış bilezik ise genellikle sabit bir konumda bulunan ve genellikle muhafazayı destekleyen bilezik olarak işlev görür. Bu bilezikler arasında yer alan bilyeler, rulmanın iç ve dış bilezikler arasında dönmesini sağlar ve yüklerin taşınmasını kolaylaştırır.



**Şekil 2.2.** Sabit bilyalı rulman

Bilyalı rulmanların avantajlarından biri, yüksek hızlarda düşük sürtünme sağlamalarıdır. Bilye ve bilezikler arasındaki temas alanı küçüldüğü için, dönme direnci azalır ve bu da yüksek hızlarda daha pürüzsüz bir dönme sağlar. Bu özellik, özellikle yüksek hızlı makinelerde veya ekipmanlarda önemlidir çünkü düşük sürtünme daha az enerji tüketimi ve daha uzun bir rulman ömrü anlamına gelir (Ali ve ark., 2015).

Bilyalı rulmanların bir diğer avantajı da düşük gürültü seviyeleridir. Bilyalı rulmanlar genellikle sessiz çalışırlar ve bu da endüstriyel ve ticari uygulamalarda tercih edilmelerinin bir başka nedenidir. Bu özellik, özellikle hassas ekipmanların veya tüketici elektroniğinin kullanıldığı yerlerde önemlidir çünkü sessiz çalışma, kullanıcı deneyimini iyileştirir.

Ancak, bilyalı rulmanların bazı sınırlamaları da vardır. Örneğin, yük taşıma kapasiteleri makaralı rulmanlara kıyasla daha düşüktür ve yüksek yükler altında kullanılmaları önerilmez. Ayrıca, bilyalı rulmanların eksenel yük taşıma kapasiteleri de sınırlıdır ve genellikle yalnızca hafif eksenel yükler için kullanılırlar.

Bilyalı rulmanlar, hafif yükler ve yüksek hızlar gerektiren birçok endüstriyel ve ticari uygulama için ideal bir çözümdür. Düşük sürtünme, düşük gürültü seviyeleri ve sessiz çalışma gibi avantajları, onları birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanılan bir rulman türü yapar. Bununla birlikte, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak, bilyalı rulmanların sınırlamaları da göz önünde bulundurulmalıdır ve doğru seçim yapılmalıdır.

#### 2.2.1.2. Makaralı rulmanlar

Makaralı rulmanlar, yüksek yük kapasitesi ve düşük hızlarda çalışma gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir rulman türüdür. Bu rulmanlar, iç ve dış bilezikler arasında bir dizi silindirik veya konik makara kullanılarak çalışır. Makaralı rulmanlar, genellikle ağır yüklerin desteklenmesi ve yüksek dayanıklılık gerektiren endüstriyel makinelerde, taşıtlarda, vinçlerde, tamburlarda ve diğer birçok uygulamada kullanılırlar. Makaralı rulmanların temel bileşenleri iç ve dış bileziklerdir. İç bilezik, genellikle mili destekleyen ve genellikle dış çapı sabit olan bir bilezik olarak kullanılır. Dış bilezik ise genellikle muhafazayı destekleyen ve genellikle sabit bir konumda bulunan bir bilezik olarak işlev görür. Bu bilezikler arasındaki makaralar, yüklerin taşınmasını sağlar ve rulmanın iç ve dış bilezikler arasında dönmesini kolaylaştırır (Z. Wang ve ark., 2023). Makaralı rulmanların en belirgin avantajlarından biri, yüksek yük kapasitesidir. Silindirik veya konik makaralar, yüklerin daha büyük bir alan boyunca dağılmasına ve bu da daha büyük yüklerin taşınmasına olanak tanır. Bu özellik, ağır yüklerin taşınması gerektiren endüstriyel uygulamalarda önemlidir ve makaralı rulmanları bu tür uygulamalar için ideal bir seçenek haline getirir (W. Guo ve He, 2022). Şekil 2.4’de standart makaralı rulman görseli verilmektedir.



**Şekil 2.3.** Makaralı rulman

Ayrıca, makaralı rulmanlar genellikle düşük hızlarda çalışma gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Silindirik veya konik makaralar, yüksek yük kapasitesi sağlarken, düşük hızlarda dönmeye de uygundur. Bu özellik, özellikle endüstriyel makinelerde veya taşıtlarda düşük hızlarda çalışma gerektiren uygulamalarda önemlidir.

Makaralı rulmanlar genellikle dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Yüksek yük kapasitesi ve düşük hızlarda çalışma özellikleri, bu rulmanların uzun süre dayanmasını sağlar. Bu da bakım maliyetlerini azaltır ve sistemlerin daha güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar (Guo ve ark., 2023).

Ancak, makaralı rulmanların bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, yüksek yük kapasitesi ve düşük hızlarda çalışma özellikleri, genellikle daha büyük ve daha ağır bir tasarıma yol açar. Bu nedenle, alan sınırlı veya hafif yapı gerektiren uygulamalar için uygun olmayabilirler. Ayrıca, daha büyük makaralı rulmanlar, montaj ve bakımı daha zor olabilir.

Makaralı rulmanlar, ağır yüklerin taşınması ve düşük hızlarda çalışma gerektiren birçok endüstriyel uygulama için ideal bir çözüm sunar. Yüksek yük kapasitesi, dayanıklılık ve uzun ömür, onları endüstriyel makinelerde, taşıtlarda ve diğer birçok alanda vazgeçilmez hale getirir. Bununla birlikte, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak, makaralı rulmanların bazı dezavantajları göz önünde bulundurulmalı ve doğru seçim yapılmalıdır.

### 2.2.1.3. İğneli rulmanlar

İğneli rulmanlar, yüksek yük kapasitesi, küçük alan gereksinimi ve düşük maliyet gibi avantajlarıyla bilinen bir rulman türüdür. Bu rulmanlar, iç ve dış bilezikler arasında uzun ve ince iğneler veya silindirik elemanlar kullanılarak çalışır. İğneli rulmanlar, genellikle büyük yüklerin taşınması ve sınırlı montaj alanı bulunan uygulamalarda tercih edilirler (Rathore ve ark., 2019).

İğneli rulmanların temel bileşenleri iç ve dış bileziklerdir. İç bilezik, genellikle mili destekleyen ve genellikle dış çapı sabit olan bir bilezik olarak kullanılır. Dış bilezik ise genellikle muhafazayı destekleyen ve genellikle sabit bir konumda bulunan bir bilezik olarak işlev görür. İğneler veya silindirler, bu bilezikler arasındaki yükleri taşıyarak ve rulmanın iç ve dış bilezikler arasında dönmesini sağlar.

İğneli rulmanların en belirgin avantajlarından biri, yüksek yük kapasitesidir. Uzun ve ince iğneler veya silindirler, yükleri taşıırken temas alanını artırır ve bu da daha büyük yüklerin taşınmasını sağlar. Bu özellik, ağır yüklerin taşınması gerektiren endüstriyel uygulamalarda önemlidir ve iğneli rulmanları bu tür uygulamalar için ideal bir seçenek haline getirir.

İğneli rulmanlar aynı zamanda küçük alanlarda kullanım için uygundur. Uzun ve ince iğneler veya silindirler, yüksek yük kapasitesine sahip olmalarına rağmen, daha küçük bir alan içinde monte edilebilirler. Bu özellik, özellikle sınırlı montaj alanı bulunan uygulamalarda veya yerleştirme sınırlamaları olan makinelerde önemlidir.

Düşük maliyet, iğneli rulmanların bir diğer avantajıdır. Basit tasarımları ve malzeme kullanımı, bu rulmanların maliyetini düşük tutar. Bu da iğneli rulmanları ekonomik bir seçenek haline getirir ve maliyet etkinliği sağlar (Plaščak ve ark., 2010).

Ancak, iğneli rulmanların bazı sınırlamaları da vardır. Örneğin, yüksek hızlarda çalışmaları önerilmez çünkü iğneler veya silindirler, dönme sırasında eğilme eğilimindedir ve bu da hızlı dönme hareketlerinde güvenilmezlik oluşturabilir. Ayrıca, iğneli rulmanlar eksenel yük taşıma kapasitesi açısından sınırlıdır ve genellikle yalnızca hafif eksenel yükler için kullanılırlar. İğneli rulmanlar, yüksek yük kapasitesi, küçük alan gereksinimi ve düşük maliyet gibi avantajlarıyla birçok endüstriyel uygulama için ideal bir çözüm sunarlar. Uzun ve ince iğneler veya silindirler, yük taşıma kapasitesini artırırken, küçük alanlarda montajı kolaylaştırır.

Bununla birlikte, yüksek hızlar veya ağır eksenel yükler gerektiren uygulamalarda, doğru seçim yapılmalı ve iğneli rulmanların sınırlamaları göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.5 'de iğneli rulman görseli verilmiştir.



**Şekil 2.4.** İğneli rulman

### **2.2.2. Rulmanların yapısal özellikleri**

Rulmanların yapısal özellikleri, genellikle iç ve dış bilezikler, yuvarlanma elemanları ve kafes gibi temel unsurlardan oluşur. Bu yapısal özellikler, rulmanın performansını, dayanıklılığını ve kullanım alanlarını belirler (Zafer ve ark., 2003).

İç ve dış bilezikler rulmanın ana yapı taşlarıdır. İç bilezik, genellikle dönen milin taşınması veya desteklenmesi için kullanılırken, dış bilezik genellikle sabit bir konumda bulunan muhafazayı destekler. Bu bilezikler genellikle yüksek kaliteli çelikten veya bazı durumlarda seramikten imal edilirler. İyi bir iç ve dış bilezik tasarımı, yük taşıma kapasitesini artırır ve rulmanın dayanıklılığını sağlar.

Yuvarlanma elemanları rulmanın iç ve dış bilezikleri arasında dönme işlevini yerine getiren bileşenlerdir. Bilye, makara, iğne veya konik makaralar gibi çeşitli tiplerde olabilirler. Bu elemanlar genellikle çelik veya seramikten imal edilirler. Yuvarlanma elemanlarının doğru boyutlandırılması ve malzeme seçimi, rulmanın yük taşıma kapasitesini, hızını ve dayanıklılığını belirler (Castaneda ve Zótowski, 2010).

Kafes rulmanın yuvarlanma elemanlarını sabit konumda tutan ve dönme sırasında sürtünmeyi azaltan bir yapıdır. Kafes, genellikle metal, plastik veya tekstil malzemelerden yapılmıştır. İyi bir kafes tasarımı, yuvarlanma elemanlarının düzgün dağılmasını ve temas yüzeylerinin hasar görmesini önler. Ayrıca, kafesin hafif olması, rulmanın hızını artırır ve sürtünmeyi azaltır (Sheng ve ark., 2023).

Diğer önemli yapısal özellikler arasında contalar ve yağ keçeleri yer alır. Bunlar, dış etkenlerin rulmanın içine girmesini ve yağın dışarıya sızmasını önlemek için kullanılır. Contalar ve yağ keçeleri, rulmanın ömrünü uzatır ve performansını artırır.

Rulmanların yapısal özellikleri, kullanıldığı uygulamaya bağlı olarak değişebilir. Örneğin, endüstriyel makinelerde kullanılan rulmanlar, ağır yükler altında dayanıklılık

gerektirirken, yüksek hızlarda kullanılan rulmanlar düşük sürtünme ve yüksek hız performansı sağlamak için özel olarak tasarlanmış olabilir. Rulmanların yapısal özellikleri, rulmanın performansını, dayanıklılığını ve kullanım alanlarını belirleyen önemli faktörlerdir. İyi bir iç ve dış bilezik tasarımı, uygun yuvarlanma elemanları seçimi, etkili bir kafes tasarımı ve uygun contalar ve yağ keçeleri, rulmanın uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu nedenle, rulman seçimi ve tasarımı, mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynar ve dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır.

#### 2.2.2.1. Malzeme türleri

Rulmanların malzeme türleri, rulmanın performansı, dayanıklılığı ve çalışma ortamına uygunluğu açısından büyük öneme sahiptir. Rulmanlarda kullanılan malzemeler genellikle yüksek kaliteli çelik alaşımları, seramikler veya plastikler gibi çeşitli tiplerde olabilir.

Yüksek kaliteli çelik alaşımları, en yaygın olarak kullanılan rulman malzemesidir. Bu çelikler, mükemmel mukavemet, aşınma direnci ve yorulma özellikleri sunarlar. Genellikle rulman bilezikleri ve yuvarlanma elemanları için tercih edilirler çünkü yüksek yük taşıma kapasitesi sağlarlar ve uzun süre dayanıklılık gösterebilirler. Bu çelikler ayrıca ısıya dayanıklı ve korozyona karşı dirençlidirler, bu da rulmanların çeşitli çalışma ortamlarında kullanılmasını sağlar (Zhang ve ark., 2018).

Seramikler, özellikle yüksek hızlarda ve yüksek sıcaklıklarda çalışan uygulamalar için popüler bir rulman malzemesidir. Seramikler, çelikten daha hafif olabilir ve daha düşük termal genişleme katsayısına sahiptirler, bu da daha yüksek hızlarda daha az ısı üretimi anlamına gelir. Ayrıca, seramiklerin yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyona karşı direnci vardır, bu da çeşitli zorlu ortamlarda kullanılmasını sağlar. Ancak, seramik rulmanlar genellikle daha yüksek maliyetlidir ve çelik rulmanlara kıyasla daha hassas bir şekilde işlenmeleri gerekebilir.

Plastikler, özellikle korozyon ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir rulman malzemesidir. Plastik rulmanlar genellikle düşük yükler altında çalışır ve düşük sürtünme özelliklerine sahiptirler. Ayrıca, plastikler genellikle kendinden yağlamalı özelliklere sahiptir, bu da yağlama gereksinimini azaltır ve bakım maliyetlerini düşürür. Ancak, plastik rulmanlar genellikle daha düşük yük taşıma kapasitesine sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda veya yüksek hızlarda kullanılmasını önerilmez (Yan ve ark., 2020).

Her malzeme türünün kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır ve rulman seçiminde kullanılacak malzeme, uygulamanın gereksinimlerine ve çalışma ortamına bağlı olarak dikkatlice değerlendirilmelidir. Doğru malzeme seçimi, rulmanın performansını artırabilir, dayanıklılığını sağlayabilir ve uzun ömürlü bir kullanım sağlayabilir. Bu nedenle, rulman tasarımında ve seçiminde malzeme türüne dikkat edilmeli ve doğru seçim yapılmalıdır.

#### 2.2.2.2. Yapısal tasarım ve geometri

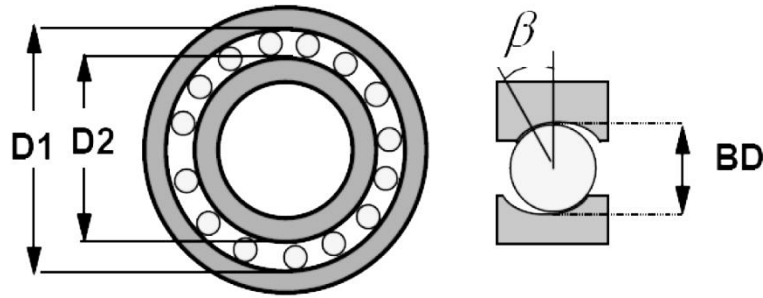
Rulmanların yapısal tasarımı ve geometrisi, rulmanın performansını, dayanıklılığını ve kullanım alanlarını büyük ölçüde etkiler. Bu faktörler, iç bilezik, dış bilezik, yuvarlanma elemanları ve kafes gibi temel bileşenlerin boyutları, şekilleri ve konumları ile ilgilidir. İç ve dış bileziklerin yapısal tasarımı, rulmanın genel dayanıklılığı ve yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu bileziklerin doğru boyutlandırılması ve şekillendirilmesi, yüklerin eşit şekilde dağılmasını sağlar ve aşınma direncini artırır. İç bilezik genellikle dönen milin taşınması veya desteklenmesi için kullanılırken, dış bilezik genellikle sabit bir konumda bulunan muhafazayı destekler. Bu bileziklerin geometrisi, rulmanın sağlam ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar (Mustafa, 2021).

Yuvarlanma elemanlarının yapısal tasarımı ve geometrisi, rulmanın dönme hareketini sağlar ve sürtünmeyi azaltır. Bilye, makara, iğne veya konik makaralar gibi çeşitli tiplerde olabilen bu elemanlar, rulmanın iç ve dış bilezikleri arasında dönerek yükleri taşırlar. Yuvarlanma elemanlarının doğru boyutlandırılması ve şekillendirilmesi, sürtünmeyi azaltır ve rulmanın daha verimli çalışmasını sağlar.

Kafesin yapısal tasarımı, yuvarlanma elemanlarını sabit konumda tutar ve dönme sırasında sürtünmeyi azaltır. Kafes, genellikle metal, plastik veya tekstil malzemelerden yapılmıştır ve yuvarlanma elemanlarının düzgün dağılmasını sağlar. İyi bir kafes tasarımı, rulmanın performansını artırır ve dayanıklılığını sağlar. Ayrıca, kafesin hafif olması, rulmanın hızını artırır ve sürtünmeyi azaltır.

Rulmanların yapısal tasarımı ve geometrisi, genellikle çalışma ortamına, yüklere ve hızlara bağlı olarak belirlenir. Örneğin, endüstriyel makinelerde kullanılan rulmanlar genellikle yüksek yük taşıma kapasitesi ve dayanıklılık gerektirirken, yüksek hızlarda kullanılan rulmanlar düşük sürtünme ve yüksek hız performansı sağlamak için özel olarak tasarlanmış olabilir. Rulmanların yapısal tasarımı ve geometrisi, rulmanın performansını, dayanıklılığını ve kullanım alanlarını belirleyen önemli faktörlerdir. İyi

bir iç ve dış bilezik tasarımı, uygun yuvarlanma elemanları seçimi, etkili bir kafes tasarımı ve doğru geometri, rulmanın uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu nedenle, rulman tasarımında ve seçiminde yapısal tasarım ve geometrinin dikkatlice ele alınması önemlidir (Babu ve Das, 2013). Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.6) standart bir rulmanın geometrisi verilmiştir. Burada ki  $D1$  çapı rulmanın iç deliğinin yani rulmanın mile geçtiği çaptır. Ve rulmanın bağlanacağı milin çapına uygun olmalıdır. Uygun seçilmezse rulman mile oturmaz veya gevşek kalır. Mil ve rulman arasında uygun sıkılıkta bir geçme gerekir. Aksi takdirde milde kayma veya gevşeme yaşanabilir.  $D2$  çapı rulmanın dış çemberinin dış yüzeyinden ölçüldüğü çaptır. Rulmanın oturacağı yuva yani gövdedeki yuva bu ölçüye göre tasarlanır. Doğru dış çap rulmanın gövdeye düzgün gövdeye düzgün dönme sırasında stabil kalmasını sağlar. Aksi takdirde gevşeklik ve montaj sırasında zorluk yaşanabilir. Şekil 2.6 daki  $BD$  genişliği ise rulmanın yan yüzeyleri arasındaki toplam genişliğinin göstergesidir. Yük taşıma kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir.  $BD$  ölçüsü geniş rulmanlar daha yüksek radyal ve aksenal yük taşıyabilir. Son olarak Beta açısı ise genellikle eğik bilyeli rulmanlarda sıkça karşılaştığımız yük yönünü ifade eder. Büyük beta açısı daha fazla aksenal yük taşıma kapasitesini, küçük beta açısı ise daha fazla radyal yük taşıma kapasitesini ifade eder diyebiliriz.



Şekil 2.5. Rulman geometrisi

### 2.2.3. Yorulma ve kırılma mekanizmaları

Rulmanlar, mekanik sistemlerin temel bileşenlerindendir ve sürekli dönen veya hareketli parçaların yüklerini taşırlar. Bu sürekli dönme ve yük taşıma işlemi, rulmanların yorulma ve kırılma mekanizmalarına maruz kalmalarına neden olabilir. Yorulma ve kırılma, rulmanların ömrünü etkileyen ve mekanik sistemin güvenilirliğini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir ( Guo ve ark., 2023).

Yorulma mekanizması, rulmanın tekrarlayan yükleme döngüleri altında maruz kaldığı bir olaydır. Mekanik sistemlerdeki titreşimler, darbeler veya yük değişimleri, rulmanlara uygulanan tekrarlayan yüklerin ana kaynağını oluşturur. Bu tekrarlayan yükler, rulmanın iç ve dış bilezikleri, yuvarlanma elemanları ve kafes gibi bileşenlerinde gerilme konsantrasyonlarına neden olabilir. Bu gerilme konsantrasyonları, malzeme yorgunluğuna neden olabilir ve sonuç olarak rulmanın kırılmasına veya hasar görmesine yol açabilir. Yorulma mekanizması genellikle uzun süreli kullanımdan kaynaklanan bir etkidir ve zamanla malzemenin yorgunluğu artar, bu da rulmanın performansını ve dayanıklılığını azaltır (Babu ve Das, 2013).

Kırılma mekanizması ise, rulmanın aniden uygulanan aşırı yüklere veya anormal koşullara maruz kaldığında meydana gelir. Bu durumlar genellikle mekanik sistemlerdeki hatalı montaj, aşırı yüklenme, ani duruşlar veya darbeler gibi faktörlerden kaynaklanır. Ani yük artışları veya aşırı yüklenme durumları, rulmanın iç veya dış bileziklerinde çatlak oluşumuna veya kırılmaya neden olabilir. Ayrıca, yüksek hızlarda çalışma sırasında rulmanlarda oluşabilecek sürtünme ısı da malzemede termal streslere yol açabilir ve kırılma mekanizmasını tetikleyebilir.

Yorulma ve kırılma mekanizmalarının önlenmesi veya azaltılması için bir dizi önlem alınabilir. Öncelikle, doğru rulman seçimi ve montajı önemlidir. Rulmanların belirli bir uygulamaya uygunluğu dikkatlice değerlendirilmeli ve montaj talimatlarına uygun olarak doğru şekilde monte edilmelidir. Ayrıca, düzenli bakım ve yağlama, rulmanların ömrünü uzatabilir ve performansını artırabilir. Ayrıca, titreşimleri azaltmak için izolasyon yöntemleri kullanılabilir veya yük dağılımını optimize etmek için tasarım değişiklikleri yapılabilir.

Rulmanların yorulma ve kırılma mekanizmaları, mekanik sistemlerin güvenilirliğini ve performansını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Yorulma genellikle uzun süreli kullanımın bir sonucu olarak ortaya çıkar, bu nedenle düzenli bakım ve doğru montaj önlemleri alınmalıdır. Kırılma ise, anormal koşullar veya aşırı yüklenme durumlarında meydana gelir, bu nedenle mekanik sistemin uygun bir şekilde tasarlanması ve işletilmesi önemlidir. Bu önlemler alındığında, rulmanların ömrü uzatılabilir ve mekanik sistemlerin güvenilirliği artırılabilir.

#### 2.2.3.1. Yorulma süreçleri

Yorulma süreçleri, rulmanların tekrarlayan yükler altında maruz kaldıkları mekanizmaları ifade eder. Bu süreçler, rulmanın iç ve dış bilezikleri, yuvarlanma

elemanları ve kafesi gibi bileşenlerinde gerilme birikmesine ve zamanla malzeme yorgunluğuna neden olur. Yorulma, genellikle uzun süreli kullanımın bir sonucu olarak ortaya çıkar ve rulmanın performansını ve dayanıklılığını azaltır (Kartepe, 1991).

Yorulma süreçleri, genellikle yüklerin tekrarlanan bir döngüde uygulanmasıyla başlar. Bu yük döngüleri, rulmanın iç ve dış bilezikleri arasında meydana gelen sürekli dönme hareketleri sırasında gerçekleşir. Her dönüş sırasında, rulman bileşenleri bir dizi yükleme ve boşaltma döngüsüne tabi tutulur. Bu döngüler, malzeme üzerinde gerilme konsantrasyonlarına neden olur ve zamanla malzeme yorgunluğuna yol açar (Goyal ve Pabla, 2016).

Yorulma süreçleri, rulmanın iç ve dış bileziklerindeki malzeme yorgunluğuna bağlı olarak çeşitli şekillerde ortaya çıkabilir. Tipik olarak, yorulma çatlakları veya yüzey hasarı gibi belirtiler görülür. Bu çatlaklar, genellikle rulman bileziklerinin yük altındaki bölgelerinde başlar ve zamanla büyür. Yüzey hasarı ise, yüklerin etkisiyle malzemenin yüzeyinde oluşan çukurlar, çizikler veya aşınma izleri şeklinde görülebilir.

Yorulma süreçlerini anlamak, rulmanların tasarımı ve kullanımı açısından önemlidir. Örneğin, rulman tasarımında malzeme seçimi ve bilezikler arasındaki yük dağılımı, yorulma direncini artırabilir. Ayrıca, düzenli bakım ve yağlama, yorulma süreçlerinin etkilerini azaltabilir ve rulmanın ömrünü uzatabilir.

Yorulma süreçlerinin önlenmesi veya azaltılması için bir dizi önlem alınabilir. Bunlar arasında, rulmanın doğru şekilde seçilmesi ve monte edilmesi, düzenli bakım ve yağlama, yük dağılımının optimize edilmesi ve titreşimleri azaltmak için izolasyon yöntemlerinin kullanılması bulunur. Bu önlemler alındığında, rulmanın ömrü uzatılabilir ve mekanik sistemin güvenilirliği artırılabilir.

Yorulma süreçleri, rulmanların tekrarlayan yükler altında maruz kaldığı ve zamanla malzeme yorgunluğuna yol açan mekanizmalardır. Bu süreçlerin anlaşılması ve önlenmesi, rulmanların uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu nedenle, rulman tasarımı, kullanımı ve bakımı konusunda dikkatli olunmalı ve uygun önlemler alınmalıdır.

#### 2.2.3.2. Kırılma modları ve nedenleri

Rulman kırılma modları, rulmanın aniden uygulanan aşırı yüklere veya anormal koşullara maruz kaldığında meydana gelen çeşitli kırılma şekillerini ifade eder. Bu kırılma modları, mekanik sistemlerdeki hatalı montaj, aşırı yüklenme, ani duruşlar veya darbeler gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Kırılma modları, rulmanın iç veya dış

bileziklerinde çeşitli şekillerde ortaya çıkabilir ve rulmanın işlevsiz hale gelmesine veya hasar görmesine neden olabilir (Sidahmed, 2001).

Birincil kırılma modlarından biri, yüksek stres altındaki bir noktada başlayan çatlakların neden olduğu yorulma kırılmasıdır. Bu kırılma modu, genellikle uzun süreli kullanımın bir sonucu olarak ortaya çıkar ve rulmanın iç veya dış bileziklerinde çatlaklar oluşturarak kırılmasına yol açar. Yorulma kırılması genellikle yüksek hızlarda çalışma sırasında veya aşırı yüklenme durumlarında meydana gelir (Cempel, 1989).

Bir diğer kırılma modu, aşırı yüklenme veya darbeler nedeniyle rulman bileziklerinde ani çatlaklar oluşan darbe kırılmasıdır. Bu kırılma modu, genellikle anormal koşullar veya aşırı yüklenme durumlarında meydana gelir ve rulman bileziklerinde beklenmedik hasara neden olabilir. Darbe kırılması, genellikle yüksek darbe yükleri altında veya ani duruşlar sırasında ortaya çıkar.

Bunların dışında, rulman kırılma modları arasında yatak dış çapı kırılması, rulman yuvarlanma elemanları veya kafesinin kırılması gibi çeşitli diğer durumlar da bulunabilir. Bu kırılma modları genellikle anormal koşullar veya hatalı montaj nedeniyle ortaya çıkar ve rulmanın işlevsiz hale gelmesine veya hasar görmesine neden olabilir.

Rulman kırılma modlarının nedenleri çeşitli olabilir. Hatalı montaj, yanlış rulman seçimi, aşırı yüklenme, darbeler, ani duruşlar veya ani hız değişiklikleri gibi faktörler, rulmanların kırılma riskini artırabilir. Ayrıca, yağlama eksikliği veya kontaminasyon gibi faktörler de kırılma riskini artırabilir ve rulmanın hasar görmesine neden olabilir.

Kırılma modlarının önlenmesi veya azaltılması için bir dizi önlem alınabilir. Bunlar arasında, doğru rulman seçimi ve montajı, düzenli bakım ve yağlama, yük dağılımının optimize edilmesi ve titreşimleri azaltmak için izolasyon yöntemlerinin kullanılması bulunur. Bu önlemler alındığında, rulmanın kırılma riski azaltılabilir ve mekanik sistemin güvenilirliği artırılabilir. Rulman kırılma modları, rulmanın anormal koşullara veya aşırı yüklerle maruz kaldığında meydana gelen çeşitli kırılma şekillerini ifade eder. Bu kırılma modları genellikle anormal koşullar veya hatalı montaj nedeniyle ortaya çıkar ve rulmanın işlevsiz hale gelmesine veya hasar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, rulmanların doğru şekilde seçilmesi, montajı ve bakımı önemlidir ve uygun önlemler alınmalıdır (Cempel, 2005).

### 2.3. Isıl İşlem Teknikleri

Isıl işlem teknikleri, metal parçaların mekanik özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek amacıyla uygulanan termal işlemlerdir. Bu teknikler, metal parçaların sertlik, dayanıklılık, mukavemet, tokluk, yorgunluk direnci ve işlenebilirlik gibi özelliklerini artırmak veya istenen bir düzeye getirmek için kullanılır. Isıl işlem teknikleri, genellikle döküm parçalar, çelikler, alüminyum alaşımları ve diğer metal alaşımlarında yaygın olarak uygulanır. Birincil ısıl işlem tekniği, sertleştirme işlemidir. Sertleştirme işlemi, metal parçanın ısıtılması ve ardından hızlı soğutulmasıyla gerçekleştirilir. Bu işlem, metalin iç yapısında değişiklikler meydana getirir, özellikle mikro yapıda küçük bir dönüşüm yapar ve böylece parçanın sertliğini artırır (Erol, 2015). Bu işlem, çeşitli sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilebilir ve metalin tipine, boyutuna ve istenilen sonuca bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Temperleme, sertleştirme işleminden sonra uygulanan bir başka ısıl işlem tekniğidir. Sertleştirme işlemi sonrasında metalin çok sert ve kırılabilir hale gelme riski vardır. Bu nedenle, sertleştirme işleminden sonra metalin yapısını istenen miktarda yumuşatmak ve iç gerilmeleri gidermek için temperleme işlemi uygulanır. Bu işlem, metalin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulmasıyla gerçekleştirilir. Bu sayede, metalin sertliği azaltılır ancak mukavemeti ve tokluğu artırılır. Dövme işlemi, metal parçaların şekillendirilmesi ve özelliklerinin iyileştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir başka ısıl işlem tekniğidir. Bu işlemde, metal parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve ardından dövme operasyonlarıyla şekillendirilir. Bu işlem sırasında, metalin iç yapısında yeniden düzenlemeler oluşur ve böylece parçanın mukavemeti ve tokluğu artırılır. Dövme işlemi genellikle çeliklerin üretiminde ve işlenmesinde yaygın olarak kullanılır.

Isıl işlem teknikleri, metal parçaların özelliklerini istenilen düzeye getirmek veya iyileştirmek için önemli bir araçtır. Bu tekniklerin doğru bir şekilde uygulanması, metal parçaların dayanıklılığını, performansını ve kullanım ömrünü artırabilir. Bununla birlikte, ısıl işlem süreçlerinin uygun sıcaklık, süre ve soğutma hızı gibi faktörlere dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Yanlış uygulamalar, istenmeyen sonuçlara veya parça hasarına neden olabilir. Bu nedenle, ısıl işlem tekniklerinin uzmanlar tarafından dikkatle yönetilmesi ve uygulanması önemlidir (Bai ve ark., 2023).

### 2.3.1. Isıl işlemin tanımı ve genel süreçleri

Isıl işlem, metal parçaların mekanik özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek amacıyla uygulanan bir dizi termal işlemi içerir. Bu işlemler genellikle metal parçaların sertlik, dayanıklılık, mukavemet, tokluk, yorgunluk direnci ve işlenebilirlik gibi özelliklerini artırmak veya istenen bir düzeye getirmek için kullanılır. Isıl işlem, genellikle döküm parçalar, çelikler, alüminyum alaşımları ve diğer metal alaşımlarında yaygın olarak uygulanır.

Isıl işlem genel olarak, metal parçanın belirli bir sıcaklıkta ısıtılması, bu sıcaklıkta belli bir süre bekletilmesi ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulması süreçlerinden oluşur. Isıl işlem sürecinin ana hedefi, metalin iç yapısında değişiklikler yaparak istenen mekanik özellikleri elde etmektir. Bu değişiklikler, metalin kristal yapısında veya döngüsel fazlarında meydana gelir (Ayan, 2019).

Isıl işlemin ana süreçleri arasında sertleştirme, temperleme, normalleştirme, dövme, nitrasyon, sementasyon, yüzey sertleştirme, ısıl rölatif ve yüzey modifikasyonu gibi çeşitli işlemler bulunur. Her bir işlem, metalin belirli bir özelliğini iyileştirmek veya değiştirmek için farklı bir yöntem kullanır.

Sertleştirme işlemi, genellikle metal parçayı belirli bir sıcaklıkta ısıtarak başlar. Metalin bu sıcaklıkta tutulması, kristal yapıda değişikliklere yol açar ve daha sonra hızlı bir şekilde soğutulur. Bu işlem, metalin iç yapısında sertlik ve dayanıklılık artışı sağlar.

Temperleme işlemi ise, sertleştirme işleminden sonra uygulanır ve metal parçanın iç gerilimlerini gidermek ve sertleştirme işlemi sonrası oluşabilecek kırılabilirliği azaltmak için kullanılır. Metal belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulur.

Normalleştirme işlemi, metal parçanın iç yapısında düzensizlikler varsa veya belirli bir yapı elde edilmesi gerekiyorsa uygulanır. Metal parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve daha sonra kontrollü bir şekilde soğutulur.

Dövme işlemi, metal parçaların şekillendirilmesi ve iç yapısındaki özelliklerin iyileştirilmesi için kullanılır. Bu işlem sırasında metal parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve ardından dövme operasyonlarıyla şekillendirilir. Nitrasyon ve sementasyon gibi işlemler, metal parçanın yüzey özelliklerini değiştirmek için kullanılır. Bu işlemler, metal parçanın yüzeyine belirli elementlerin difüzyonunu sağlar ve böylece yüzeyin sertliği, aşınma direnci ve korozyon direnci artar (Tabak, 2014).

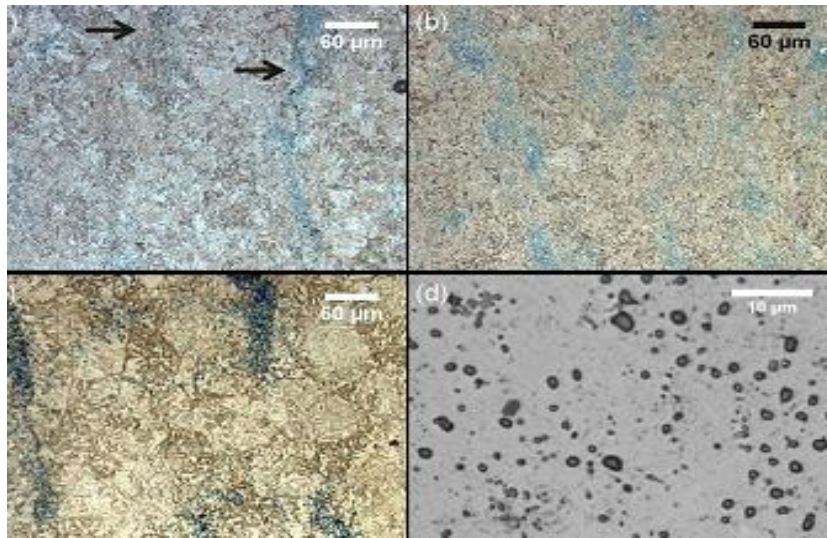
Isıl işlem süreçlerinin uygulanması, metal parçanın özelliklerini belirli bir ihtiyaca uygun hale getirirken, aynı zamanda uygun sıcaklık, süre ve soğutma hızı gibi

faktörlere dikkat edilmesi gerektiği için dikkatli bir planlama ve denetim gerektirir. Yanlış uygulamalar, istenmeyen sonuçlara veya parça hasarına neden olabilir. Bu nedenle, ısıl işlem tekniklerinin uzmanlar tarafından dikkatle yönetilmesi ve uygulanması önemlidir.

### 2.3.2. Rulman çeliklerinde kullanılan ısıl işlem çeşitleri

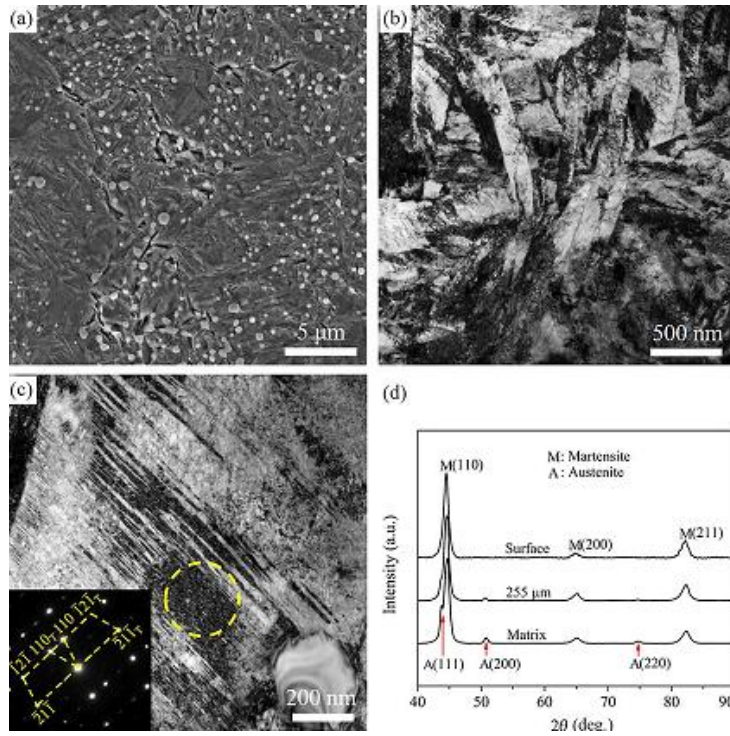
Rulman çeliklerinde kullanılan ısıl işlem çeşitleri, rulmanların istenilen mekanik özelliklere sahip olmalarını sağlamak için önemlidir. Bu çeşitler, rulmanların sertlik, dayanıklılık, mukavemet, tokluk ve aşınma direnci gibi özelliklerini artırmak veya optimize etmek amacıyla uygulanır. Rulman çeliklerinin ısıl işlem çeşitleri genellikle sertleştirme, temperleme, normalleştirme ve yüzey sertleştirme gibi süreçleri içerir (Tabak ve Özkaymak, 2020).

Sertleştirme işlemi, rulman çeliklerinde sıkça kullanılan bir ısıl işlem çeşididir. Bu işlemde, çelik parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak kristal yapısında dönüşümlere neden olunur. Daha sonra hızlı bir şekilde soğutulmasıyla çelik parçanın iç yapısında sertleşme gerçekleşir. Bu süreç, çelikteki karbon miktarına bağlı olarak değişir ve belirli bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Sertleştirme işlemi, rulman yuvarlanma elemanlarının ve bileziklerinin yüzeylerinin sertleştirilmesi için sıklıkla kullanılır, böylece aşınma direnci artar. Şekil 2.6 'de sertleştirme işlemi sonrası malzeme iç yapısındaki değişiklik gösterilmiştir.



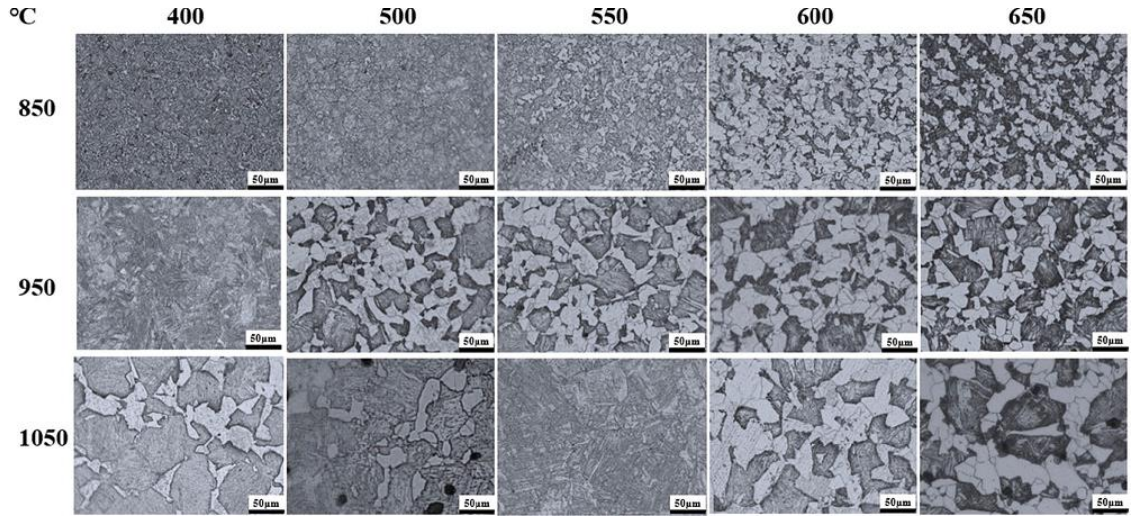
Şekil 2.6. Sertleştirme sonrası malzeme iç yapısı (Wang ve ark., 2023)

Temperleme işlemi, sertleştirme işleminden sonra uygulanan bir başka önemli ısıl işlem çeşididir. Bu işlem, sertleştirme işlemi sonrasında çelik parçanın çok sert ve kırılgan olma riskini azaltmak ve istenen mukavemet ve tokluk özelliklerini elde etmek için uygulanır. Çelik parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulurken temperleme işlemi gerçekleştirilir. Bu süreç, çelikin iç gerilmelerini giderir ve daha homojen bir yapı elde edilmesini sağlar. Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.7) temperleme sonrası malzemenin mikro yapısındaki değişim gösterilmiştir.



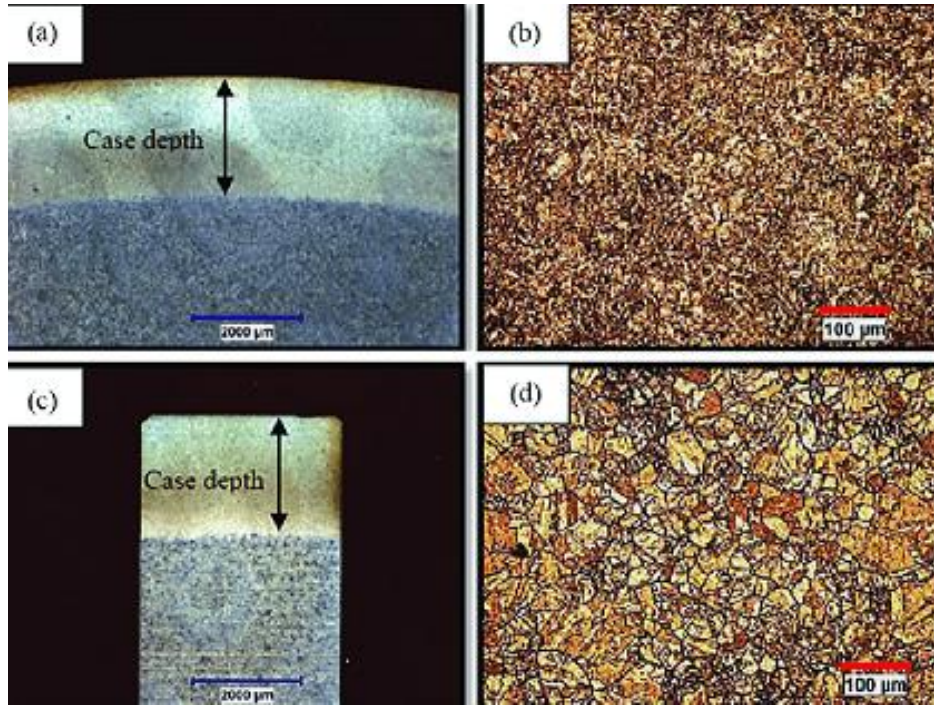
Şekil 2.7. Temperleme sonrası malzeme iç yapısı (Zhang ve ark., 2017).)

Normalleştirme işlemi, rulman çeliklerinde kullanılan diğer bir ısıl işlem çeşididir. Bu işlem, çelik parçanın iç yapısında düzensizlikler varsa veya belirli bir yapı elde edilmesi gerekiyorsa uygulanır. Metal parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve daha sonra kontrollü bir şekilde soğutulurken normalleştirme işlemi gerçekleştirilir. Bu süreç, çelikteki kristal yapıyı düzenler ve iç gerilmeleri giderir, böylece istenen mekanik özellikler elde edilir (Tolga ve ark., 2012). Şekil 2.8’de normalleştirme sonrası malzeme mikroyapısındaki değişiklik görseli verilmiştir.



**Şekil 2.8.** Normalleştirme sonrası malzeme iç yapısı (Li ve ark., 2023)

Yüzey sertleştirme işlemi, rulman çeliklerinde kullanılan bir başka önemli ısıl işlem çeşididir. Bu işlem, rulman yüzeylerinin sertliğini ve aşınma direncini artırmak için uygulanır. Yüzey sertleştirme işlemi genellikle indüksiyon sertleştirme veya nitrasyon gibi teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu işlem, rulman yüzeylerinde sert bir katman oluşturarak aşınma direncini artırır ve ömrünü uzatır. Şekil 2.9'da yüzey sertleştirmenin malzeme mikro yapısındaki etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 2.9.** Yüzey sertleştirme sonrası malzeme iç yapısı (Jomaa ve ark., 2015.)

Rulman eliklerinde kullanılan ısıl işlem eşitleri, rulmanların performansını artırmak ve ömrünü uzatmak için önemlidir. Bu işlemler, rulmanların içyapısında yapısal değişiklikler yaparak istenen mekanik özellikleri elde etmeyi sağlar. Bu nedenle, ısıl işlem süreçlerinin doğru bir şekilde uygulanması ve kontrol edilmesi önemlidir. Yanlış uygulamalar, rulmanın performansını olumsuz yönde etkileyebilir ve hasara neden olabilir. Bu nedenle, rulman üreticileri ve kullanıcıları, ısıl işlem süreçlerini dikkatle yönetmelidir.

### 2.3.2.1. Sementasyon

Sementasyon, rulman çeliklerinde kullanılan önemli bir ısıl işlem çeşididir. Bu işlem, rulman yüzeylerinin sertliğini artırmak ve aşınma direncini artırmak için yaygın olarak kullanılır. Sementasyon işlemi, rulman yüzeyine karbon ve/veya diğer alaşımların difüzyonunu sağlayarak yüzeyde sert bir katman oluşturur. Bu katman, elik yüzeyindeki mekanik özellikleri iyileştirir ve rulmanın ömrünü uzatır (Uysal, 2019).

Sementasyon işlemi, genellikle gaz veya sıvı fazlarda gerçekleştirilir. Gaz fazında sementasyon işlemi, elik parçaların belirli bir sıcaklıkta gaz içinde ısıl işlemden geçirilmesini içerir. Bu gaz, genellikle metan, amonyak veya karbonmonoksit gibi karbon kaynakları içerir. elik parça, belirli bir sıcaklıkta bu gaz atmosferinde bekletilir ve karbon atomları elik yüzeyine difüzyon yapar. Bu süreç, elik yüzeyinde sert ve aşınmaya dayanıklı bir katman oluşturur.

Sıvı fazda sementasyon işlemi ise, elik parçaların belirli bir sıcaklıkta sıvı bir ortamda ısıl işlemden geçirilmesini içerir. Bu sıvı ortam, genellikle karbon ve/veya diğer alaşımlar içeren bir çözeltidir. elik parçalar, bu çözelti içinde belirli bir süre bekletilir ve çözelti, elik yüzeyine karbon ve diğer alaşımların difüzyonunu sağlar. Sonuç olarak, elik yüzeyinde sert ve dayanıklı bir katman oluşur.

Sementasyon işlemi, rulman yüzeylerinde aşınma direncini artırmanın yanı sıra yüzeyin yorgunluk dayanımını da artırır. Bu sayede, rulmanlar daha uzun süre dayanıklı kalır ve daha az bakım gerektirir. Ayrıca, sementasyon işlemi, rulmanların çalışma sıcaklıklarına dayanıklılığını artırır ve yüzeyin korozyon direncini artırır.

Ancak, sementasyon işlemi doğru bir şekilde uygulanmalı ve kontrol edilmelidir. Süreçteki hatalar veya dengesizlikler, istenmeyen sonuçlara ve rulmanların performansında azalmalara neden olabilir. Bu nedenle, sementasyon işlemi, uzmanlar tarafından dikkatle yönetilmelidir (Barron, 1996).

Sementasyon, rulman çeliklerinde kullanılan önemli bir ısıl işlem eşidir. Bu işlem, rulman yüzeylerinde sertlik ve aşınma direncini artırır, ömrünü uzatır ve dayanıklılığını artırır. Sementasyon işlemi, doğru bir Şekilde uygulandığında, rulmanların performansını önemli ölçüde artırabilir ve mekanik sistemlerin daha güvenilir bir Şekilde çalışmasını sağlar.

### 2.3.2.2. Normalleştirme

Normalleştirme, rulman çeliklerinde ve genel olarak metal işleme endüstrisinde kullanılan önemli bir ısıl işlem eşidir. Bu işlem, elik parçaların içyapısında düzensizlikler varsa veya belirli bir yapı elde edilmesi gerekiyorsa uygulanır. Normalleştirme işlemi, metal parçanın belirli bir sıcaklıkta ısıtılması ve ardından kontrollü bir Şekilde soğutularak gerçekleştirilir.

Normalleştirme işlemi, genellikle döküm veya haddeleme işlemlerinin ardından uygulanır. Bu işlemler sırasında, elik parçaların içyapısında farklılıklar ve düzensizlikler oluşabilir. Normalleştirme işlemi, bu içsel düzensizlikleri giderir ve istenen mekanik özelliklere sahip bir yapı elde etmek için kullanılır (Y. Guo ve ark., 2023).

Normalleme işlemi sırasında, elik parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılır. Bu sıcaklık, elik türüne ve istenen sonuca bağlı olarak değişir, ancak genellikle ısıl dönüşüm noktasının birkaç derece üzerindedir. elik parça bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir, böylece homojen bir sıcaklık dağılımını sağlanır.

Isıl işlemin ardından, elik parça kontrollü bir Şekilde soğutulur. Soğutma hızı, normalleştirme işleminin etkinliğini belirleyen önemli bir faktördür. Yavaş soğutma, elik parçanın içyapısında istenmeyen faz dönüşümlerine ve gerilmelere neden olabilir. Hızlı soğutma ise, iç gerilmeleri ve yapısal değişiklikleri minimize eder, böylece istenen sonuç elde edilir.

Normalleştirme işlemi, elik parçaların içyapısında yapısal değişiklikler yaparak istenen mekanik özellikleri elde etmeyi sağlar. Bu işlem, elik parçaların sertlik, dayanıklılık, mukavemet ve tokluk gibi özelliklerini optimize etmek için kullanılır. Normalleştirme işlemi, ayrıca elik parçaların işlenebilirliğini artırır ve son işlem süreçlerini kolaylaştırır.

Normalleme işlemi genellikle endüstride yaygın olarak kullanılan bir işlem olmasına rağmen, doğru uygulanması önemlidir. Isıl işlemin sıcaklık, süre ve soğutma hızı gibi parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Yanlış uygulamalar,

istenmeyen sonuçlara ve çelik parçaların performansında azalmalara neden olabilir. Normalleştirme, rulman çeliklerinde ve metal işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir ısıl işlem çeşididir. Bu işlem, çelik parçaların içyapısında yapısal değişiklikler yaparak istenen mekanik özellikleri elde etmek için kullanılır. Normalleme işlemi, doğru bir şekilde uygulandığında, çelik parçaların performansını artırabilir ve mekanik sistemlerin daha güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar (Leendertz ve ark., 2008).

### 2.3.2.3. Sertleştirme ve alınma

Sertleştirme ve alınma, rulman çeliklerinde yaygın olarak kullanılan iki önemli ısıl işlem çeşididir ve rulmanların istenilen mekanik özelliklere sahip olmalarını sağlamak için kritik öneme sahiptirler.

Sertleştirme işlemi, rulman çeliklerinde sıklıkla kullanılan bir ısıl işlem yöntemidir. Bu işlem, çelik parçanın içyapısında yapısal değişiklikler yaparak sertlik, dayanıklılık ve mukavemet gibi mekanik özelliklerini artırmayı amaçlar. Sertleştirme işlemi genellikle çelik parçanın belirli bir sıcaklıkta ısıtılmasıyla başlar. Bu sıcaklık, çelik türüne ve istenilen sonuca bağlı olarak değişir, ancak genellikle çelik parçanın dönüşüm sıcaklığının üzerindedir. Isıl işlem sırasında, çelik parça belirli bir süre boyunca bu sıcaklıkta bekletilir, böylece homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanır. Sertleştirme işleminin en kritik aşaması soğutma sürecidir. Isıtılmış çelik parça, hızlı bir şekilde soğutularak sertleştirme işlemi tamamlanır. Bu hızlı soğutma işlemi, çelik parçanın içyapısında martenzit veya bainit gibi sert fazların oluşmasına neden olur. Bu sert fazlar, çelik parçanın sertliğini artırırken, aynı zamanda dayanıklılığını da artırır (Joshi ve Pujari, 2023).

Sertleştirme işleminden sonra, çelik parça genellikle çok sert ve kırılgan hale gelir. Bu nedenle, sertleştirme işlemi genellikle alınma işlemiyle tamamlanır. Alınma işlemi, sertleştirme işleminden sonra uygulanan ve çelik parçanın sertliğini azaltarak mukavemet ve tokluk özelliklerini optimize etmeyi amaçlayan bir ısıl işlem sürecidir. Alınma işlemi sırasında, çelik parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve ardından kontrollü bir şekilde soğutularak gerçekleştirilir.

Alınma işlemi, çelik parçanın iç gerilimlerini giderir ve yapısında istenmeyen faz dönüşümlerini minimize eder. Böylece, çelik parça daha homojen bir yapıya sahip olur ve istenilen mekanik özelliklere sahip olur. Alınma işlemi, çelik parçanın mukavemetini artırırken, aynı zamanda tokluğunu da artırır. Bu sayede, çelik parça,

sertleştirme işleminden sonra istenen mekanik özelliklere sahip bir şekilde kullanılabilir.

Sertleştirme ve alınma işlemleri, rulman çeliklerinde sıklıkla kullanılan ve rulmanların performansını önemli ölçüde artıran kritik ısıl işlem çeşitleridir. Bu işlemler, doğru bir şekilde uygulandığında, rulmanların dayanıklılığını, mukavemetini ve ömrünü artırabilir. Ancak, işlem sırasında sıcaklık, süre ve soğutma hızı gibi parametrelerin dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Yanlış uygulamalar, istenmeyen sonuçlara ve çelik parçaların performansında azalmalara neden olabilir. Bu nedenle, sertleştirme ve alınma işlemlerinin uzmanlar tarafından dikkatle yönetilmesi ve uygulanması önemlidir (Ünal, 2009).

### **2.3.3. Isıl işlemin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri**

Isıl işlem, metal malzemelerin içyapısında ve dolayısıyla mekanik özelliklerinde değişiklikler yaparak çeşitli etkilere neden olur. Bu etkiler, malzemenin sertlik, dayanıklılık, mukavemet, tokluk, aşınma direnci ve işlenebilirlik gibi özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Isıl işlemin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri, işlem tipine, uygulanan sıcaklık ve süre gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

Öncelikle, sertleştirme işlemi malzemenin sertlik ve mukavemetini artırır. Bu işlem sırasında, metal parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve ardından hızlı bir şekilde soğutulur. Hızlı soğutma işlemi, metalin içyapısında martenzit veya bainit gibi sert fazların oluşmasına neden olur, böylece malzemenin sertliği artar. Ancak, sertleştirme işlemi genellikle malzemenin kırılabilirliğini artırır, bu nedenle temperleme gibi bir işlemle kırılabilirliğin azaltılması gerekir.

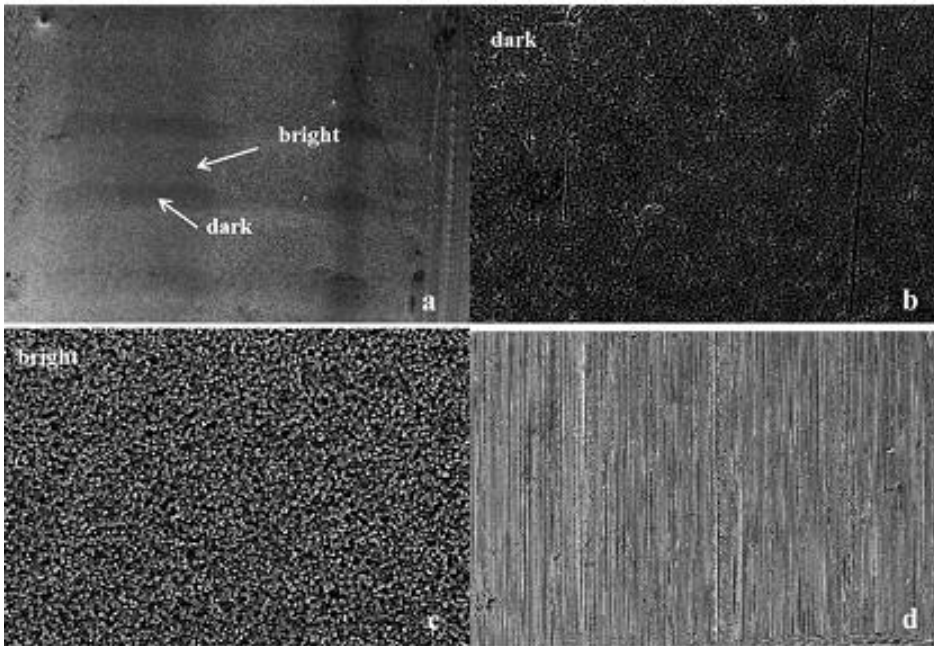
Temperleme işlemi, sertleştirme işleminden sonra uygulanır ve malzemenin iç gerilimlerini gidermek ve kırılabilirliğini azaltmak için kullanılır. Bu işlem sırasında, malzeme belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulur. Temperleme işlemi, malzemenin sertliğini azaltır, ancak dayanıklılığını ve tokluğunu artırır. Bu sayede, malzeme daha iyi bir darbe direncine sahip olur ve kırılma riski azalır.

Normalleştirme işlemi ise, içyapısında düzensizlikler bulunan veya belirli bir yapıya sahip olması gereken malzemeler için kullanılır. Bu işlem sırasında, malzeme belirli bir sıcaklıkta ısıtılır ve ardından kontrollü bir şekilde soğutulur. Normalleştirme işlemi, malzemenin içyapısındaki düzensizlikleri giderir ve daha homojen bir yapı elde

edilmesini sağlar. Bu sayede, malzemenin mekanik özellikleri optimize edilir ve istenen performans elde edilir (Poyraz ve Kuşhan, 2018).

Isıl işlem ayrıca malzemenin aşınma direncini artırabilir. Özellikle sementasyon gibi işlemler, malzemenin yüzeyine karbon ve diğer alaşımların difüzyonunu sağlar, böylece yüzeyde sert bir katman oluşur. Bu sert katman, malzemenin aşınma direncini artırır ve ömrünü uzatır.

Ancak, ısıl işlem sırasında malzemenin iç yapısında meydana gelen değişiklikler, istenmeyen sonuçlara neden olabilir. Isıl işlem sonrası (örneğin aşırı ısınma, yetersiz yağlama veya rulman akım etkisi gibi nedenlerle) rulman ve çelik malzemelerde oluşan mikro-yapısal bozukluklar, malzemenin özelliklerinde azalmalara veya hasara neden olabilir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.10) ısıl işlem sonrası malzemenin mikroyapısındaki bozukluklara örnek olarak bir görsel verilmiştir. Bu görselde siyah bölge (surface region), yüzeye yakın alt katmanda, sürekli tekrarlı kontak yükü nedeniyle microplastik deformasyon meydana geldiği vurgulanmıştır. (Dark Etching Region): Bu koyu renkli bölge, martenzitik yapının karbon kaybıyla ferrit benzeri ince yapılarla yer değiştirdiğini gösterir ve noktalı çubuk ile gösterilmiştir. Web (White Etching Bands): DER içerisinde yer alan açılı, parlak bantlar; düşük açılı ( $30^\circ$ ) ve yüksek açılı ( $80^\circ$ ) bantlar içerir. Bu bantlar, karbon göçü ve mikro bantlardaki karbon birikimi sonrasında oluşur.



**Şekil 2.10.** Isıl işlem sonrası mikroyapısal bozukluk (SKF, 2023)

Bu nedenle, ısıl işlem süreçlerinin dikkatle kontrol edilmesi ve uzmanlar tarafından dikkatle yönetilmesi önemlidir. Isıl işlem, metal malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu işlemin malzeme üzerindeki etkileri, sertlik, dayanıklılık, mukavemet, tokluk, aşınma direnci ve işlenebilirlik gibi özelliklerde değişiklikler yaparak malzemenin performansını artırır. Ancak, doğru uygulanmadığında istenmeyen sonuçlara neden olabilir, bu nedenle dikkatli bir şekilde yönetilmesi önemlidir (Gawali ve ark., 2021).

#### 2.3.3.1. Sertlik artışı

Sertlik artışı, ısıl işlemin metal malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirmek için kullanılan önemli bir sonucudur. Genellikle sertleştirme işlemi sonucunda meydana gelir ve malzemenin sertlik derecesinde belirgin bir artış sağlar. Sertlik, bir malzemenin diğer malzemelere karşı direncini ifade eder ve genellikle malzemenin yüzeyinde yapılan testlerle ölçülür. Isıl işlem sırasında sertlik artışı, metalin içyapısındaki yapısal değişiklikler nedeniyle gerçekleşir.

Sertleştirme işlemi sırasında, metal parça belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak ve ardından hızlı bir şekilde soğutularak gerçekleştirilir. Bu hızlı soğutma işlemi, metalin içyapısında martenzit veya bainit gibi sert fazların oluşmasına neden olur. Bu sert fazlar, metalin kristal yapısında düzensizliklere ve daha sıkı bir atomik düzene neden olur, bu da malzemenin sertlik derecesinde belirgin bir artışa yol açar. Sertlik artışı, metal parçanın yüzeyinde ve derinliklerinde homojen bir şekilde gerçekleşebilir. Yüzeydeki sertlik artışı, genellikle metalin işlenen kısmında daha belirgindir ve aşınma direncini artırır. Derinliklere doğru ilerledikçe, sertlik artışı genellikle daha az belirgindir, ancak yine de metalin genel mekanik özelliklerini iyileştirir. Sertlik artışının bir sonucu olarak, malzemenin dayanıklılığı ve mukavemeti artar. Bu, metal parçaların çeşitli uygulamalarda daha yoğun yükler ve zorlanmalar altında çalışabileceği anlamına gelir. Özellikle rulman gibi yüksek yükler altında çalışan bileşenlerde, sertlik artışı, parçaların ömrünü uzatır ve performansını artırır (Singh ve ark., 2000). Ancak, sertlik artışının bir dezavantajı da vardır. Metal parçanın sertliği arttıkça, genellikle kırılma riski de artar. Bu, özellikle sertleştirme işlemi sonrası yapılan parçaların kırılma riskini artırır. Bu nedenle, sertleştirme işleminden sonra genellikle alınma gibi işlemlerle kırılma riskinin azaltılması ve istenmeyen sonuçların önlenmesi gerekir. Sertlik artışı, ısıl işlemin metal malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirmek için önemli bir sonucudur. Bu artış, metal parçaların direncini, dayanıklılığını ve mukavemetini

artırırken, aynı zamanda kırılabilirlik riskini de artırabilir. Bu nedenle, sertleştirme işlemi dikkatle planlanmalı ve uygulanmalıdır, böylece istenmeyen sonuçlar önlenir ve malzemenin performansı optimize edilir (Liu ve ark., 2018).

### 2.3.3.2. Dayanıklılık ve tokluk

Dayanıklılık ve tokluk, metal malzemelerin mekanik özellikleri arasında önemli bir yer tutar ve ısıl işlemlerin sonucunda etkilenebilir. Bu özellikler, malzemenin çeşitli koşullar altında nasıl davrandığını ve dayanıklılığını belirler.

Dayanıklılık, bir malzemenin belirli koşullar altında uzun süre dayanabilme yeteneğidir. Isıl işlem, malzemenin dayanıklılığını artırabilir veya azaltabilir. Özellikle sertleştirme işlemi, malzemenin dayanıklılığını artırabilir çünkü sert fazların oluşması, malzemenin yüzeyinin daha dirençli hale gelmesine ve aşınma direncinin artmasına yardımcı olur. Bu durum, özellikle yüksek yükler altında çalışan parçalarda önemlidir, çünkü dayanıklılık, parçaların ömrünü uzatır ve performansını artırır.

Tokluk, bir malzemenin darbe veya yük altında deformasyona karşı ne kadar dirençli olduğunu belirler. Sertleştirme işlemi genellikle malzemenin sertliğini artırırken tokluğunu azaltabilir. Ancak, temperleme gibi işlemlerle malzemenin tokluğu artırılabilir. Temperleme işlemi, malzemenin iç gerilimlerini giderir ve sertliğini azaltırken, aynı zamanda tokluğunu artırır. Bu, metal parçaların darbe veya yük altında daha fazla deformasyona dayanmasına yardımcı olur (Bektaş, 2020).

Dayanıklılık ve tokluk, genellikle birbirleriyle dengelenen özelliklerdir. Yani, malzemenin dayanıklılığı arttıkça genellikle tokluğu azalır ve tam tersi. Bu nedenle, ısıl işlem süreçlerinin doğru bir şekilde planlanması ve uygulanması önemlidir. Malzeme, belirli bir uygulama için en uygun mekanik özelliklere sahip olmalıdır.

Isıl işlem sırasında, malzemenin iç yapısındaki yapısal değişiklikler dayanıklılık ve tokluk gibi özellikleri etkiler. Bu değişiklikler, martenzit veya bainit gibi sert fazların oluşması, metalin kristal yapısında düzensizliklerin artması veya iç gerilimlerin giderilmesi gibi süreçleri içerebilir. Bu nedenle, ısıl işlemin sıcaklık, süre ve soğutma hızı gibi parametreleri dikkatle kontrol edilmelidir. Dayanıklılık ve tokluk, metal malzemelerin önemli mekanik özellikleridir ve ısıl işlem sonucunda etkilenebilirler. Sertleştirme işlemi genellikle malzemenin dayanıklılığını artırırken tokluğunu azaltırken, temperleme işlemi tokluğu artırırken dayanıklılığı azaltabilir. Isıl işlem süreçleri, malzemenin belirli bir uygulama için en uygun mekanik özelliklere sahip

olmasını sağlamak için dikkatle yönetilmelidir. Bu, parçaların performansını optimize eder ve istenmeyen sonuçların önlenmesine yardımcı olur (Denli, 2007).

#### **2.4. Kestirimci Bakım Yaklaşımları**

Kestirimci bakım (KB), endüstriyel takımların sürekli olarak izlenmesi, analiz edilmesi ve bakımın zamanında ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Geleneksel bakım yöntemlerinin aksine, KB, ekipman arızalarının belirlenmesi ve önlenmesi için veri odaklı ve öngörücü bir yaklaşım benimser.

KB yaklaşımı, takımların çalışma koşullarını ve performansını sürekli olarak izleyen ve analiz eden bir dizi teknik ve metodolojiyi içerir. Bu teknikler arasında titreşim analizi, termografik görüntüleme, yağ analizi, akustik emisyon testi, ve veri toplama ve analizi gibi yöntemler bulunur. Bu teknikler sayesinde ekipmanın çalışma durumu sürekli olarak değerlendirilir ve potansiyel arıza belirtileri erken tespit edilir. Örnek verilecek olursa T. Deniz and M. Danışmaz yapmış oldukları çalışmada "Rulmanlarda ısıtım işlem ve kestirimci bakım incelemesi,2024" hava araçlarında kullanılan farklı iki tip rulmana ısıtım işlem uygulayıp titreşim,basınç,sıcaklık,tork gibi parametrelerden test verileri alıp ısıtım işleminin rulmanın ömrüne etkisini incelemişlerdir.Diğer bir örnekte Z. Ö. Günindi, A. O. Kurban and M. Danışmaz yapmış oldukları çalışmada "Soğutma fanının kestirimci bakım yöntemi uygulaması ile titreşim analizi ve yapısal esneklik arızasının giderilmesi," fanın rulman bölgelerinden 3 eksende titreşim ölçümleri almışlar (X, Y, Z),daha sonra Zaman, hız, ivme ve zarf spektrumları analiz edip spektrum analizleri sayesinde arızanın yeri ve tipi tespit etmişlerdir.

Kestirimci bakımın temel amacı, mekanizma arızalarının önlenmesi ve bakımın daha planlı ve etkin bir şekilde yapılmasıdır. Bunun için, ekipmanın çalışma verileri ve performansı sürekli olarak izlenir ve analiz edilir. Bu verilerin doğru bir şekilde yorumlanmasıyla, potansiyel arıza nedenleri belirlenir ve önleyici bakım faaliyetleri planlanır (Ünaldi, 2019).

Kestirimci bakım yaklaşımının avantajlarından biri, takım arızalarının önceden tahmin edilerek planlı bakım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanınmasıdır. Bu, beklenmeyen duruş sürelerinin azaltılmasına ve üretkenlikte artışa yol açar. Ayrıca, önleyici bakımın gereksiz maliyetlerini azaltır ve bakım faaliyetlerinin daha verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. KB yaklaşımı, endüstriyel tesislerde giderek daha yaygın bir şekilde benimsenmektedir çünkü bu yöntem, takımların ömrünü uzatırken bakım

maliyetlerini düşürür ve operasyonel güvenilirliği artırır. Ayrıca, KB, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi modern endüstriyel zorluklara da cevap vermektedir. Ancak, KB yaklaşımının etkili bir şekilde uygulanabilmesi için doğru ekipman izleme sistemlerinin kurulması ve uygun analiz ve yorumlama becerilerine sahip personelin eğitilmesi önemlidir. Ayrıca, KB uygulamalarının sürekli olarak gözden geçirilmesi ve iyileştirilmesi gerekmektedir, çünkü endüstriyel takımlar ve işletme koşulları sürekli olarak değişmektedir.

#### **2.4.1. Kestirimci bakımın temel ilkeleri**

Kestirimci bakımın temel ilkeleri, endüstriyel ekipmanların güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için kullanılan bir dizi prensibi içerir. Bu ilkeler, ekipman arızalarının önlenmesi, bakım sürelerinin optimize edilmesi ve operasyonel maliyetlerin azaltılmasını sağlar.

Kestirimci bakım, veri odaklı bir yaklaşım benimser. Bu, ekipmanın çalışma verilerinin sürekli olarak izlenmesi, toplanması ve analiz edilmesini gerektirir. Titreşim analizi, termografik görüntüleme, yağ analizi gibi farklı tekniklerle elde edilen veriler, ekipmanın sağlık durumu hakkında bilgi sağlar ve potansiyel arıza belirtilerini erken tespit etmeye yardımcı olur (Olarde ve Botero, 2011).

Öngörücü Bakım: Kestirimci bakım, öngörücü bir yaklaşımı benimser. Bu, ekipman arızalarının önceden tahmin edilmesini ve önleyici bakım faaliyetlerinin zamanında gerçekleştirilmesini sağlar. Veri analizi ve trendlerin izlenmesiyle, ekipmanın gelecekteki performansı hakkında tahminler yapılabilir ve önleyici önlemler alınabilir.

Kestirimci bakım, ekipmanın durumuna dayalı olarak bakım faaliyetlerinin planlanmasını sağlar. Bu, ekipmanın gerçek zamanlı çalışma verilerine dayanarak, bakım ihtiyacının ne zaman ortaya çıkabileceğini belirlemeyi ve bakımın buna göre planlanmasını içerir. Bu sayede, gereksiz bakım faaliyetlerinden kaçınılır ve bakım süreleri optimize edilir.

Kestirimci bakım, risk odaklı bir yaklaşımı benimser. Bu, ekipman arızalarının olası etkilerini ve risklerini değerlendirir ve önleyici önlemlerin bu riskleri azaltmak için alınmasını sağlar. Özellikle kritik takımlar için risk analizi yapılır ve bu ekipmanların bakımı öncelikli olarak ele alınır (Denli, 2007).

Kestirimci bakım sürekli bir iyileştirme sürecini içerir. Bu, bakım süreçlerinin ve yöntemlerinin sürekli olarak gözden geçirilmesini, analiz edilmesini ve iyileştirilmesini

gerektirir. Geri bildirim mekanizmaları ve performans ölçütleri kullanılarak, kestirimci bakım programları sürekli olarak optimize edilir ve geliştirilir.

Kestirimci bakım, proaktif bir yaklaşımı benimser. Bu, ekipman arızalarını sadece meydana geldikten sonra değil, önceden tahmin ederek ve önleyici önlemler olarak ele almayı içerir. Bu şekilde, beklenmedik duruş sürelerinin önlenmesi ve işletmenin kesintisiz bir şekilde çalışması sağlanır (Hancı, 2009).

Kestirimci bakım programlarının başarılı olması için işbirliği ve iletişim önemlidir. Bu, bakım ekibi, operasyon ekibi ve yönetim arasında etkili bir işbirliği ve iletişimin kurulmasını içerir. Bilgi paylaşımı ve düzenli toplantılar gibi yöntemler, ekipmanın sağlık durumu hakkında doğru bilgilerin aktarılmasını sağlar ve bakım faaliyetlerinin koordinasyonunu kolaylaştırır.

Kestirimci bakımın etkili bir şekilde uygulanabilmesi için personelin uygun eğitim ve yetkinliklere sahip olması gerekir. Bu, bakım ekibinin teknik becerilerinin ve analiz yeteneklerinin geliştirilmesini içerir. Ayrıca, yeni teknolojiler ve yöntemler hakkında düzenli olarak eğitimlerin düzenlenmesi önemlidir.

Kestirimci bakım süreçlerinde kullanılan verilerin güvenliği ve gizliliği önemlidir. Özellikle endüstriyel tesislerde, ekipmanın sağlık durumu hakkında hassas bilgilerin korunması önemlidir. Veri güvenliği önlemleri, yetkisiz erişimi önlemek ve veri sızıntısını önlemek için alınmalıdır.

Kestirimci bakım programlarının başarılı olması için yönetim desteği kritiktir. Bu, bakım programlarının finansal ve insan kaynağı açısından desteklenmesini içerir. Ayrıca, yönetimin bakım ekibine gereken kaynakları sağlaması ve bakım süreçlerinin sürekli olarak iyileştirilmesini teşvik etmesi önemlidir.

Bu temel ilkeler, kestirimci bakımın etkili bir şekilde uygulanması için kılavuz sağlar ve endüstriyel tesislerde ekipmanın güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için önemli bir çerçeve oluşturur. Bu ilkelerin doğru bir şekilde uygulanması, operasyonel maliyetlerin azaltılmasına, işletme sürekliliğinin sağlanmasına ve rekabetçi avantajın artırılmasına katkıda bulunur (Mohanty, 2014).

#### **2.4.2. Rulmanlarda kestirimci bakım uygulamaları**

Rulmanlarda kestirimci bakım uygulamaları, endüstriyel tesislerde kritik öneme sahip olan rulmanların sağlık durumunun izlenmesi ve değerlendirilmesi için kullanılan teknik ve metotları içerir. Rulmanlar, makinelerin doğru şekilde çalışmasını ve parçaların düzgün bir şekilde hareket etmesini sağlayan önemli bileşenlerdir.

Dolayısıyla, rulman arızaları, üretim süreçlerinde ciddi duruş sürelerine ve maliyetlere yol açabilir. Kestirimci bakım diğer bakım yöntemlerine göre rulmanların arızalarını önceden tespit etmeyi ve önleyici önlemler almayı amaçlar, böylece işletmenin sürekliliğini sağlar ve maliyetleri azaltır (Mushiri ve Mbohwa, 2015).

Rulmanlarda kestirimci bakım uygulamaları arasında titreşim analizi, yağ analizi, termografik görüntüleme, akustik emisyon testi ve manyetik parçacık muayenesi gibi çeşitli teknikler bulunur. Bu teknikler, rulmanların sağlık durumunu belirlemek için farklı yöntemler kullanır ve olası arıza belirtilerini erken tespit etmeye yardımcı olur. Örneğin, titreşim analizi, rulmanların titreşim örüntülerini izleyerek içyapısındaki hasarları ve düzensizlikleri belirler. Yağ analizi, rulmanın yağında bulunan partiküllerin ve kimyasal bileşenlerin analiz edilmesiyle rulmanın aşınma ve korozyon durumunu değerlendirir. Termografik görüntüleme, rulmanın ısınma durumunu izleyerek aşırı sürtünme veya yağlama sorunlarını belirler. Akustik emisyon testi, rulmanın iç yapısındaki çatlakları veya hasarları belirlemek için ses dalgalarını kullanır. Manyetik parçacık muayenesi ise, rulmanın yüzeyindeki çatlakları veya kusurları tespit etmek için manyetik alanı kullanır. Bu kestirimci bakım teknikleri, rulman arızalarının erken tespitini sağlayarak beklenmedik duruş sürelerinin önlenmesine ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olur. Ayrıca, bu teknikler, rulmanların çalışma koşullarının izlenmesi ve performanslarının değerlendirilmesi için veri sağlar. Bu verilerin doğru bir şekilde analiz edilmesiyle, rulmanların ömrü ve verimliliği artırılabilir.

Rulmanlarda kestirimci bakım uygulamaları, endüstriyel tesislerin verimliliğini artırmak ve işletme maliyetlerini düşürmek için önemlidir. Doğru kestirimci bakım programlarıyla, rulman arızalarının önlenmesi ve bakım faaliyetlerinin daha verimli bir şekilde yönetilmesi sağlanır. Ancak, başarılı bir kestirimci bakım programının uygulanması, uygun ekipman ve uzman personelin yanı sıra güçlü bir veri yönetimi altyapısı ve sürekli iyileştirme sürecini içerir (Denli, 2007).

#### 2.4.2.1. Durum izleme

Durum izleme, kestirimci bakımın temel bir bileşenidir ve endüstriyel tesislerde rulmanlar gibi kritik ekipmanların sağlık durumunun sürekli olarak izlenmesini sağlar. Bu yaklaşım, rulmanların çalışma koşullarını gerçek zamanlı olarak izleyerek, potansiyel arıza belirtilerini erken tespit etmeyi ve önleyici bakım faaliyetlerinin zamanında gerçekleştirilmesini amaçlar (Köse, 2004).

Durum izleme, çeşitli teknikler ve cihazlar kullanılarak gerçekleştirilir. Bunlar arasında titreşim analizi, termografik görüntüleme, manyetik parçacık muayenesi, yağ analizi ve akustik emisyon testi gibi yöntemler bulunur. Titreşim analizi, rulmanların titreşim örüntülerini izleyerek içyapılarındaki hasarları ve düzensizlikleri belirler. Termografik görüntüleme, rulmanın ısınma durumunu görsel olarak izleyerek aşırı sürtünme veya yağlama sorunlarını tespit eder. Manyetik parçacık muayenesi, rulmanın yüzeyindeki çatlakları veya kusurları tespit etmek için manyetik alanı kullanır. Yağ analizi, rulmanın yağında bulunan partiküllerin ve kimyasal bileşenlerin analiz edilmesiyle aşınma ve korozyon durumunu değerlendirir. Akustik emisyon testi, rulmanın iç yapısındaki çatlakları veya hasarları belirlemek için ses dalgalarını kullanır.

Bu yöntemler, rulmanların sağlık durumunu belirlemek için kullanılan güçlü araçlardır ve işletmelerin sürekliliğini sağlamak için önemlidir. Erken arıza belirtilerinin tespit edilmesi, beklenmedik duruş sürelerinin önlenmesine ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olur. Ayrıca, durum izleme, rulmanların çalışma verilerini toplar ve analiz ederek, bakım stratejilerinin sürekli olarak iyileştirilmesine ve optimize edilmesine olanak tanır (Bircan, 2011). Ancak, durum izleme sistemlerinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için doğru ekipmanın seçilmesi, uygun sensörlerin kurulması ve veri yönetiminin doğru bir şekilde yapılması önemlidir. Ayrıca, personelin uygun eğitim alması ve sistemlerin düzenli olarak bakımının yapılması da kritiktir. Durum izleme, kestirimci bakım programlarının vazgeçilmez bir parçasıdır ve endüstriyel tesislerin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için önemlidir.

#### 2.4.2.2. Titreşim analizi

Titreşim analizi, endüstriyel ekipmanlarda, özellikle rulmanlar gibi döner parçalarda oluşan titreşimlerin izlenmesi ve analiz edilmesi için kullanılan önemli bir kestirimci bakım tekniğidir. Rulmanlar gibi döner parçaların titreşimleri, içyapılarında meydana gelen hasarları, düzensizlikleri veya diğer problemleri belirlemede önemli bir göstergedir. Bu nedenle, titreşim analizi, rulmanların sağlık durumunun belirlenmesi ve arıza belirtilerinin erken tespiti için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Titreşim analizi, rulmanın dönme hareketi sırasında ürettiği titreşimleri ölçmek ve analiz etmek için çeşitli sensörler ve takımlar kullanır. Genellikle, ivmeölçerler, hızölçerler veya manyetik titreşim sensörleri gibi özel cihazlar kullanılarak titreşim verileri toplanır. Bu sensörler, rulman üzerindeki titreşim seviyelerini ölçer ve bu veriler daha sonra analiz edilir.

Analiz süreci, toplanan titreşim verilerinin incelenmesi ve yorumlanmasını içerir. Bu, titreşim spektrumu analizi, zaman etki spektrumu analizi, frekans etki spektrumu analizi ve zaman-frekans analizi gibi çeşitli tekniklerle gerçekleştirilir. Titreşim spektrumu analizi, titreşim sinyalinin frekans bileşenlerini belirler ve potansiyel arıza belirtilerini tanımlamak için kullanılır. Zaman etki spektrumu analizi, titreşim sinyalinin zaman içindeki değişimini izler ve sürekli olarak değişen titreşim desenlerini belirler. Frekans etki spektrumu analizi, titreşim sinyalinin frekans bileşenlerinin zamana nasıl değiştiğini analiz eder. Zaman-frekans analizi, titreşim sinyalinin hem zaman hem de frekans domainlerinde nasıl davrandığını değerlendirir (Shamsuzzaman ve ark., 2023).

Titreşim analizi, rulmanların içyapılarındaki çatlaklar, aşınma, yuvarlanma yolu hasarı, kafes hasarı ve diğer kusurlar gibi potansiyel arızaları belirlemek için etkili bir araçtır. Erken arıza belirtilerinin tespit edilmesi, beklenmedik duruş sürelerinin önlenmesine ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olur. Ayrıca, titreşim analizi, rulmanların çalışma koşullarını sürekli olarak izleyerek bakım stratejilerinin sürekli olarak iyileştirilmesine ve optimize edilmesine olanak tanır. Ancak, titreşim analizi sürecinin etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için doğru ekipmanın seçilmesi, uygun sensörlerin kullanılması ve veri yönetiminin doğru bir şekilde yapılması önemlidir. Ayrıca, analiz sürecinin uzman personel tarafından yürütülmesi ve sonuçların doğru bir şekilde yorumlanması da kritiktir. Titreşim analizi, kestirimci bakım programlarının vazgeçilmez bir parçasıdır ve endüstriyel tesislerin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için önemlidir.

#### 2.4.2.3. Sıcaklık takibi

Sıcaklık takibi, endüstriyel takımların sağlık durumunun izlenmesinde ve kestirimci bakımın bir parçası olarak kullanılan önemli bir tekniktir. Rulmanlar gibi kritik parçaların çalışma sıcaklıklarının sürekli olarak izlenmesi, potansiyel arıza belirtilerinin erken tespit edilmesine ve önleyici bakım faaliyetlerinin zamanında gerçekleştirilmesine olanak tanır.

Rulmanların çalışma sıcaklıkları, genellikle termal sensörler veya termometreler gibi özel ekipmanlar kullanılarak izlenir. Bu sensörler, rulmanların üzerinde veya çevresinde yerleştirilir ve çalışma sıcaklıklarını sürekli olarak ölçer. Elde edilen veriler, otomasyon sistemleri veya izleme yazılımları aracılığıyla toplanır ve analiz edilir.

Sıcaklık takibi, rulmanların aşırı ısınma veya soğuma gibi anormalliklerin belirlenmesine yardımcı olur. Rulmanların normal çalışma sıcaklıklarından sapmalar, genellikle içyapısındaki hasarlar, yetersiz yağlama veya aşınma gibi sorunların bir göstergesi olabilir. Örneğin, aşırı ısınma, yağlama problemleri veya sürtünme sorunlarına işaret edebilirken, aşırı soğuma, yağ seviyesinin düşük olması veya dış etkenlerden kaynaklanan sorunları belirtebilir (Sturm ve Förster, 2013).

Sıcaklık takibi, rulman arızalarının erken tespiti ve önleyici bakım faaliyetlerinin zamanında gerçekleştirilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Erken arıza belirtilerinin tespit edilmesi, beklenmedik duruş sürelerinin önlenmesine ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olur. Ayrıca, sıcaklık verilerinin sürekli olarak izlenmesi, rulmanların sağlık durumu hakkında değerli bilgiler sağlar ve bakım stratejilerinin sürekli olarak iyileştirilmesine olanak tanır. Ancak, sıcaklık takibi sürecinin etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için doğru ekipmanın seçilmesi, uygun sensörlerin kullanılması ve veri yönetiminin doğru bir şekilde yapılması önemlidir. Ayrıca, sıcaklık verilerinin düzenli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi, uzman personel tarafından yapılmalı ve sonuçların doğru bir şekilde yorumlanması sağlanmalıdır. Sıcaklık takibi, kestirimci bakım programlarının vazgeçilmez bir parçasıdır ve endüstriyel tesislerin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için önemlidir.

### **2.4.3. Kestirimci bakım teknolojileri ve yöntemleri**

Kestirimci bakım, endüstriyel tesislerde kullanılan araç gereçlerin sağlık durumunu izleyen ve arızaları önceden tahmin eden bir yaklaşımı ifade eder. Bu yaklaşım, beklenmedik duruş sürelerini azaltarak üretkenliği artırır ve bakım maliyetlerini düşürür. Kestirimci bakımın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için çeşitli teknolojiler ve yöntemler kullanılır (Nishonov ve Saloxiddinov, 2023). Bunlardan biri, durum izleme teknolojisidir. Bu teknoloji, ekipmanların çalışma verilerini sürekli olarak izleyen ve analiz eden sensörler ve sistemler kullanır. Örneğin, titreşim sensörleri, sıcaklık sensörleri, akustik sensörler ve manyetik parçacık muayene cihazları gibi çeşitli sensörler, ekipmanların sağlık durumunu izlemek için kullanılır. Elde edilen veriler, otomasyon sistemleri veya bulut tabanlı yazılımlar aracılığıyla toplanır, analiz edilir ve değerlendirilir. Bu sayede, ekipman arızaları önceden tahmin edilebilir ve önleyici bakım faaliyetleri zamanında gerçekleştirilebilir (Muminjonovich, 2023). Bir diğer kestirimci bakım yöntemi, yağ analizidir. Bu yöntem, mekanizmaların yağ örneklerinin laboratuvar ortamında analiz edilmesini içerir. Yağ analizi, yağın kimyasal

ve fiziksel özelliklerini değerlendirir ve içerisinde bulunan partikül miktarını ölçer. Bu, yağlama sistemlerindeki aşınma, korozyon ve diğer sorunların belirlenmesine yardımcı olur. Ekipmanların yağ analizi sonuçları, arızaların önceden tahmin edilmesi ve önleyici bakım faaliyetlerinin planlanması için önemli bir veri kaynağıdır.

Termografik görüntüleme, bir başka kestirimci bakım tekniğidir. Bu teknik, termal kameralar veya termal sensörler kullanılarak ekipmanların yüzey sıcaklıklarının görüntülenmesini içerir. Anormal sıcaklık değişimleri, potansiyel arızaların belirlenmesine ve önleyici bakım faaliyetlerinin zamanında gerçekleştirilmesine olanak tanır. Ayrıca, veri analitiği ve yapay zekâ gibi gelişmiş teknolojiler de kestirimci bakımın önemli bir parçası haline gelmektedir. Bu teknolojiler, büyük veri kümelerini analiz ederek ekipman arızalarını tahmin eder ve bakım stratejilerinin optimize edilmesine yardımcı olur.

Kestirimci bakım teknolojileri ve yöntemleri, endüstriyel tesislerde ekipmanların güvenilirliğini artırırken işletme maliyetlerini düşürmeye yardımcı olur. Bu teknolojilerin doğru bir şekilde uygulanması ve entegrasyonu, işletmelerin rekabet avantajını artırırken, operasyonel verimliliği de artırır (Denli, 2007).

#### 2.4.3.1. Sensör teknolojileri

Sensör teknolojileri, kestirimci bakımın önemli bir bileşenidir ve endüstriyel tesislerde ekipmanların sağlık durumunu izlemek için kritik bir rol oynar. Bu teknolojiler, çeşitli fiziksel değişkenleri ölçmek ve izlemek için kullanılan cihazlar ve sistemlerdir. Rulmanlar gibi kritik bileşenlerin çalışma koşullarını sürekli olarak izlemek, erken arıza belirtilerini tespit etmek ve önleyici bakım faaliyetlerini yönlendirmek için sensörler kullanılır.

Sensör teknolojileri, endüstriyel tesislerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Titreşim sensörleri, mekanizmaların titreşim seviyelerini ölçerek içyapıdaki hasarları belirler. Termal sensörler, ekipmanların yüzey sıcaklıklarını izleyerek aşırı ısınma veya soğuma gibi anormallikleri belirler. Akustik sensörler, ekipmanların işleyişindeki ses desenlerini analiz ederek içyapısındaki sorunları tanımlar. Manyetik parçacık muayene cihazları, ekipmanın metal yüzeylerindeki çatlakları veya kusurları tespit eder.

Bu sensörler, ekipmanın sağlık durumu hakkında gerçek zamanlı veri sağlar ve işletmelere arıza belirtilerini erken tespit etme ve önleyici bakım faaliyetlerini zamanında gerçekleştirme fırsatı sunar. Örneğin, titreşim sensörleri, rulmanlardaki düzensiz titreşim desenlerini izleyerek içyapısındaki aşınma veya hasarları belirler.

Termal sensörler, ekipmanın yüzey sıcaklıklarını ölçerek yağlama sorunları veya sürtünme sorunları gibi problemleri tespit eder (Kotowski ve Lindstedt, 2002).

Gelişen sensör teknolojileri, daha küçük boyutlarda, daha hassas ölçümler yapabilen ve daha uzun süre dayanabilen sensörlerin geliştirilmesine olanak tanır. Ayrıca, kablosuz sensörler ve bulut tabanlı veri analizi sistemleri gibi yenilikçi yaklaşımlar, veri toplama ve analiz süreçlerini daha etkili hale getirir. Ancak, sensör teknolojilerinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için doğru sensörlerin seçilmesi, uygun konumlandırılması ve veri yönetiminin doğru bir şekilde yapılması önemlidir. Ayrıca, sensör verilerinin düzenli olarak izlenmesi, analiz edilmesi ve yorumlanması, uzman personel tarafından yapılmalıdır. Bu sayede, sensör teknolojileri, endüstriyel tesislerin güvenilirliğini artırırken işletme maliyetlerini düşürmeye ve verimliliği artırmaya yardımcı olur (Koçak ve İşçioğlu, 2018).

#### 2.4.3.2. Veri analitikleri

Veri analitiği, endüstriyel tesislerde kestirimci bakımın önemli bir bileşenidir ve ekipmanların sağlık durumunu izlemek ve arızaları önceden tahmin etmek için kritik bir rol oynar. Bu teknoloji, büyük miktarda veriyi toplar, analiz eder ve bu verilerden anlamlı bilgiler çıkarır. Ekipmanın performansı ile ilgili verilerin doğru bir şekilde analiz edilmesi, arızaların erken tespit edilmesini ve önleyici bakım faaliyetlerinin planlanmasını sağlar.

Veri analitiği, genellikle makine öğrenimi ve yapay zekâ gibi gelişmiş tekniklerle birleştirilir. Makine öğrenimi algoritmaları, büyük veri kümelerini analiz ederek ekipman arızalarının belirtilerini tanımlar ve gelecekteki arızaları tahmin eder. Bu algoritmalar, veriler arasındaki ilişkileri belirler ve kritik durumlarda alarmlar veya uyarılar oluşturur.

Yapay zekâ ise, veri analitiği sürecinde insan müdahalesini en aza indirir ve otomatik kararlar alarak süreci optimize eder. Yapay zekâ tabanlı sistemler, ekipmanın çalışma verilerini gerçek zamanlı olarak izler, analiz eder ve hızlı bir şekilde yanıt verir. Bu sistemler, karmaşık veri modellerini analiz ederek anormal davranışları belirler ve bakım ekiplerine rehberlik eder.

Veri analitiği, endüstriyel tesislerdeki veri kaynaklarından gelen bilgileri entegre eder. Bu veri kaynakları, sensörlerden gelen gerçek zamanlı verileri, bakım kayıtlarını, ekipman belgelerini ve diğer operasyonel verileri içerebilir. Tüm bu verilerin bir araya getirilmesi ve analiz edilmesi, ekipmanın sağlık durumunu ve işletmenin genel

performansını anlamak için kritik öneme sahiptir (Çolak ve ark., 2017). Veri analitiği, endüstriyel tesislerde takım arızalarını önlemek ve verimliliği artırmak için kullanılan güçlü bir araçtır. Doğru uygulandığında, bu teknoloji, işletmelerin sürekliliğini sağlar, beklenmedik duruş sürelerini azaltır ve bakım maliyetlerini düşürür. Ancak, veri analitiğinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için doğru veri kaynaklarının entegrasyonu, uygun algoritmaların seçimi ve veri yönetiminin doğru bir şekilde yapılması önemlidir. Ayrıca, analiz sonuçlarının doğru bir şekilde yorumlanması ve bu bilgilerin bakım stratejilerinin geliştirilmesinde kullanılması da kritiktir.

## 2.5. Isıl İşlem ve Rulman Ömrü Üzerine Etkileri

Isıl işlem, rulmanların mekanik özelliklerini değiştirerek performanslarını ve ömrünü etkileyen önemli bir süreçtir. Doğru bir şekilde uygulandığında, ısıl işlem rulmanların dayanıklılığını artırabilir, yorulma ömrünü uzatabilir ve çalışma performansını iyileştirebilir. Ancak, yanlış uygulandığında veya gerektiği gibi kontrol edilmediğinde, ısıl işlem rulmanlarda istenmeyen sonuçlara yol açabilir ve ömrünü kısaltabilir.

İlk olarak, ısıl işlemin rulmanlar üzerindeki etkilerini anlamak için işlemin farklı tiplerini göz önünde bulundurmak önemlidir. Sementasyon, normalleştirme, sertleştirme ve alınma gibi yaygın ısıl işlem teknikleri, rulmanların yapısal özelliklerini değiştirmek için kullanılır. Sementasyon, yüzey sertleştirme işlemidir ve rulmanların aşınma direncini artırırken çekirdek kısmın esnekliğini korur. Normalleştirme, rulmanın iç yapısındaki gerilmeleri azaltır ve homojen bir mikro yapı oluşturur. Sertleştirme, rulmanın yüzeyini sertleştirir ve aşınmaya karşı dayanıklılığını artırır. Alınma işlemi ise, sertleştirmenin aksine iç gerilmeleri azaltır ve rulmanın dış yüzeyindeki gerilmeleri giderir.

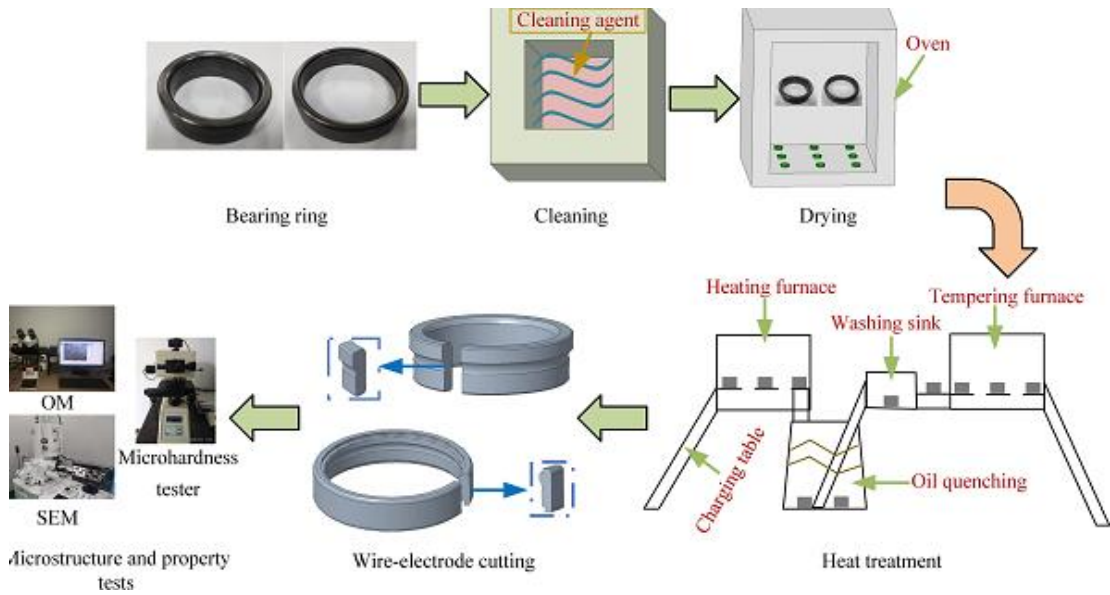
Bu işlemler, rulmanların malzeme özelliklerini değiştirerek performanslarını etkiler. Örneğin, sertleştirme işlemi, rulmanın yüzey sertliğini artırarak aşınma direncini artırırken, alınma işlemi rulmanın iç gerilmelerini azaltarak kırılma dayanımını artırabilir. Ancak, işlem sırasında kontrol edilmeyen faktörler veya yanlış uygulamalar sonucunda, istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Örneğin, aşırı sertleştirme veya alınma işlemi, rulmanın çekirdek kısmında istenmeyen gerilmelerin birikmesine ve kırılma riskinin artmasına neden olabilir (Lee, 1995).

Isıl işlem ayrıca, rulmanların yüzey kalitesini, geometrisini ve boyutsal stabilitesini de etkileyebilir. Yanlış uygulandığında veya kontrol edilmediğinde, işlem

sırasında oluşan termal deformasyonlar veya çekme gerilmeleri, rulmanların geometrisini etkileyebilir ve sonuç olarak çalışma performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Isıl işlem rulmanların performansını ve ömrünü önemli ölçüde etkileyebilir. Doğru şekilde uygulandığında, işlem rulmanların dayanıklılığını artırabilir ve işletme maliyetlerini düşürebilir. Ancak, yanlış uygulandığında veya gerektiği gibi kontrol edilmediğinde, istenmeyen sonuçlara yol açabilir ve rulmanların ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle, ısıl işlem sürecinin doğru bir şekilde yönetilmesi ve kontrol edilmesi önemlidir, bu da rulmanların güvenilirliğini ve performansını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

### 2.5.1. Isıl işlemin rulman ömrüne etkilerinin literatürdeki örnekleri

Isıl işlemin rulman ömrüne olan etkilerini anlamak için literatürde birçok örnek bulunmaktadır. Bu örnekler, farklı ısıl işlem tekniklerinin ve parametrelerinin rulmanların performansı üzerindeki etkilerini araştıran çeşitli çalışmalardan gelmektedir. Aşağıdaki görselde (Şekil 2.11) rulman halkalarının ısıl işlem sürecini ve bu işlemden sonra yapılan mikro yapı ve sertlik testlerini adım adım göstermektedir.



**Şekil 2.11.** T700 ısıl işlem süreci

Örneğin, bir çalışmada, sementasyon işlemiyle işlenen rulmanların aşınma direnci üzerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, sementasyon işlemi uygulanan rulmanların aşınma direncinin arttığı ve işlem görmemiş rulmanlara kıyasla daha uzun bir ömre sahip olduğu bulunmuştur. Sementasyon işlemi, yüzeyin karbon içeriğini

artırarak sertleştirir ve böylece aşınma direncini artırır. Bu sonuçlar, ısıl işlemin rulmanların ömrünü artırabileceğine dair güçlü bir kanıt sunmaktadır (Kaya, 1992).

Başka bir çalışmada, normalleştirme işleminin rulmanların yorulma ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Normalleştirme işlemi, rulmanın iç gerilimlerini azaltır ve homojen bir mikro yapı oluşturur. Bu çalışmada elde edilen bulgular, normalleştirme işlemi uygulanan rulmanların daha uzun bir yorulma ömrüne sahip olduğunu göstermektedir. Daha düşük iç gerilimler, rulmanın aşınma ve yorulma süreçlerine daha dayanıklı olmasını sağlar. Diğer bir çalışmada, sertleştirme işleminin rulmanların çalışma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sertleştirme işlemi, rulmanın yüzey sertliğini artırarak aşınma direncini artırır. Bu çalışmada yapılan testler, sertleştirme işlemi uygulanan rulmanların aşınma ve korozyon direncinin arttığını ve daha uzun bir çalışma ömrüne sahip olduğunu göstermektedir. Bu örnekler, ısıl işlemin rulmanların ömrü üzerindeki etkilerini araştıran literatürdeki çalışmaların sadece birkaçını temsil etmektedir. Genel olarak, literatürde bulunan birçok çalışma, doğru şekilde uygulandığında ısıl işlemin rulmanların ömrünü artırabileceğini ve performansını iyileştirebileceğini göstermektedir. Ancak, işlemin yanlış uygulanması veya gerektiği gibi kontrol edilmemesi, istenmeyen sonuçlara yol açabilir ve rulmanların ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle, ısıl işlemin dikkatli bir şekilde yönetilmesi ve kontrol edilmesi önemlidir, bu da rulmanların güvenilirliğini ve performansını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Trzeszczyński ve Murzynowski, 2019).

### **2.5.2. İşlem sıcaklığı ve süresinin optimizasyonu**

İşlem sıcaklığı ve süresinin optimizasyonu, ısıl işlemin etkinliğini ve rulman performansını belirleyen önemli faktörlerdir. Doğru sıcaklık ve süre parametrelerinin seçilmesi, rulmanların istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar ve işlem sonrası olumsuz sonuçların önlenmesine yardımcı olur.

Öncelikle, işlem sıcaklığının seçimi önemlidir çünkü bu, rulmanın malzeme özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Yüksek sıcaklıklar, malzemenin mikroyapısını değiştirir ve istenmeyen fazların oluşmasına neden olabilir. Aşırı sıcaklıklar, rulmanın sertliğini, tokluğunu ve diğer mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Öte yandan, düşük sıcaklıklar işlemin etkinliğini azaltabilir ve istenilen özelliklerin elde edilmesini engelleyebilir. Bu nedenle, optimal işlem sıcaklığının belirlenmesi, rulmanın performansını ve ömrünü belirleyen kritik bir faktördür.

İşlem süresi de önemli bir parametredir çünkü bu, malzemenin yeterince sertleşmesi veya alınması için gereken zamanı belirler. Yetersiz süreler, işlemin etkinliğini azaltabilir ve istenilen özelliklerin elde edilmesini engelleyebilir. Diğer yandan, aşırı uzun süreler, malzemenin aşırı sertleşmesine veya başka olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle, işlem süresinin optimal bir şekilde belirlenmesi, rulmanın istenilen özelliklere sahip olmasını sağlayan kritik bir parametredir.

İşlem sıcaklığı ve süresinin optimizasyonu, deneyimli uzmanlar tarafından dikkatlice yapılmalıdır. Bu genellikle deneysel çalışmalar ve testler yoluyla gerçekleştirilir. Farklı sıcaklık ve süre kombinasyonları denenir ve elde edilen sonuçlar analiz edilir. Optimal parametreler, rulmanın istenilen mekanik özelliklerine en uygun olanlar olarak belirlenir. Bununla birlikte, işlem sıcaklığı ve süresinin optimizasyonu, belirli uygulama ve malzeme türüne bağlı olarak değişebilir. Farklı rulman tipleri ve malzemeleri, farklı işlem parametrelerine ihtiyaç duyabilir. Bu nedenle, her durum için özel olarak ayarlanmış bir yaklaşım gereklidir. İşlem sıcaklığı ve süresinin doğru bir şekilde optimize edilmesi, rulmanların istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar ve işlem sonrası olumsuz sonuçların önlenmesine yardımcı olur. Bu, rulmanların performansını ve ömrünü artıran önemli bir faktördür ve endüstriyel uygulamalarda büyük öneme sahiptir (Acar, 2014).

#### 2.5.2.1. Optimal sıcaklık aralıkları

Optimal sıcaklık aralıkları, rulmanların ısı işlem sürecinde en iyi performansı gösterebileceği ve istenilen mekanik özelliklere sahip olabileceği sıcaklık değerlerini ifade eder. Bu aralıklar, rulmanın malzeme yapısı, işlem tipi ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Ancak, genel olarak, belirli sıcaklık aralıklarının belirlenmesi ve bu aralıkların optimal olarak kullanılması, rulmanların istenilen performansı elde etmesine yardımcı olabilir.

Öncelikle, rulmanların malzeme özellikleri üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Her malzeme türü, belirli bir sıcaklık aralığında en iyi performansı gösterebilir. Örneğin, yüksek karbonlu çelikler genellikle 800°C ila 900°C arasında sertleştirilirken, düşük alaşımlı çelikler daha düşük sıcaklıklarda işlem görebilir. Malzemenin sıcaklığa tepkisi, işlem sıcaklığının belirlenmesinde kritik bir faktördür. İşlem tipi de en uygun sıcaklık aralıklarını etkileyebilir. Sementasyon gibi yüzey sertleştirme işlemleri genellikle daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilirken, normalleştirme gibi içyapının iyileştirilmesini amaçlayan işlemler daha yüksek

sıcaklıkları gerektirebilir. Her işlem tipi için belirli bir sıcaklık aralığı önerilir ve bu aralıkların dikkatlice belirlenmesi önemlidir (Mao ve ark., 2019).

Uygulama gereksinimleri de en uygun sıcaklık aralıklarını belirlemede önemli bir rol oynar. Rulmanın çalışma koşulları ve kullanım amacı, işlem sıcaklığının seçiminde dikkate alınmalıdır. Örneğin, ağır hizmet koşullarında çalışacak rulmanlar için daha yüksek sıcaklık aralıkları tercih edilebilirken, düşük hızlı uygulamalar için daha düşük sıcaklıklar uygun olabilir (Jiang ve Xiang, 2023). Son olarak, işlem sıcaklığının belirlenmesinde kullanılan ekipman ve teknikler de önemlidir. Doğru ekipman ve prosedürlerin seçilmesi, işlem sıcaklığının hassas bir şekilde kontrol edilmesine ve istenilen sonuçların elde edilmesine olanak tanır. Bu nedenle, işlem sürecinin her adımında uygun ekipmanın ve tekniklerin kullanılması önemlidir.

Genel olarak, en uygun sıcaklık aralıklarının belirlenmesi, rulmanların ısıl işlem sürecinde istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar ve işlem sonrası olumsuz sonuçların önlenmesine yardımcı olur. Bu nedenle, işlem sıcaklığının dikkatlice kontrol edilmesi ve doğru parametrelerin seçilmesi, rulmanların performansını ve ömrünü artıran kritik bir faktördür.

#### 2.5.2.2. İşlem süresinin ayarlanması

İşlem süresinin ayarlanması, ısıl işlem sürecinde rulmanların istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayan kritik bir faktördür. Doğru süre seçimi, rulmanın malzeme yapısının ve mekanik özelliklerinin uygun şekilde geliştirilmesine yardımcı olur. İşlem süresi, malzemenin yeterince sertleşmesi, alınması veya normalleşmesi için gereken süreyi ifade eder ve malzeme tipine, işlem tipine ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir.

İlk olarak, işlem süresinin belirlenmesinde malzemenin tipi ve özellikleri dikkate alınmalıdır. Farklı malzemeler, farklı sürelerde işlem görmelidir çünkü her malzeme tipinin belirli bir sürede istenilen mekanik özelliklere ulaşması gerekir. Örneğin, düşük alaşımlı çelikler daha kısa sürelerde sertleşebilirken, yüksek karbonlu çelikler daha uzun sürelerde işlem görebilir. İşlem tipi de süre seçimini etkiler. Örneğin, yüzey sertleştirme işlemleri genellikle daha kısa sürelerde gerçekleştirilirken, içyapının iyileştirilmesini amaçlayan işlemler daha uzun süreler gerektirebilir. Sürenin belirlenmesinde, işlemin amacı ve malzeme üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır (Denli, 2007).

Uygulama gereksinimleri de süre seçiminde önemlidir. Rulmanın kullanılacağı ortamın özellikleri, işlem süresinin belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Örneğin, ağır

hizmet koşullarında kullanılacak rulmanlar için daha uzun süreler gerekebilirken, daha hızlı ve hassas uygulamalar için daha kısa süreler tercih edilebilir.

Son olarak, işlem süresinin belirlenmesinde kullanılan ekipman ve teknikler de önemlidir. Doğru ekipmanın ve prosedürlerin seçilmesi, işlem süresinin doğru bir şekilde kontrol edilmesine ve istenilen sonuçların elde edilmesine olanak tanır. Süre seçiminde kullanılan termal işlem ekipmanının doğruluğu ve hassasiyeti, işlem sürecinin etkinliğini doğrudan etkiler. Genel olarak, işlem süresinin doğru bir şekilde ayarlanması, rulmanların istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar ve işlem sonrası olumsuz sonuçların önlenmesine yardımcı olur. Süre seçiminin malzeme tipine, işlem tipine, uygulama gereksinimlerine ve kullanılan ekipman ve tekniklere dikkatle göz önünde bulundurulması önemlidir. Bu şekilde, rulmanların performansı ve ömrü en üst düzeye çıkarılabilir (Park ve ark., 2020).

### **2.5.3. Isıl işlemin yorulma ömrüne etkisi**

Isıl işlemin, özellikle rulmanların yorulma ömrüne olan etkisi endüstride büyük bir öneme sahiptir. Doğru bir şekilde uygulandığında, ısıl işlem rulmanların dayanıklılığını artırabilir ve yorulma ömrünü uzatabilir. Bununla birlikte, yanlış uygulandığında veya gerektiği gibi kontrol edilmediğinde, ısıl işlem istenmeyen sonuçlara neden olabilir ve rulmanların yorulma ömrünü kısaltabilir. Isıl işlem genellikle rulmanların malzeme özelliklerini değiştirerek yorulma ömrünü etkiler. Örneğin, sertleştirme işlemi rulmanın yüzey sertliğini artırır ve aşınma direncini artırırken, alınma işlemi rulmanın iç yapısındaki gerilmeleri azaltır ve kırılma direncini artırabilir. Bu işlemler, rulmanın yorulma ömrünü artırmak için malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir.

Isıl işlemin yorulma ömrüne etkisini anlamak için, genellikle yapılan testler ve deneyler yoluyla çalışmalar yapılır. Bu çalışmalar, farklı ısıl işlem parametrelerinin ve tekniklerinin rulmanın yorulma ömrü üzerindeki etkisini değerlendirir. Örneğin, belirli bir ısıl işlem sürecinin uygulanmasıyla işlenen rulmanlar, daha sonra yorulma testlerine tabi tutulabilir ve işlem sonrası performansları analiz edilebilir (Que ve ark., 2021).

Yapılan araştırmalar genellikle ısıl işlemin, rulmanların yorulma ömrünü artırdığını göstermektedir. Özellikle, yüksek karbonlu çelikler gibi sertleştirme işlemine uygun malzemelerde, ısıl işlemin yorulma direncini artırdığı ve rulmanların daha uzun süre dayanabileceği bulunmuştur. Ancak, işlem sırasında kullanılan parametrelerin ve

tekniklerin doğru bir şekilde ayarlanması önemlidir. Aksi takdirde, istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir ve rulmanların yorulma ömrü olumsuz yönde etkilenebilir.

Isıl işlemin rulmanların yorulma ömrüne olan etkisi, malzeme özelliklerini değiştirerek ve mekanik özellikleri iyileştirerek rulmanların dayanıklılığını artırır. Doğru uygulandığında, ısıl işlem rulmanların yorulma direncini artırabilir ve uzun süreli çalışma sağlayabilir. Ancak, işlem sırasında dikkatli olunmalı ve parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması sağlanmalıdır, bu da istenmeyen sonuçların önlenmesine ve rulmanların yorulma ömrünün maksimize edilmesine yardımcı olur (Liang ve ark., 2021).

#### 2.5.3.1. Deneysel çalışmalar ve bulgular

Isıl işlemle ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalar, rulmanların yorulma ömrü üzerindeki etkilerini anlamak ve işlemin en uygun parametrelerini belirlemek için önemli bir araçtır. Bu tür çalışmalar, çeşitli ısıl işlem tekniklerinin rulmanların performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlar ve genellikle farklı işlem parametrelerinin (sıcaklık, süre, soğutma hızı vb.) rulmanların yorulma ömrüne olan etkilerini incelemek için tasarlanmıştır. Bu deneysel çalışmaların çoğu, laboratuvar ortamında kontrollü koşullar altında gerçekleştirilir. Öncelikle, belirli bir ısıl işlem prosedürü seçilir ve bu işlem rulmanlara uygulanır. Daha sonra, işlem görmüş rulmanlar standart yorulma testlerine tabi tutulur ve performansları dikkatlice incelenir. Bu testler genellikle ASTM veya ISO standartlarına göre yapılır ve rulmanların belirli bir sayıda devirdeki dayanıklılığı ölçülür.

Deneysel çalışmalar genellikle farklı işlem parametrelerinin rulmanların yorulma ömrüne etkisini değerlendirir. Örneğin, belirli bir sıcaklık aralığında farklı sürelerde işlem görmüş rulmanlar karşılaştırılabilir. Aynı şekilde, belirli bir süre boyunca farklı sıcaklıklarda işlem görmüş rulmanlar da karşılaştırılabilir. Bu tür çalışmaların sonuçları, hangi işlem parametrelerinin rulmanların yorulma ömrünü en çok etkilediğini ve optimal parametrelerin neler olduğunu belirlemeye yardımcı olur (Zhang ve ark., 2023).

Deneysel çalışmaların sonuçları genellikle ısıl işlem tekniklerinin rulmanların yorulma ömrü üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, sertleştirme ve alınma gibi işlemler genellikle rulmanların yorulma direncini artırır ve uzun süreli kullanıma daha uygun hale getirir. Ancak, işlem sırasında kullanılan parametrelerin doğru bir şekilde seçilmesi ve kontrol edilmesi önemlidir. Aksi takdirde, istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir ve rulmanların performansı olumsuz yönde

etkilenebilir. Deneysel çalışmalar ısıl işlemin rulmanların yorulma ömrü üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir araçtır. Bu çalışmalar, işlem parametrelerinin belirlenmesine ve ısıl işlem prosedürlerinin geliştirilmesine katkıda bulunur, bu da rulmanların dayanıklılığını artırır ve uzun ömürlü kullanım sağlar. Ancak, doğru sonuçların elde edilmesi için deneysel çalışmaların titizlikle planlanması ve yürütülmesi gerekir.

#### 2.5.3.2. Teorik modeller ve simülasyonlar

Isıl işlemin rulmanların yorulma ömrü üzerindeki etkilerini anlamak için teorik modeller ve simülasyonlar da kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, ısıl işlemin kompleks etkilerini matematiksel olarak modelleyerek ve bilgisayar simülasyonları yoluyla analiz ederek, farklı işlem parametrelerinin ve tekniklerinin rulman performansı üzerindeki etkilerini daha iyi anlamayı sağlar (Han ve ark., 2021).

Teorik modeller, ısıl işlemin rulman malzemesi üzerindeki etkilerini açıklamak için kullanılır. Bu modeller genellikle malzemenin ısıl davranışını ve mekanik özelliklerini dikkate alır ve işlem sırasında malzeme üzerindeki değişiklikleri tahmin eder. Örneğin, belirli bir sıcaklıkta ve sürede uygulanan sertleştirme işleminin, malzemenin sertlik, tokluk ve gerilme durumu üzerindeki etkilerini modeller.

Simülasyonlar ise, ısıl işlemin rulmanın tamamen gerçekleştirilmesi öncesinde, bilgisayar ortamında sanal olarak gerçekleştirilmesini sağlar. Bu simülasyonlar, işlem sırasında malzemenin davranışını, içsel gerilimleri ve malzeme özelliklerindeki değişiklikleri simüle eder. Bu sayede, farklı işlem parametrelerinin ve tekniklerinin rulman performansı üzerindeki etkileri sanal olarak değerlendirilebilir. Teorik modeller ve simülasyonlar, farklı işlem parametrelerinin rulman performansı üzerindeki etkilerini hızlı ve ekonomik bir şekilde analiz etmek için güçlü araçlardır. Özellikle, belirli bir işlem prosedürünün belirlenmesi veya optimize edilmesi gerektiğinde kullanılırlar. Örneğin, bir ısıl işlem prosedürünün belirli bir malzeme üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve en iyi sonucu elde etmek için teorik modelleme ve simülasyonlar kullanılabilir.

Bu yaklaşımın bir avantajı, gerçek dünya deneylerine kıyasla daha hızlı ve maliyet etkin olmasıdır. Ayrıca, teorik modeller ve simülasyonlar, farklı işlem parametrelerinin ve tekniklerinin potansiyel etkilerini önceden analiz etmeye olanak tanır, bu da daha etkili bir işlem prosedürü tasarlanmasına yardımcı olur (Denli, 2007). Ancak, teorik modeller ve simülasyonlar gerçek dünyadaki deneylerin yerini tam olarak

alamazlar. Gerçek dünya koşullarını tam olarak simüle etmek ve karmaşık etkileşimleri doğru bir şekilde modellemek zor olabilir. Bu nedenle, teorik modeller ve simülasyonlar, gerçek deneylerle birlikte kullanıldığında en etkili şekilde kullanılırlar. Teorik modeller ve simülasyonlar, ısıl işlemin rulmanların yorulma ömrü üzerindeki etkilerini anlamak ve optimize etmek için güçlü araçlardır. Bu yaklaşım, farklı işlem parametrelerinin ve tekniklerinin rulman performansı üzerindeki etkilerini hızlı ve ekonomik bir şekilde analiz etmeyi sağlar. Ancak, gerçek dünya deneylerinin sonuçlarıyla birlikte kullanıldıklarında en etkili şekilde kullanılırlar (Kong ve Yang, 2019).

## **2.6. Kestirimci Bakım ve Isıl İşlemin Entegrasyonu**

Kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonu, endüstrideki makinelerin ve ekipmanların güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için önemli bir stratejidir. Bu yaklaşım, makinelerde olası arızaları önceden tahmin etmek ve önleyici bakımı optimize etmek amacıyla kestirimci bakım tekniklerini ısıl işlem süreçleriyle birleştirir. Bu entegrasyon, hem makinelerin çalışma sürekliliğini artırırken hem de ısıl işlem süreçlerinin verimliliğini artırarak üretim maliyetlerini düşürür.

Kestirimci bakım, makine veya ekipmanın anormal durumlarını belirlemek ve arızaları önceden tahmin etmek için sensörlerden elde edilen verileri analiz eder. Isıl işlemin entegrasyonu ile, ısıl işlem sırasında elde edilen veriler de bu analize dahil edilir. Örneğin, sıcaklık, basınç ve titreşim gibi ısıl işlem süreci sırasında toplanan veriler, makinelerin çalışma durumu hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu veriler, makinelerdeki olası arızaları belirlemek ve bakım gereksinimlerini önceden tahmin etmek için kestirimci bakım algoritmalarına entegre edilebilir. Bu entegrasyon, makinelerin daha güvenilir ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Örneğin, bir rulmanın ısıl işlem sırasında maruz kaldığı sıcaklık verileri, rulmanın çalışma koşullarını ve potansiyel arıza risklerini belirlemek için kullanılabilir. Bu veriler, rulmanın potansiyel bir arıza durumunda daha önce belirlenmiş bakım stratejilerini tetikleyebilir veya işletme personeline uyarılar gönderebilir (Aliustaoğlu, 2008).

Isıl işlemin entegrasyonu aynı zamanda işletmelerin bakım programlarını optimize etmelerine de olanak tanır. Sensörler ve veri analitiği sayesinde, ısıl işlem sırasında elde edilen verilerle, makinelerin çalışma durumu ve bakım gereksinimleri hakkında daha fazla bilgi elde edilir. Bu bilgiler, bakım ekiplerinin kaynaklarını daha etkili bir şekilde yönetmelerini ve bakım faaliyetlerini planlamalarını sağlar. Örneğin,

acil bakım gerektiren makineler belirlenir ve önceliklendirilirken, diğer makinelerin bakım programları optimize edilir. Kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonu, endüstride makinelerin güvenilirliğini artırmak ve bakım maliyetlerini düşürmek için güçlü bir stratejidir. Bu yaklaşım, makinelerin çalışma durumu hakkında daha fazla bilgi sağlar ve bakım faaliyetlerini daha etkili bir şekilde yönetmeyi sağlar. Isıl işlem süreçlerinden elde edilen veriler, kestirimci bakım algoritmalarıyla birleştirilerek, makinelerdeki arıza riskleri önceden belirlenebilir ve bakım gereksinimleri daha iyi planlanabilir. Bu sayede, işletmeler daha güvenilir ve verimli bir üretim süreci sağlayabilir (Juvonen, 2010).

### **2.6.1. Entegrasyonun operasyonel avantajları**

Kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonu, endüstride operasyonel avantajlar sağlayarak işletmelerin daha verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu entegrasyonun operasyonel avantajları, hem makinelerin çalışma sürekliliğini artırarak üretkenliği artırırken hem de bakım maliyetlerini düşürerek işletmenin karlılığını artırır.

Entegrasyonun operasyonel avantajlarından biri, daha iyi bakım planlaması ve kaynak yönetimidir. Isıl işlem sırasında elde edilen veriler, makinelerin çalışma durumu hakkında değerli bilgiler sağlar. Bu bilgiler, kestirimci bakım algoritmalarıyla birleştirilerek, makinelerdeki arıza riskleri belirlenebilir ve bakım gereksinimleri önceden tahmin edilebilir. Bu sayede, bakım ekipleri, kaynaklarını daha etkili bir şekilde yönetebilir ve bakım faaliyetlerini daha iyi planlayabilir. Acil bakım gerektiren makineler önceliklendirilirken, diğer makinelerin bakım programları optimize edilir.

Entegrasyon, makinelerin güvenilirliğini artırarak işletmenin üretkenliğini artırır. Isıl işlem sırasında elde edilen veriler, makinelerin çalışma koşulları hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu bilgiler, olası arızaları önceden tahmin etmek ve makinelerin duruş süresini minimize etmek için kullanılabilir. Örneğin, bir rulmanın ısıl işlem sırasında maruz kaldığı sıcaklık verileri, rulmanın çalışma koşullarını ve potansiyel arıza risklerini belirlemek için kullanılabilir. Bu sayede, arızalar önceden tahmin edilir ve önleyici bakım stratejileri uygulanarak makinelerin çalışma sürekliliği artırılır (She ve ark., 2020).

Entegrasyon, işletmenin maliyetlerini düşürerek karlılığını artırır. Daha iyi bakım planlaması ve kaynak yönetimi sayesinde bakım maliyetleri optimize edilir. Önceden tahmin edilen arızaların önlenmesi, beklenmedik duruş sürelerini azaltır ve üretim verimliliğini artırır. Ayrıca, ısıl işlem süreçlerinden elde edilen verilerin

kullanılmasıyla bakım faaliyetlerinin etkinliği artar ve gereksiz bakım maliyetleri önlenir. Bu da işletmenin genel karlılığını artırır. Kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonu, işletmelere operasyonel avantajlar sağlar. Daha iyi bakım planlaması ve kaynak yönetimi sayesinde makinelerin çalışma sürekliliği artar, üretkenlik artar ve bakım maliyetleri düşer. Bu sayede işletmeler, daha verimli ve güvenilir bir şekilde çalışarak rekabet avantajı elde ederler (Saffiudeen ve ark., 2023).

### **2.6.2. Kestirimci bakım veri analizi**

Kestirimci bakım veri analizi, endüstrideki makinelerin durumu hakkında değerli bilgiler elde etmek için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu teknik, makinelerden toplanan verileri analiz ederek, olası arızaları önceden tahmin etmek ve önleyici bakım stratejileri geliştirmek amacıyla kullanılır. Kestirimci bakım veri analizi, genellikle sensörler ve izleme ekipmanları aracılığıyla toplanan büyük miktarda veriyi işler ve analiz eder.

Kestirimci bakım veri analizi, bir dizi farklı teknik ve yaklaşımı içerir. Bu teknikler arasında istatistiksel analiz, makine öğrenimi, yapay zeka ve veri madenciliği gibi yöntemler bulunur. İstatistiksel analiz, makinelerin geçmiş performans verilerini inceleyerek gelecekteki arıza risklerini tahmin etmek için kullanılır. Makine öğrenimi, makinelerden toplanan verilerden örüntüler ve ilişkiler çıkarmak için kullanılır ve arızaları önceden tahmin etmek için kullanılan modeller oluşturur. Yapay zeka ve veri madenciliği ise, büyük veri kümelerini analiz ederek değerli bilgileri ortaya çıkarır ve karar verme süreçlerini iyileştirmek için kullanılır (Fujishima ve ark., 2017).

Kestirimci bakım veri analizi, makinelerin durumu hakkında değerli bilgiler elde etmenin yanı sıra, işletmelere bir dizi fayda sağlar. Birincisi, arızaların önceden tahmin edilmesi, beklenmedik duruş sürelerini azaltır ve üretkenliği artırır. Önleyici bakım stratejilerinin uygulanmasıyla, makinelerin daha güvenilir ve verimli bir şekilde çalışması sağlanır. İkincisi, bakım maliyetlerinin azaltılması, işletmelerin karlılığını artırır. Bakım gereksinimlerinin önceden tahmin edilmesi ve bakım faaliyetlerinin optimize edilmesi, gereksiz bakım maliyetlerinin önlenmesine yardımcı olur. Üçüncüsü, işletmelerin rekabet avantajı elde etmesine yardımcı olur. Daha güvenilir ve verimli bir şekilde çalışan makineler, müşteri memnuniyetini artırır ve pazar payını korumak veya artırmak için bir avantaj sağlar.

Ancak, kestirimci bakım veri analizi, bazı zorluklarla da karşılaşabilir. Bunlar arasında, büyük veri kümelerini işleme ve analiz etme zorluğu, doğru veri kaynağını

seçme zorluğu ve veri güvenilirliği sorunları bulunur. Bu zorluklar, doğru veri analizi sonuçlarının elde edilmesini zorlaştırabilir ve yanlış tahminlere veya karar verme hatalarına neden olabilir. Bu nedenle, kestirimci bakım veri analizinde doğru veri kaynaklarının seçilmesi ve veri güvenilirliğinin sağlanması önemlidir (Andritoi ve ark., 2019).

#### 2.6.2.1. Algoritma ve model geliştirme

Algoritma ve model geliştirme, kestirimci bakım veri analizinin temel adımlarından biridir ve makinelerin durumunu tahmin etmek için kullanılan modellerin ve algoritmaların oluşturulmasını içerir. Bu süreç, makinelerden toplanan verilerin analiz edilmesi ve örüntülerin, ilişkilerin ve trendlerin tanımlanması için bir dizi matematiksel ve istatistiksel teknik kullanılarak gerçekleştirilir.

Algoritma ve model geliştirme süreci, bir dizi adımdan oluşur. İlk olarak, veri toplanır ve hazırlanır. Bu adımda, makinelerden toplanan veriler temizlenir, düzenlenir ve ön işleme adımları uygulanır. Veri ön işleme işlemleri arasında eksik verilerin doldurulması, aykırı değerlerin tespiti ve düzeltilmesi, veri normelleştirme ve özellik mühendisliği yer alır.

Daha sonra, model geliştirme için uygun bir algoritma seçilir veya tasarlanır. Bu algoritma, veri seti ve analiz gereksinimlerine bağlı olarak belirlenir. Örneğin, sınıflandırma problemleri için yaygın olarak kullanılan algoritmalar arasında karar ağaçları, destek vektör makineleri (SVM) ve derin öğrenme modelleri bulunur. Regresyon problemleri için ise doğrusal regresyon, lojistik regresyon ve random forest gibi algoritmalar tercih edilebilir.

Algoritma seçildikten sonra, model eğitimi gerçekleştirilir. Bu adımda, model, eğitim veri seti üzerinde öğrenilir ve belirli bir performans metriğine göre değerlendirilir. Model eğitimi sırasında, veri seti genellikle eğitim ve doğrulama setleri olarak bölünür. Eğitim seti, modelin öğrenme sürecinde kullanılan veri setidir, doğrulama seti ise modelin performansını değerlendirmek için ayrılan veri setidir (Tirpude ve ark., 2011). Model eğitimi tamamlandıktan sonra, modelin performansı değerlendirilir ve gerektiğinde iyileştirme adımları uygulanır. Modelin performansı, belirli bir performans metriği kullanılarak ölçülür. Örneğin, sınıflandırma problemleri için doğruluk, hassasiyet ve geri çağırma, regresyon problemleri için ortalama karesel hata (MSE) veya belirli bir tolerans aralığı içindeki doğruluk gibi metrikler kullanılabilir. Son olarak, eğitilmiş model, gerçek dünya verileri üzerinde test edilir ve

uygulanır. Modelin gerçek dünya verileri üzerindeki performansı değerlendirilir ve gerektiğinde revize edilir veya yeniden eğitilir. Bu süreç, kestirimci bakım veri analizinde kullanılan modellerin ve algoritmaların sürekli olarak iyileştirilmesini ve optimize edilmesini sağlar.

Algoritma ve model geliştirme süreci, kestirimci bakım veri analizinin etkinliğini ve doğruluğunu belirleyen kritik bir adımdır. Doğru algoritmaların ve modellerin seçilmesi, veri setinin doğru şekilde işlenmesi ve eğitilmiş modellerin doğru şekilde değerlendirilmesi, başarılı bir kestirimci bakım veri analizi uygulaması için gereklidir. Bu süreç, işletmelere makinelerin durumunu daha iyi anlamak ve bakım gereksinimlerini önceden tahmin etmek için güçlü bir araç sağlar (Göktaş, 1997).

#### 2.6.2.2. Karar destek sistemleri

Karar destek sistemleri (KDS), işletmelerin karar verme süreçlerini desteklemek ve iyileştirmek için tasarlanmış bilgi sistemleridir. KDS'ler, büyük miktarda veriyi analiz eder, işler ve karar alma sürecine değerli bilgi sağlayarak işletmelerin stratejik ve operasyonel hedeflerine ulaşmasına yardımcı olur. KDS'ler, kestirimci bakım veri analizi sürecinde önemli bir rol oynar, çünkü makinelerden gelen verilerin analiz edilmesi ve doğru kararların alınması için gereken bilgiyi sağlarlar.

KDS'ler genellikle bir dizi bileşen içerir. Bunlar arasında veri depolama ve yönetim sistemleri, veri analitiği araçları, karar destek modülleri ve kullanıcı arayüzleri bulunur. Veri depolama ve yönetim sistemleri, makinelerden toplanan büyük miktarda verinin depolanması ve yönetilmesi için gereklidir. Veri analitiği araçları, veri setlerinin analiz edilmesi ve örüntülerin tanımlanması için kullanılır. Karar destek modülleri, analiz sonuçlarına dayanarak karar alma sürecini destekler ve kullanıcılara öneriler sunar. Kullanıcı arayüzleri ise, kullanıcıların KDS'ye erişmesini ve kullanmasını sağlar. KDS'ler, kestirimci bakım veri analizi sürecinde çeşitli şekillerde kullanılabilir. İlk olarak, makinelerden toplanan verilerin analiz edilmesi ve örüntülerin tanımlanması için kullanılırlar. KDS'ler, bu verileri işleyerek olası arızaları önceden tahmin etmek ve önleyici bakım stratejileri geliştirmek için kullanılabilir. Örneğin, bir rulmanın titreşim verileri, KDS tarafından analiz edilerek potansiyel arıza belirtileri tanımlanabilir ve bakım ekiplerine uyarılar gönderilebilir (Karamanlı, 2003).

KDS'ler, karar destek modülleri aracılığıyla makinelerin durumu hakkında değerli bilgi sağlarlar. KDS'ler, analiz sonuçlarına dayanarak karar alma sürecini destekler ve işletmelerin stratejik ve operasyonel hedeflerine ulaşmasına yardımcı

olacak öneriler sunar. Örneğin, bir makinanın bakım gereksinimleri belirlendiğinde, KDS, bakım ekibine hangi adımların atılması gerektiği konusunda önerilerde bulunabilir ve bakım planlamasını optimize edebilir.

Son olarak, KDS'ler, kullanıcı arayüzleri aracılığıyla işletme yöneticilerine ve bakım ekiplerine değerli bilgi sunarlar. Kullanıcı arayüzleri, kullanıcıların KDS'ye erişmesini ve kullanmasını sağlar, böylece karar alma sürecine aktif olarak katılmalarını sağlarlar. KDS'ler, kullanıcıların makinelerin durumu hakkında gerçek zamanlı olarak bilgi almasını sağlar ve karar verme sürecine katkıda bulunmalarını sağlar. Karar destek sistemleri, kestirimci bakım veri analizi sürecinde önemli bir rol oynar. Makinelere gelen verilerin analiz edilmesi ve doğru kararların alınması için gereken bilgiyi sağlarlar. KDS'ler, işletmelerin stratejik ve operasyonel hedeflerine ulaşmasına yardımcı olurken, bakım faaliyetlerini optimize etmeye ve makinelerin güvenilirliğini artırmaya katkıda bulunurlar. Bu nedenle, işletmelerin kestirimci bakım veri analizi sürecinde KDS'leri etkin bir şekilde kullanmaları önemlidir (Juvonen, 2010).

### **2.6.3. Uygulama örnekleri ve vaka analizleri**

Uygulama örnekleri ve vaka analizleri, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunun endüstride nasıl uygulandığını ve nasıl değer sağladığını göstermek için önemli bir araçtır. Bu örnekler ve analizler, işletmelerin gerçek dünya senaryolarında bu entegrasyonu nasıl kullanabileceğini anlamalarına ve bu teknolojilerin potansiyel faydalarını görmelerine yardımcı olur. (Zhao ve ark. 2021)

- **Otomotiv Endüstrisinde Bakım Öngörüsü:** Bir otomobil üreticisi, üretim hatlarında bulunan makinelerin arızalarını önceden tahmin etmek ve duruş sürelerini azaltmak için kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu kullanır. Makinelere toplanan veriler, ısıl işlem sırasında maruz kaldıkları sıcaklık, basınç ve titreşim gibi parametrelerin yanı sıra işletme verilerini de içerir. Bu veriler, makine arızalarının önceden tahmin edilmesi ve bakım faaliyetlerinin optimize edilmesi için kullanılır. Örneğin, bir rulmanın ısıl işlem sırasında maruz kaldığı sıcaklık verileri, rulmanın ömrü ve potansiyel arıza riskleri hakkında değerli bilgiler sağlar. Bu sayede, otomobil üreticisi, üretim hatlarında beklenmedik duruş sürelerini azaltır ve verimliliği artırır.
- **Enerji Sektöründe Isıl İşlemin Etkisi:** Bir enerji şirketi, türbinlerin ve jeneratörlerin arızalarını önceden tahmin etmek ve bakım faaliyetlerini optimize

etmek için kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu kullanır. Isıl işlem süreci sırasında elde edilen veriler, türbinlerin ve jeneratörlerin çalışma koşulları hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu veriler, makine arızalarının önceden tahmin edilmesi ve bakım faaliyetlerinin planlanması için kullanılır. Örneğin, bir türbinin ısıl işlem sırasında maruz kaldığı sıcaklık verileri, türbinin performansını etkileyen faktörler hakkında değerli bilgiler sağlar. Bu sayede, enerji şirketi, türbinlerin ve jeneratörlerin güvenilirliğini artırır ve beklenmedik duruş sürelerini azaltır.

- Endüstriyel Makinelerde Verimlilik Artışı: Bir üretim tesisinde, endüstriyel makinelerin verimliliğini artırmak için kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonu kullanılır. Makinelere toplanan veriler, ısıl işlem süreci sırasında elde edilen sıcaklık, basınç ve titreşim gibi parametrelerin yanı sıra işletme verilerini de içerir. Bu veriler, makine arızalarının önceden tahmin edilmesi ve bakım faaliyetlerinin optimize edilmesi için kullanılır. Örneğin, bir endüstriyel fırının ısıl işlem sırasında maruz kaldığı sıcaklık verileri, fırının performansını etkileyen faktörler hakkında değerli bilgiler sağlar. Bu sayede, üretim tesisi, makine verimliliğini artırır, üretim sürekliliğini sağlar ve üretim maliyetlerini düşürür.

Bu uygulama örnekleri ve vaka analizleri, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunun çeşitli endüstriyel alanlarda nasıl değer sağlayabileceğini göstermektedir. Bu teknolojilerin doğru şekilde uygulanması, işletmelerin makine verimliliğini artırmasına, bakım maliyetlerini azaltmasına ve rekabet avantajı elde etmesine yardımcı olabilir (Çolak ve ark., 2017).

#### 2.6.3.1. Endüstriyel uygulamalar

Endüstriyel uygulamalar, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunun çeşitli endüstriyel sektörlerde nasıl başarıyla kullanılabileceğini gösteren önemli bir alandır. Bu uygulamalar, endüstriyel işletmelerin makinelerin güvenilirliğini artırmasına, bakım maliyetlerini azaltmasına ve üretkenliklerini artırmasına yardımcı olabilir.

Üretim ve imalat endüstrisi, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu, üretim hatlarında bulunan makinelerin performansını ve güvenilirliğini artırmak için kullanabilir. Örneğin, bir otomobil üreticisi, montaj hattındaki robotların arızalarını önceden tahmin etmek ve bakım faaliyetlerini optimize etmek için bu teknolojileri

kullanabilir. Makinelardan toplanan veriler, robotların çalışma koşulları hakkında önemli bilgiler sağlar ve arızaların önceden tahmin edilmesine yardımcı olur.

Enerji ve elektrik sektörü, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu, türbinlerin, jeneratörlerin ve diğer enerji üretim ekipmanlarının bakımını optimize etmek için kullanabilir. Örneğin, bir enerji santrali, türbinlerin arızalarını önceden tahmin etmek ve duruş sürelerini azaltmak için bu teknolojileri kullanabilir. Isıl işlem süreci sırasında elde edilen veriler, türbinlerin performansını etkileyen faktörler hakkında değerli bilgiler sağlar (Acar, 2014).

Petrol ve gaz endüstrisi, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu, petrol kuyularının, boru hatlarının ve diğer tesislerin bakımını optimize etmek için kullanabilir. Örneğin, bir petrol şirketi, boru hatlarındaki aşınma ve yıpranma gibi sorunları önceden tahmin etmek ve bakım faaliyetlerini planlamak için bu teknolojileri kullanabilir. Makinelardan toplanan veriler, boru hatlarının durumu hakkında önemli bilgiler sağlar ve bakım ihtiyaçlarını belirlemeye yardımcı olur.

Havacılık ve uzay endüstrisi, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu, uçakların, roketlerin ve diğer havacılık ekipmanlarının bakımını optimize etmek için kullanabilir. Örneğin, bir havayolu şirketi, uçak motorlarının arızalarını önceden tahmin etmek ve uçuş güvenliğini sağlamak için bu teknolojileri kullanabilir. Isıl işlem süreci sırasında elde edilen veriler, uçak motorlarının performansını etkileyen faktörler hakkında değerli bilgiler sağlar.

Bu endüstriyel uygulama alanları, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunun endüstride nasıl başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Bu teknolojilerin doğru şekilde uygulanması, işletmelerin makinelerin güvenilirliğini artırmasına, bakım maliyetlerini azaltmasına ve rekabet avantajı elde etmesine yardımcı olabilir (Kaya, 1992).

#### 2.6.3.2. Uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi

Bazı çalışmalar kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunun endüstrideki etkisini anlamak için önemli bir rol oynayıp teknolojinin nasıl başarıyla uygulandığını ve işletmelere nasıl değer sağladığını gösterirken, karşılaşılan zorluklar da benzer projeleri yürütme aşamasında karşılaşılan potansiyel engelleri ve çözüm stratejilerini açığa çıkarır.

Bir otomotiv üreticisi, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu kullanarak üretim hatlarındaki makinelerin verimliliğini artırdı. Makinelardan toplanan

veriler, makinelerin çalışma koşulları hakkında önemli bilgiler sağladı ve arızaların önceden tahmin edilmesine yardımcı oldu. Sonuç olarak, üretim hattındaki duruş süreleri azaldı ve üretkenlik arttı.

Bir enerji şirketi, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu kullanarak türbinlerin bakımını optimize etti. Isıl işlem süreci sırasında elde edilen veriler, türbinlerin performansını etkileyen faktörler hakkında değerli bilgiler sağladı. Bu sayede, enerji şirketi, bakım maliyetlerini azalttı ve türbinlerin güvenilirliğini artırdı (Mao ve ark., 2019).

Bir petrol şirketi, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu kullanarak boru hatlarındaki aşınma ve yıpranma gibi sorunları önceden tahmin etti. Makinelere toplanan veriler, boru hatlarının durumu hakkında önemli bilgiler sağladı ve bakım ihtiyaçlarını belirlemeye yardımcı oldu. Sonuç olarak, petrol şirketi, operasyonel sürekliliği artırdı ve bakım maliyetlerini azalttı.

Kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, veri bütünlüğü ve kalitesidir. Makinelere toplanan verilerin eksik, hatalı veya tutarsız olması, doğru analiz ve tahminler yapmayı zorlaştırabilir. Bu nedenle, veri toplama ve yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi önemlidir.

Farklı sistemler arasında uyumsuzluklar ve entegrasyon zorlukları, kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunda başka bir zorluktur. Farklı tedarikçilerden veya farklı teknolojilerden gelen verilerin bir araya getirilmesi ve uyumlu bir şekilde işlenmesi, karmaşık bir süreç olabilir.

Kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunu başarıyla uygulamak için uzman personel gereklidir. Ancak, bu alanda uzmanlaşmış personelin bulunması ve eğitilmesi zor olabilir. İşletmeler, personelin yetkinliklerini artırmak ve sürekli eğitim sağlamak için çaba harcamalıdır (Denli, 2007).

Kestirimci bakım ve ısıl işlemin entegrasyonunun endüstrideki etkisini daha iyi anlamamıza yardımcı olurken, benzer projeleri yürütme aşamasında karşılaşılan potansiyel engelleri ve çözüm stratejilerini açığa çıkarır.

## **2.7. İlgili Literatür Taraması ve Önceki Çalışmalar**

Rulmanlar, makinelerdeki döner veya doğrusal hareketli parçalar arasında sürtünmeyi azaltarak hem radyal hem de aksel yükleri taşıyan, hareketin verimli ve güvenilir şekilde iletilmesini sağlayan temel makine elemanlarıdır. Enerji tasarrufu, aşınma direncinin artması ve operasyonel sürekliliğin sağlanması gibi avantajları

sayesinde; otomotiv, havacılık, enerji üretimi ve ağır sanayi başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır (Goel ve ark, 2014; Sheng ve ark, 2023). Bu nedenle rulmanların doğru seçimi, montajı ve bakım süreçleri, sistem performansı açısından hayati bir rol oynamaktadır.

2023 yılında yapılan (Kalcıoğlu, 2023) “Rulmanların Kalan Faydalı Ömür Tahmini İçin Titreşim Analizi Tabanlı Kestirimci Bakım Yaklaşımı” isimli yüksek lisans çalışması incelendi.

Asansörlerde meydana gelen arızaların, makine öğrenmesi algoritmalarından biri olan kestirimci bakım metoduyla incelenerek arıza gerçekleşmeden önce tespit etmek ve gerekli müdahaleyi yaparak asansör sisteminin kesintisiz bir şekilde çalışmasını sağlamaya çalışılmıştır. Bu çalışma ile daha işlevsel, kesintisiz ve uzun süreli arızalardan korunmuş asansör sistemleri oluşturmak ve bu konuda araştırma yapmak amacıyla yola çıkılmış ve çalışmamın temelini oluşturmuştur.

Abidi ve ark. (2022), yaptıkları çalışmada akıllı yöntemler kullanılarak bir kestirimci bakım modeli geliştirilmişlerdir. Geliştirilen yöntem beş ana aşamadan oluşmaktadır. (a) veri temizleme, (b) veri normalleştirme, (c) uygun değer özellik seçimi, (d) tahmin ağı karar verme ve (e) tahmin. İlk olarak, kestirimci bakıma ait veriler, verilerin belirli bir sınır dâhilinde düzenlenmesi amacıyla veri temizleme ve normalleştirme işlemlerine tabi tutulmuş daha sonra, gereksiz bilgileri azaltmak için uygun değer özellik seçimi gerçekleştirmişlerdir. Optimal özellik seçimi, Java algoritması ve Deniz Aslanı Optimizasyonu'nun karışımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tahmin değerleri aralık olarak farklılık gösterdiğinden, makine öğrenimi veya derin öğrenme yüzünün doğru sonuçlar vermesi zor olacağından bu nedenle, tahmin ağına ilişkin kararlar vermek için bir destek vektör makinesi (SVM) kullanmışlardır. Son olarak, tahmin bir Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN) kullanılarak gerçekleştirilir. RNN’ de ağırlık, kibrit J-SLO kullanılarak optimize edilir. Karşılaştırmalı bir analiz, önerilen modelin iki veri kümesi (uçak motoru ve lityum-iyon pil veri kümeleri) kullanarak bakım planlaması için bileşenlerin gelecekteki durumunu verimli bir şekilde tahmin edebileceğini göstermişlerdir.



### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Skorsky hava aracında kullanılan T700 Turboşaft motorunun güç aktarma kısmında kullanılan yüksek torka maruz rulman ile motor kısmında çalışan yüksek sıcaklığa maruz rulmanın farklı sıcaklıklardaki ısı işlem sonrası çalışma süresi, ısı işlem performans etkileri, kullanım ömrünü belirleyen uçuş süresi ve ısı işlemde kullanılan proses sıcaklığının rulman ömrüne etkisi rulman tipine göre uçuş performansının değerlendirilmesi yapılmıştır.

#### 3.1. T700 Turboshaft Motoru ve Çalışma Sistemi

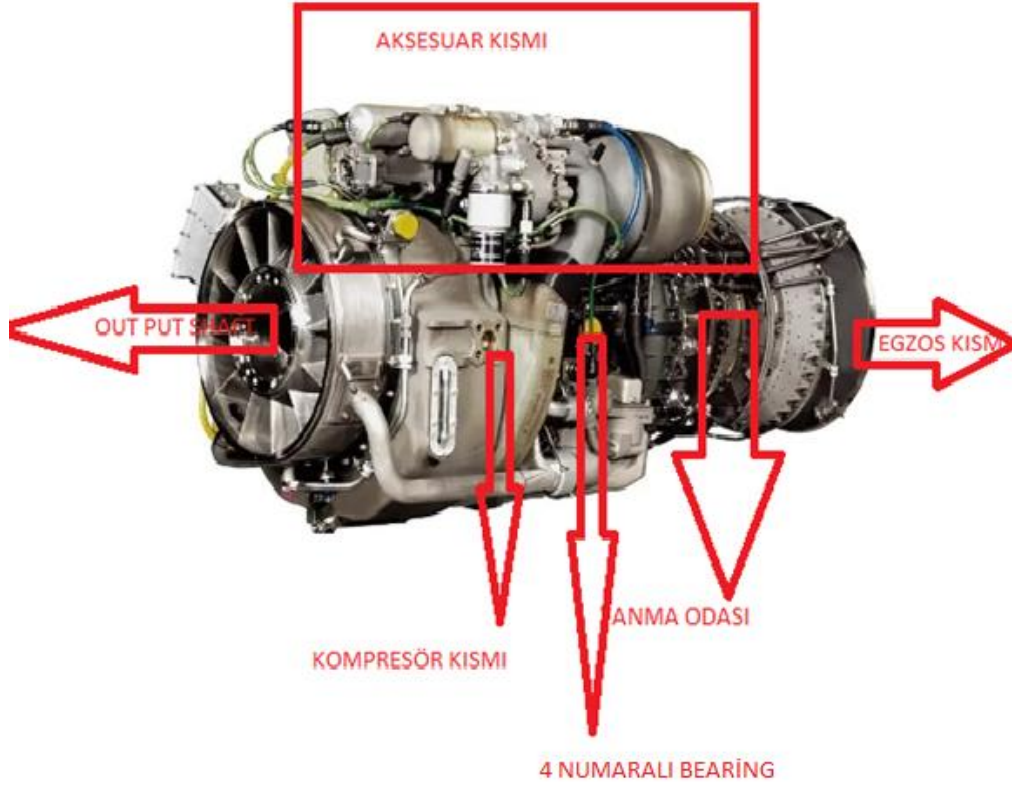
T700 motoru S70 ( Skorsky) modeli hava araçlarında kullanılan bir turboshaft motorudur. Genel olarak 5 kısımdan oluşur. Bu kısımlar kompresör kısmı, yanma odası, türbinler, aksesuar kısmı ve egzoz kısımlarıdır. Kompresör kısmı motora giren havayı sıkıştırarak düşük basınçlı havayı yüksek basınçlı duruma getirip yanma için uygun ortamı hazırlar. Kompresörden gelen yüksek basınçlı hava yanma odasına geldiğinde ateş püskürtülür ve yanma sağlanır. T700 motorunda esas enerjinin üretildiği yerdir. Türbin kısımları ise kendi arasında yüksek basınç türbini, güç türbini ve freewhell olarak üç kısımdır.

- **High-Pressure Turbine (HPT):** Kompresörü döndürebilmek için gereken gücü sağlar. Yani kompresörü çeviren şaftı döndürür.
- **Power Turbine (PT):** HPT'den sonra hâlâ yüksek enerjili olan gaz akımından asıl kullanılabilir gücü çeker. Helikopterin ana rotoruna giden çıkış (output) bu power türbiniyle ilişkilidir.
- **Free Turbine (bağımsız türbin):** Yapısı sayesinde kompresörün ve power türbinin şaftları doğrudan mekanik olarak bağlı değildir; gaz akışıyla birbirlerini döndürürler. Bu, motorun çalışması ve durması sırasında avantaj sağlar.

Aksesuar kısmı motorun çalışması için gerekli yan sistemleri (yakıt pompası, yağ pompası, starter, jeneratör vb.) barındırır ve döndürür. Egzoz kısmı ise yanma sonrası motorda oluşan gazların dışarı atılmasını sağlar. Motorda oluşan güç output shaft vasıtasıyla input modüle burdan ise transmission vasıtasıyla helikopterin pervanelerine aktarılarak hareket sağlanır.

Bu tez çalışmasında yanma odasına en yakın çalışan ve titreşim değerleri alabildiğimiz 4 numaralı bearing ile motorda üretilen gücün ilk olarak iletildiği input modül rulmanlarına farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi yapılmış ve bu tavlama işleminin

rulmanların kalan faydalı ömrüne etkisi araştırılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.1 de örnek bir T700 motoru görseli verilmiştir.



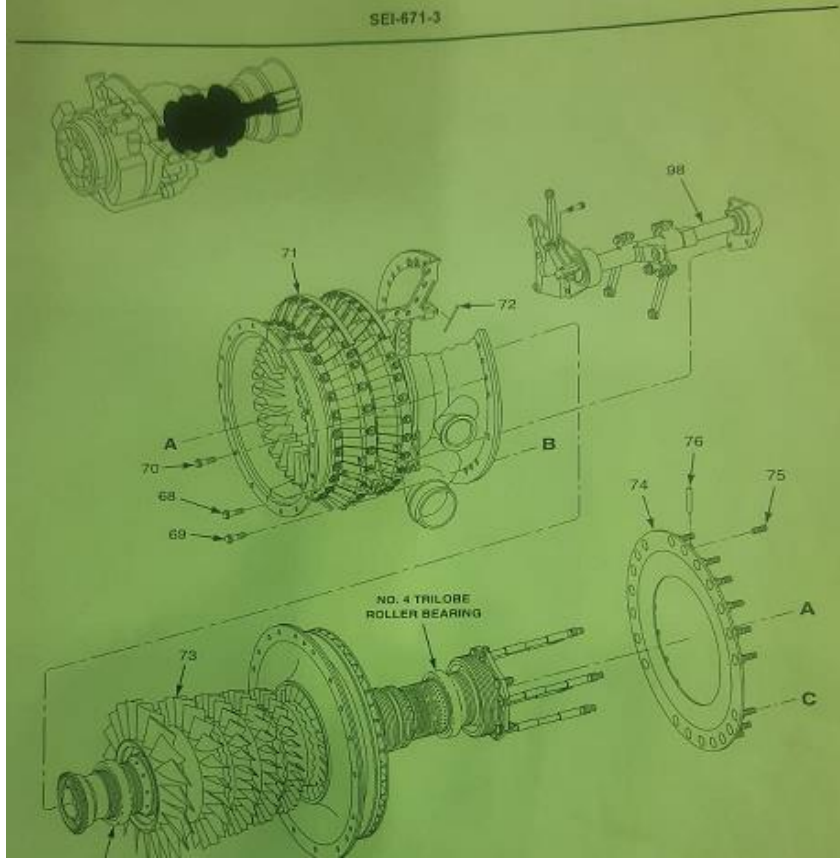
Şekil 3.1. T700 Turboshaft motoru

**Türbinli Motor Kısımları:** Genel olarak bir türbinli motor giriş kısmı, aksesuar kısmı, kompresör kısmı, yanma odası, türbin kısmı, egzoz kısmı ve 6 kısımdan oluşur. Motor giriş kısmı, aksesuar kısmı ve kompresör kısmı soğuk kısım olarak nitelendirilirken yanma odası, türbin kısmı ve egzoz kısmı sıcak kısım olarak isimlendirilir.

**T700 Motoru Çalışma Sistemi:** T 700 motorunun çalışması için startere ilk hareketi verecek olan hava basıncı APU (Auxiliary Power Unit) tarafından sağlanmaktadır. Pilot starter tetiğine bastığı anda hava basıncıyla dönmeye başlayan starter aynı anda motorun aksesuarlarını, kompresör rotoru ve gaz türbinlerini döndürmeye başlar. Bu esnada atmosfere alınan hava, giriş kısmından motora girip şekilde görülen swirl kanatçıkları sayesinde girdap şeklinde döndürülerek toz ve kum ayırıcı sistem için ağır parçaların dışa savrulmasını sağlayıp temizlenerek uygun açıda kompresör kısmına gönderilir. Gönderilen hava kompresörde sıkıştırılıp %75 i motorun soğutulması için kullanılır ve kalan %25 i güç oluşması için yanma odasına gönderilir.

Bu esnada aksesuar kısmından hareket alan yakıt pompası, yakıt manifoldları ve yakıt enjektörleri aracılığıyla gerekli olan yakıtı yanma odasına gönderir. Bujilerin ateşlemesiyle yanma odası içerisinde pülverize halde bulunan yakıt ve hava karışımı yanar. Yanma sonucu oluşan basınçlı hava önce gaz türbinlerine sonrasında güc türbinlerine çarparak egzoz kısmından atılır. Bu esnada gaz türbinlerinde oluşan dönü kompresör türbinlerinin ve aksesuar kısmının döngüsünü sağlar. Güç türbinlerinde oluşan dönü ise power türbine shaft vasıtasıyla motorun çıkış shaftından tranmsiyona iletilir. Tranmsiyona iletilen dönü ana rotor için düşürölüp must vasıtasıyla ana rotor pallerine hareket verir. Aynı şekilde transmisyona iletilen dönü anti torku sağlamak için yükselttilerek kuyruk pallerine hareket sağlar.

Bu kapsamda materyallerimizden biri olan 4 numaralı motor rulmanının teknik resmi Şekil 3.2 de ve motor içerisinde monde edildiği yer Şekil 3.3 de gösterilmiştir. Şekil 3.2 de gösterildiği gibi motor rulmanı sıcak kısım ile soğum kısım arasında çalışmaktadır ve kompresörü arkadan destekleyerek kompresörün saga sola ve ileri geri oynamasını engeller. Bu çalışmada yanma odasının içinde kullanılan 5 numaralı rulman genelde yanma olduğu zaman kullanılmadığından ve titreşim değeri sensörler vasıtasıyla alınmadığından yanma odasına en yakın ve titreşim alınabilen en yakın rulman olarak 4 numaralı rulman materyal olarak kullanıldı.



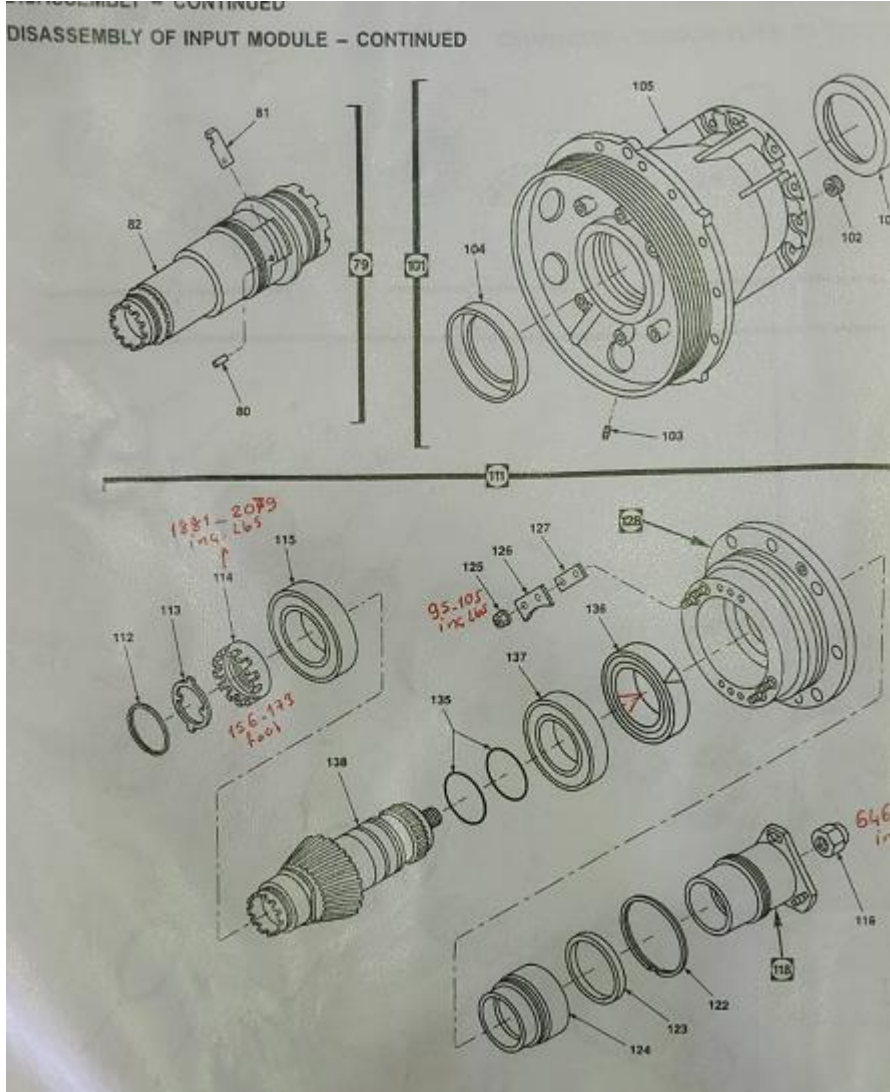
Şekil 3.2. Motor rulmanı teknik resmi



Şekil 3.3. Motor rulmanının monte edildiği kompresör kısmı

Aynı şekilde diğer materyalimiz olan input modül (giriş mekanizması) rulmanının kullanıldığı yer Şekil 3.4 de ve ilgili teknik resmi Şekil 3.5 de gösterilmiştir. Şekil 3.5 de verilen giriş mekanizması rulmanı teknik resmi (ITEM 115) incelendiğinde





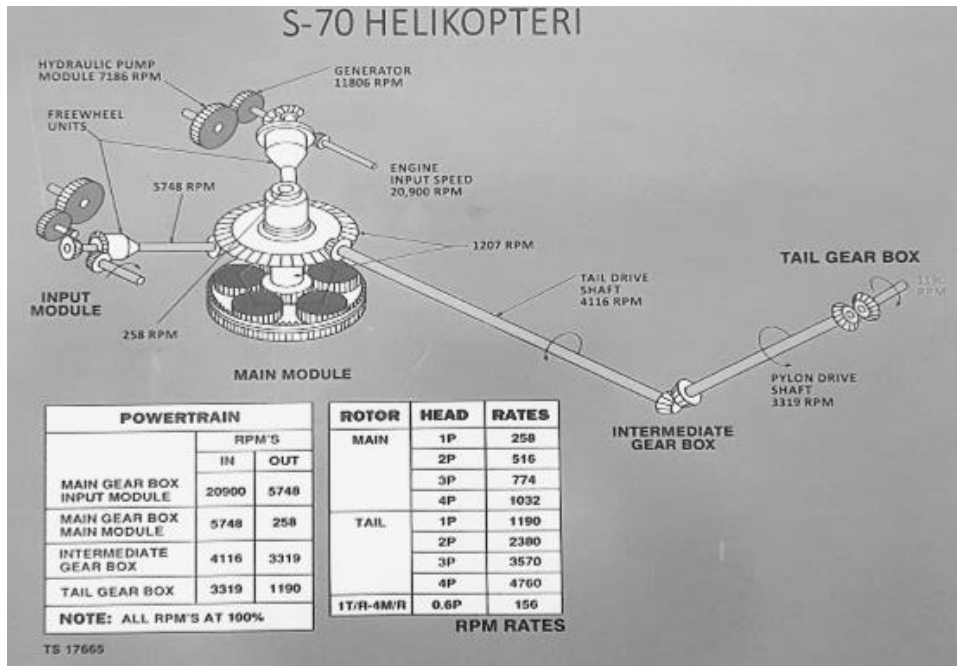
Şekil 3.5. Giriş mekanizması rulmanı teknik resmi (ITEM 115)

Bu çalışma için yüksek ısıya maruz motor rulmanını ve yüksek torka maruz giriş mekanizması rulmanını materyal olarak seçmek, hem motor içindeki kritik rulmanların yük, ısı, titreşim gibi parametrelere nasıl tepki verdiğini hem de transmisyonla olan etkileşimi derinlemesine incelemek açısından büyük önem taşır. Bu sayede arıza analizleri ve bakım planları geliştirebilir. Daha verimli, daha dayanıklı bir motor-transmission entegrasyonu sağlanabilir. Uçuş güvenliği ve operasyonel verimlilik artırılabilir. Böylece tez çalışması, havacılık endüstrisinde hem teknik hem de operasyonel açıdan değerli bir kaynak ve rehber niteliği taşır.

### 3.1.1. İntput modül bearingi

S-70 (Sikorsky) helikopterinin güç aktarım şeması Şekil 3.6 da gösterilmiştir. T700 motorunda üretilen güç ilk olarak input parça (giriş mekanizması) vasıtasıyla main

modüle iletilir. Freewheel unit” (serbest döner ünite) de çoğunlukla bu input modülün içinde yer alır. Motor devreden çıksa bile rotorların serbestçe dönmesine izin verir. S70 helikopterin ana dişli kutusu olan main modüle ana rotor ve kuyruk rotorlarını tahrik ederek ana pallere ve kuyruktaki pervanelere güç iletip helikopterin hareketini sağlar. Bu kapsamda, yüksek sıcaklıkta çalışan motor bearingi ile motorun ürettiği gücü ana şanzımana (main modüle) aktaran yüksek torka maruz ilk dişli kutusu olan input modül rulmanına ısıl işlem uygulayıp sertlik, yorulma dayanımları vs. ele alıp ısıl işlemin bu rulmanların kalan faydalı ömürlerine etkisi ortaya kondu. Yalnızca bu rulmanın bile motor performansını ve motorun bakım süresi doğrudan etkileyeceği dikkate alınmalıdır. Yapılan analiz ve değerlendirmeler, rulman özelinde toplam performansın artırılması, bakım sürelerinin azaltılması ve kullanım sürelerinin artması bakımından önemli veriler sunmaktadır.



**Şekil 3.6.** S-70A Helikopteri güç aktarma şeması

Şekil 3.7’de verilen giriş mekanizması rulmanı dört kısımdan oluşur. İç bilezik, dış bilezik, tutucular ve masuralar. Masuralı olduklarından dolayı devir olarak az tork ve stres altında daha verimli çalışır.

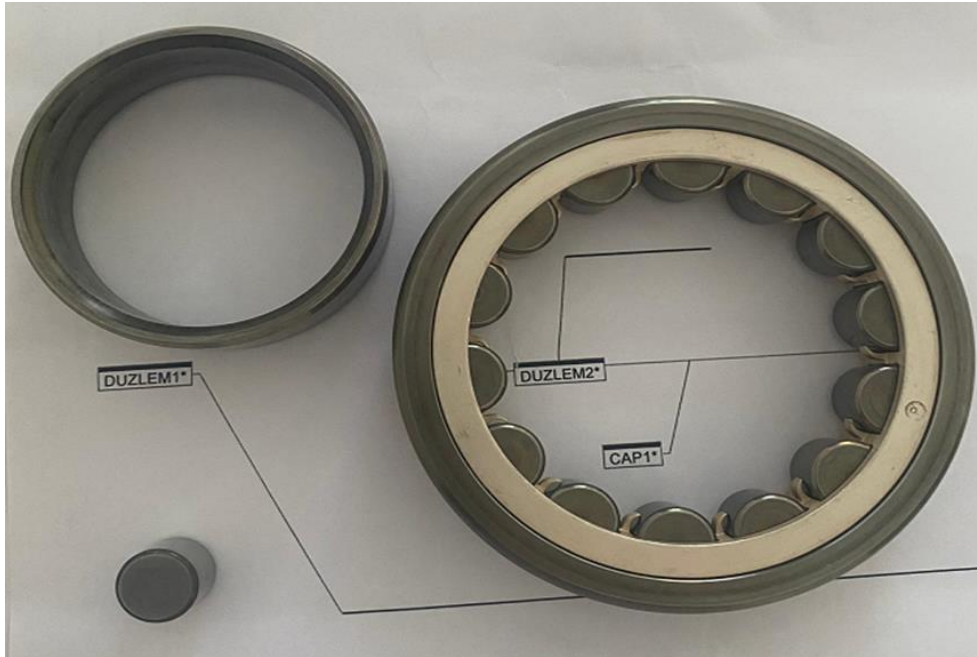
Giriş mekanizması sağ ve sol olmak üzere iki adet kullanılır. Motordan gelen 20900 RPM lik devirin ilk olarak düşerek ve yön değiştirerek main modüle input shaft aracılığıyla hareket ileten dişli kutusudur. Ayrıca üzerinde serbest bırakma (freewheeling) ünitesini üzerinde taşır. Serbest bırakma sistemi herhangi bir hava

aracındaki motor kaybında yâda uçuş esnasında rotor devrinin motor devrini geçtiği sırada pilot tarafından devreye sokularak belli bir süre motordan hareket almaksızın hareketin devam etmesini sağlayan, rotor devrinin tekrar motor devrinin altına düştüğünde tekrar motoru devreye sokan sistemdir.

Yüksek tork ve stress altında çalıştığından input modül bearingi bu tez çalışmasında materyal olarak seçilmiştir.

Şekil 3.7' de input modül rulmanının iç bilezik (inner ring), dış bilezik (outer ring) ve silindirik makaralar (rollers) sökülmüş halde görülmektedir. Bu rulmanın ısıl işlem sonrası geometrik ve malzeme özelliklerini (sertlik, aşınma vb.) nasıl etkilediğini analiz etmek için ölçümler yapılmıştır.

Burada DÜZLEM 1 VE DÜZLEM 2 ifadeleri, iç bilezik veya dış bilezikteki yatak yüzeylerini veya rulmanın kenar düzlemlerini ifade etmekte ve 500 saat uçuş sonrası aşınma, pürüzlülük, deformasyon ölçümleri test edilmektedir. ÇAP 1 terimi ise iç bilezik veya dış bileziğin nominal çapını (ya da silindirik makaraların çapını) ifade eder. Isıl işlem sonrası veya kullanım (uçuş) sonrası oluşan çap değişimleri (genleşme, büzülme, ovalleşme vb.) bu noktada kontrol edilmiştir.

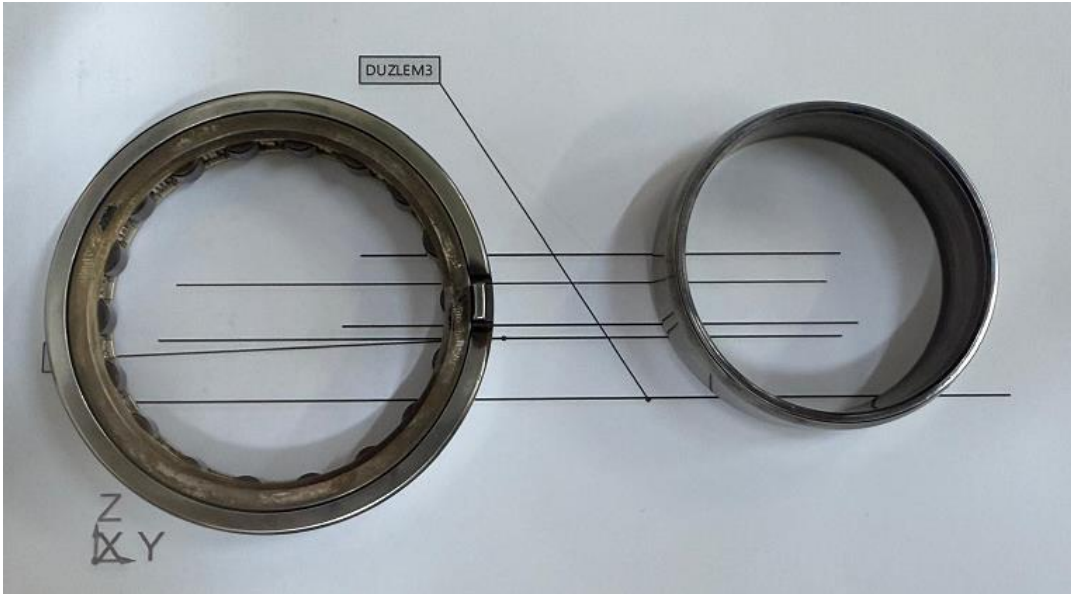


Şekil 3.7. İinput modül bearingi

### 3.1.2. Motor bearingi

Şekil 3.8 de verilen motor rulmanı iki iç bilezik, dış bilezik, tutucu ve kafes olmak üzere 4 kısımdan oluşur. Bu rulman, motor kompresörün arka kısmında montajlanmıştır. Motor çalıştığı anda kompresör öne doğru hamle yaparak ileri gitmek

ister. 4 numaralı bearing kompresörü masuralı olması nedeniyle ileri geri oynatır. Asağı yukarı oynamasına izin vermez. Dakikada 4400 RPM devirle çalışır. Yağlaması bir gidiş-dönüş hattan olur. Yaklaşık 857 °C sıcaklıkta çalışır. Motorda en çok arızalanan bearing olduğu için ve temini yüksek maliyet ve uzun zaman aldığı için ısıl işleme ömrünü artırıp artırılmayacağını belirlemek maksadıyla bu tez çalışmasında materyal olarak seçilmiş ve 500 saat uçuş ve ısıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı incelemesi ya da çap/ovalite değişimleri için CMM test cihazında gerekli ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.8. Motor bearingi içyapısı

### 3.2. Metot

Bu çalışmada, 52100 çeliğinden (100Cr6) çeliğinden imal edilen, farklı ısıl işlem sıcaklıklarında tempemen belli işletme koşullarında çalışan iki farklı tip toplam altı rulmanın kalan faydalı ömürleri kestirimci bakım yöntemiyle analiz edildi.

Materyallerimizden biri olan yüksek sıcaklığa maruz motor bearingi için 3 adet alınmış ve her biri 750-800-850°C de ısıtılıp oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Aynı şekilde diğer materyalimiz olan yüksek torka maruz input modül rulmanı için 3 tane rulman alınmış ve tavlama sıcaklıkları 500-600-700°C olarak belirlendi. Bu sıcaklık değerleri Demir-sementit diyagramı referans alınarak seçildi. Demir-Sementit diyagramına göre 721°C üzerinde çelik östenitik yapıda bu değer altındaki sıcaklıklarda içindeki C miktarlarına göre perlit, ferrit veya sementit fazda bulunabilir.

Bu koşullar dikkate alınarak belirtilen sıcaklıkların hesaba katılması uygun görüldü. Farklı sıcaklık değerleri için ısıtma proses değerlendirilmesi ayrıca yapılabilir.

Bu kapsamda motor yanma odasında çalışan rulman genelde kullanıldıktan sonra gayriaktif durumda olduğundan ve test simülasyonu esnasında titreşim, sıcaklık, basınç, tork değerleri alamadığımızdan yanma odasına yani sıcaklığa en çok maruz olan 4 numaralı bearing materyal olarak seçilmiştir. Aynı şekilde input modül rulmanı motordan gelen yükün ilk uğradığı iletildiği yer olduğundan yüke en çok maruz olan transmisyon rulmanıdır ve bu tez çalışmasında materyal olarak seçilmiştir.

Bu rulmanlar 500 saat uçuş gerçekleştirdikten sonra uçuş esnasında üzerindeki gerilmeleri gidermek ve ömrüne etkisinin araştırılabilmesi için farklı sıcaklıklarda ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve ani bir şoklanmayla gayri aktif duruma düşmemesi için oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra tekrar helikopterde kullanılığın kullanılmadığının analizi için çeşitli testlere tabi tutuldu.

### **3.2.1. Sertlik testi**

Her rulmana 500 saat uçuş ve ısıtma işlemi sonrası sertlik değerleri kontrol edilmiş ve sertlik değerleri motor rulmanı için 58.8 HRC, transmisyon rulmanı için 61.3 HRC olarak ölçülmüştür. Bu değerler üretici firma teknik yayını olan NAVAIR-01-1A-503 dokümanındaki limit değerleri arasında kabul edilebilir değerler arasında olduğu görülmüştür. Input modül rulmanı için Şekil 3.9’da gösterilen sertlik ölçüm düzeneği ve prosedürleri uygulanmış, motor rulmanı içinse Şekil 3.10’da ısıtma-soğutma sonrası yüzey sertliğindeki ölçüm verilmiştir. Ölçümlerin bu standart aralıkta kalması, rulmanların ısıtma işlemi sonrası da görev yapabilir nitelikte olduğunu gösterse de tez kapsamında ilerleyen bölümlerde titreşim analizi, mikroyapı incelemesi ve yağ analizi gibi ek testler de yapılarak rulmanların gerçek operasyon koşullarındaki davranışı ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir.



Şekil 3.9. İnut modül bearingi sertlik değeri



Şekil 3.10. Motor bearingi sertlik değeri

### 3.2.2. Isıl işlem farklılıklarının belirlenmesi

Her iki bearing farklı çalışma koşullarında çalıştıkları için sertlik ve et kalınlıkları farklıdır. Bu kapsamda imalat aşamasında farklı ısıl işleme tabi tutulmuş olan bearingler imal edilip 500 saat hava aracında kullanıldıktan sonra sırasıyla motor

bearingi için 850° C-800° C-750°C sıcaklıklarında; yüksek torka maruz input modül bearingi için 500-600-700°C sıcaklıklarında fırınlanıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.Yapılan bu ısı işlemlerin temel amacı rulmanların mikroyapısal özellikleri ,sertlik ve dolayısıyla kalan faydalı ömrü üzerindeki etkisini belirleyerek optimum ısı işlem koşullarını ve buna bağlı kestirimci bakım stratejilerini geliştirmeye yönelik bilimsel temel oluşturmaktır.Böylece, rulmanların endüstriyel uygulamalarda daha uzun ömürlü ve güvenilir çalışabilmesi için gerekli olan üretim ve bakım parametreleri sistematik olarak analiz edilmiş olacaktır.

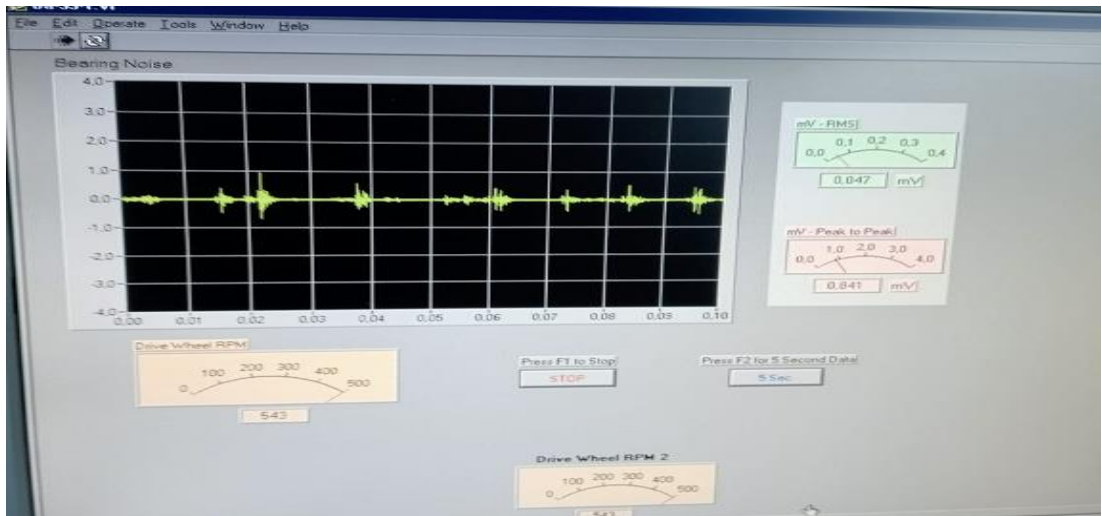
### **3.2.3. Titreşim testi**

Her iki materyal farklı ısı işlem prosedürlerine tabi tutulduktan sonra hava aracındaki çalışma şartları simüle edilerek analazier test cihazına bağlanmış ve yüksek devirde vuruntulu ya da gürültülü çalışıp çalışmadığı değerlendirilmiştir. Bu testle input modül bearingi ve motor bearingi gibi farklı çalışma koşullarına maruz kalan rulmanların ısı işlem sonrası titreşim özelliklerini ölçerek, olası rezonans, yapısal bozulma ve titreşim genliklerindeki değişimleri belirlemek ve bu veriler üzerinden kalan faydalı ömür kestirimine yönelik temel verileri elde etmektir.Şekil 3.11 ‘de input modül bearinginin titreşim testi, Şekil 3.8 ‘de motor bearinginin titreşim testi ve Şekil 3.12’ de ısı işlem sonrası değişime uğrayan motor bearinginin titreşim testi görsel olarak verildi.



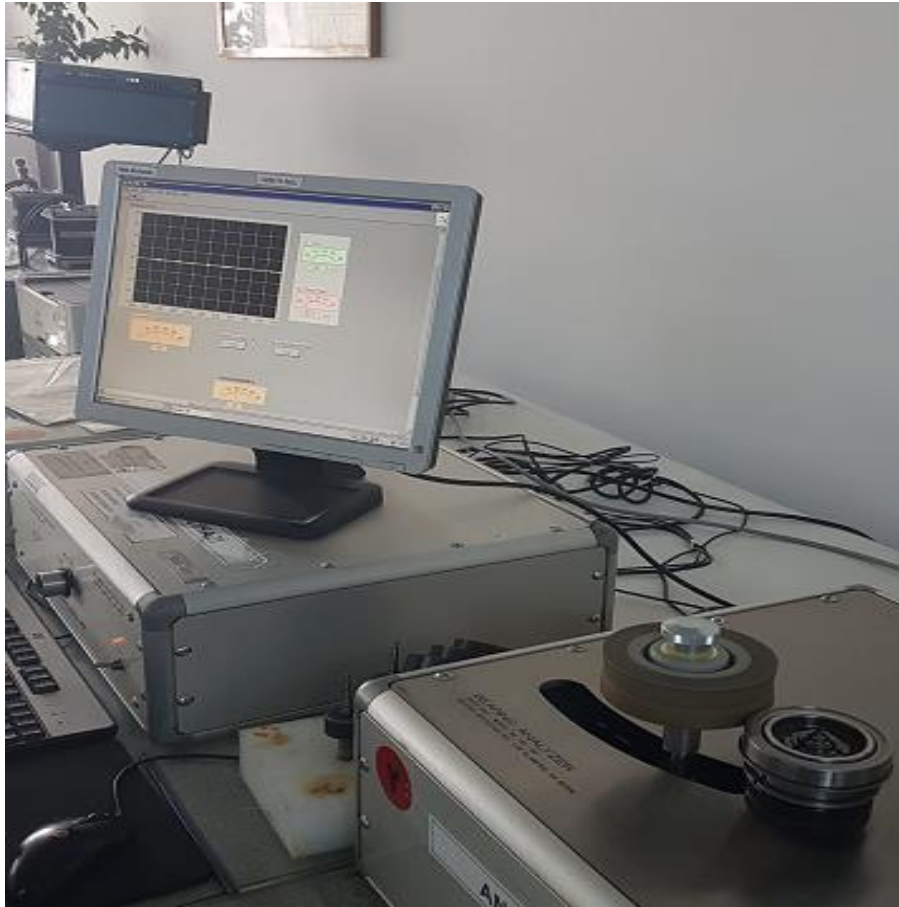
Şekil 3.11. Input modül bearingi titreşim testi

Şekil 3.11’de gösterilen input modül rulman titreşim testi, input modül rulmanın belirlenen çalışma ve ısıl işlem koşulları altında faal olduğunu,yani normal titreşim aralıkları içerisinde çalıştığını ve dolayısıyla kalan faydalı ömrünün kestirimine uygun olduğunu doğrulamaktadır.Böylece titreşim testleri, kestirimci bakım stratejilerinin oluşturulmasında önemli bir rol oynar,çünkü rulmanın dinamik performansının izlenmesi,arıza risklerinin erken tespiti ve optimum bakım zamanlamasının belirlenmesine yardımcı olur.



Şekil 3.12. Motor bearingi titreşim testi

Şekil 3.12’de verilen motor rulmanı titreşim testinin temel amacı, motor rulmanının ve uygulanan ısıl işlem prosedürlerinden sonra dinamik performanslarının ne kadar etkilendiğini, dolayısıyla kullanım ömürlerinin azalıp azalmadığını belirlemektir. Yapılan titreşim test cihazı simülasyonlarında, ilk motor bearinginin titreşim ölçümleri (Şekil 3.12) normal çalışma sınırlarının dışına çıkarak, anormal titreşim genlikleri ve engesizlik göstergeleri nedeniyle gayrifaal durumda olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç motor rulmanının 500 saat uçuş ve sonrasında uygulanan ısıl işlem prosedürlerinin rulmanın yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle mevcut motor rulmanı 500 saat uçuş gerçekleştirmiş farklı bir motor rulmanı ile değiştirilmiş ve değiştirilen motor rulmanına aynı ısıl işlem prosedürleri uygulanmıştır. Yeniden gerçekleştirilen titreşim testi sonucunda (Şekil 3.13 bakınız) değiştirilen motor rulmanının 500 saat uçuş ve ilgili ısıl işlem prosedürleri sonunda faal olduğu gözlemlenmiştir. Böylece bu çalışma, ısıl işlem ve uzun süreli kullanımın motor rulmanı üzerindeki etkilerini ölçerek arıza öngörüsü ve kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkı sağlamayı amaçlamaktadır.



Şekil 3.13. Değiştirilen motor bearingi titreşim testi

### 3.2.4. İ ap-dış çap ölçümü

Her iki rulman 500 saat uçup ve ısıl işleme tabi tutulduğu için çap ölçülerinde bi değişiklik olup olmadığına karar vermek için tekrar hava aracına takılmadan önce CMM test cihazında çap ölçüleri ölçülmüş ve ilgili teknik yayına göre kontrol edilmiştir.

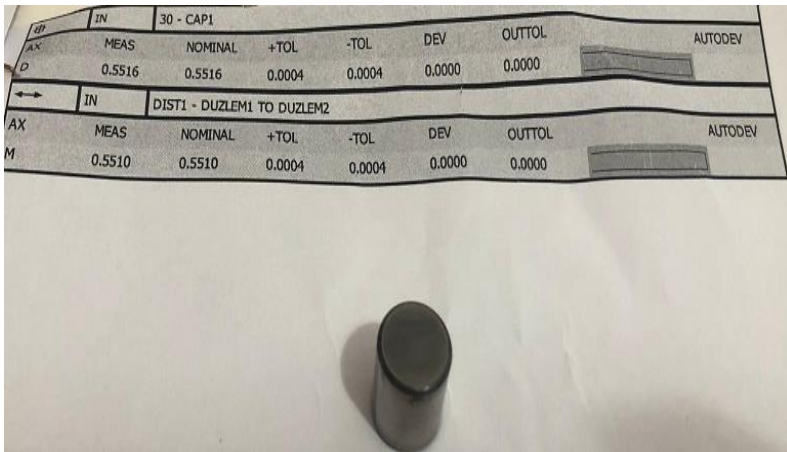
Coordinate Measurement Machines (CMM) baş harflerinden oluşmaktadır. Kartezyen koordinata göre ölçüm yapabilen, X-Y-Z eksenlerine göre hareket edebilen proba bağlı kafası kendi ekseninde 360 derece dönebilen, 1 micron hatta daha altında hassasiyetle ölçüm yapabilen çok boyutlu bir ölçme cihazıdır.

Bu çalışmada CMM test cihazı kullanılarak rulmanların geometrik boyutları ve toleransları detaylı olarak ölçüldü. Bu ölçümler, rulmanların iç ve dış çapları, düzlemsellik ve diğer kritik geometrik özelliklerinin ısıl işlem sonrası meydana gelen değişimleri ortaya koymak amacıyla gerçekleştirildi. Ölçüm işlemi sırasında, rulman örnekleri CMM cihazına yerleştirilmiş, cihazın otomatik kinematik ölçüm başlıkları aracılığıyla hassas ölçümler alınmıştır. Şekil 3.14'da gösterilen dış kafes çap ölçümü ve Şekil 3.15'deki masura çap ölçümü gibi örnekler, cihazın nasıl çalıştığını ve hangi parametrelerin değerlendirildiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu yöntem, rulmanların mikro yapısal bozulmalarının ve geometrik sapmalarının belirlenmesinde güvenilir veri sağlamakta olup, elde edilen ölçüm sonuçları, rulmanların kalan faydalı ömrü ile kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır.



Şekil 3.14. İnut modül bearingi dış kafes çap ölçümü

Şekil 3.14’da verilen input modül rulmanının dış kafes çapı CMM cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Burada, cihazın hassas probu bearingin dış yüzeyini tarayarak dış kafesin çap değerini belirlemiş ve ölçüm sonuçları, nominal tasarım değerlerine yakın olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.15. İnut modül bearingi masura çap ölçümü

Şekil 3.15'te input modül bearinginin masura çapı için CMM cihazı ile detaylı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında, bearingin masura kısmının geometrik özellikleri taranmış ve belirlenen çapın, üretim toleransları dahilinde olduğu gözlemlenmiştir.

#	IN	22 - CAP1						
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	AUTODEV	
D	2.1652	2.1652	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		
#	IN	23 - CAP2						
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	AUTODEV	
D	2.4991	2.4991	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		
←→	IN	DIST1 - DUZLEM1 TO DUZLEM2						
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	AUTODEV	
M	0.8255	0.8255	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		



Şekil 3.16. İnpıt modül bearingi iç bilezik çap ölçümü

Şekil 3.16'de input modül bearinginin iç bilezik kısmı, CMM cihazı ile yüksek hassasiyette ölçülmüştür. Burada, cihazın probu iç yüzeyi titizlikle tarayarak, iç bilezik çapı ölçülmüş ve bu değerin tasarım kriterleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.


#	IN	6 - CAP1						AUTODEV
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL		
D	2.3397	2.3397	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		
#	IN	1 - CAP2						AUTODEV
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL		
D	2.9299	2.9299	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		
←→	IN	DIST1 - DUZLEM1 TO DUZLEM2						AUTODEV
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL		
M	0.5304	0.5304	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		



Şekil 3.17. Motor bearingi kafes ölçümü

Şekil 3.17’de verilen motor bearinginin kafes yapısı, CMM cihazı ile ölçüme tabi tutulmuştur. Bu ölçümde, bearingin kafes kısmının dış geometrisi detaylı şekilde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar, üretim toleranslarıyla uyumlu, hatasız bir kafes yapısının varlığını ortaya koymuştur.

#	IN	2 - CAP1						AUTODEV
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL		
D	1.9294	1.9294	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		
#	IN	3 - CAP2						AUTODEV
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL		
D	2.2353	2.2353	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		
←→	IN	DIST1 - DUZLEM1 TO DUZLEM2						AUTODEV
AX	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL		
M	0.6644	0.6644	0.0004	0.0004	0.0000	0.0000		



Şekil 3.18. Motor bearingi iç bilezik çap ölçümü

Şekil 3.18 de motor bearinginin iç bilezik çapı, CMM cihazı aracılığıyla hassas ölçüm yöntemi ile incelenmiştir. Ölçüm işlemi sonucunda, iç bilezik yüzeyinin çap değeri belirlenmiş; bu sonuç, bearingin iç bilezik yapısının stabilitesi ve tasarım gereksinimleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

### 3.3. Simülasyon ve Test Koşulları

Her iki bearing, özellikle tasarlanmış bir test bremzesinde monte edilmiştir. Bu test düzeneği, uçuş sırasında karşılaşılabilecek tork, sıcaklık ve titreşim, basınç koşullarını simüle etmek için kullanılmıştır. Test süreci boyunca, periyodik olarak titreşim, sıcaklık, basınç ve tork değerleri alınmıştır ve tablolaştırılmıştır. Bu veriler, bearinglerin anlık çalışma durumunu ve aşınma oranlarını değerlendirmek için kullanılmıştır.

### 3.4. Veri Toplama ve Analiz

Asağıda Tablo 3.1’de 850 °C de fırınlanmış motor bearingi için test bremzesinden alınan değerler, Tablo 3.2’de 800°C de fırınlanmış, Tablo 3.3’de ise 750 °C de fırınlanmış motor bearinglerinden alınan değerler verilmiştir. Tablo 4.1 de ise 500°C de fırınlanmış input modül bearingi, Tablo 4.2 de 600 °C de fırınlanmış input modül bearingi, Tablo 4.3 de ise 700 °C de fırınlanmış input modül bearinginden alınan veriler tablolaştırılmıştır. Referans değerleri olarak 1,5,8 ve 10. değerler alınmıştır. Referans değeri olarak 1,5,8 ve 10. değerlerinin alınmasının sebebi sistem yoğunluğundan dolayı aynı sistemde 3 input modül rulmanının denenmiş olmasıdır.

Tablo 3.1 de verilen 850°C de fırınlanmış motor rulmanı test değerleri incelendiğinde özellikle devir sayısında (örneğin, 91 devir artışı) belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, tork değerlerinde ve yağ dönüş sıcaklığında da yükselmeye neden olmuş, ancak titreşim değerleri önemli ölçüde değişmemiştir. Bu durum, 850°C’lik ısı işlemin motor bearinginin dinamik yükler altında tork ve termal davranışını etkilediğini, fakat titreşim parametresinin bearingin çalışma durumunu belirlemede kritik bir rol oynamadığını göstermektedir.

**Tablo 3.1.** Motor bearingi test değerleri (850°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (BAR)	Yağ Dönüş Sıcaklığı (C°)	Tork (Nm)	Devir (RPM)
1.861	0.67	132.85	275.14	40490
2.118	0.91	139.05	402.1	41960
1.475	1.20	146.80	533.24	43168
1.449	1.27	151.82	570.45	43668
1.698	1.30	156.59	590.98	44002

800°C’de fırınlanmış motor bearingi için alınan veriler 850°C’ye göre biraz daha düşük tork ve yağ dönüş sıcaklığı artışını yansıtmaktadır. Ölçülen devir ve diğer parametreler, bu sıcaklıkta ısıl işlemin etkisinin daha hafif olduğunu göstermekte, titreşim değerleri ise yine stabil kalmaktadır. Bu sonuçlar, 800°C’lik ısıl işlemin bearing performansını orta düzeyde etkilediğini ortaya koymaktadır. Tablo 3.2 de 800°C’de fırınlanmış motor rulmanı için alınan veriler tablolaştırılmıştır.

**Tablo 3.2.** Motor bearingi test değerleri (800°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (BAR)	Yağ Dönüş Sıcaklığı (C°)	Tork (Nm)	Devir (RPM)
0.492	0.69	131.40	269.57	40449
0.409	0.95	137.01	395.14	41960
1.013	1.17	145.67	500.19	43200
0.994	1.25	147.79	551.32	43731
1.031	1.31	155.21	577.41	44210

Tablo 3.3’te görüldüğü gibi 750°C’de fırınlanmış motor bearinglerinden elde edilen verilerde, devir, tork ve yağ dönüş sıcaklığındaki artış daha da düşüktür. Bu durum, 750°C’lik ısıl işlemin motor bearingi üzerindeki etkisinin daha az olduğunu ve bearingin mekanik özelliklerinin daha iyi korunduğunu göstermektedir. Titreşim değerleri ise bu sıcaklıkta da belirleyici bir parametre olarak değişiklik göstermemiştir.

**Tablo 3.3.** Motor bearingi test değerleri (750°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (BAR)	Yağ Dönüş Sıcaklığı (C°)	Tork (Nm)	Devir (RPM)
0.297	0.45	141.35	250.44	40918
2.998	0.56	153.83	345.75	42679
0.333	0.80	160.22	454.62	43929
0.331	1.01	165.99	562.11	44179
0.445	1.05	168.35	577.41	44492

Tablo 3.4 de verilen 500°C’de fırınlanmış input modül bearingi için yapılan ölçümler incelendiğinde daha düşük sıcaklık uygulaması sonucunda, tork ve yağ dönüş sıcaklığı değerleri daha düşük seviyelerdedir. Bu durum, 500°C’nin bearing üzerinde minimal ısıl işlem etkisi yarattığını ve dinamik performansın referans alınan norm değerleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

**Tablo 3.4.** İntput modül bearingi test değerleri (500°C )

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (BAR)	Yağ Çıkış Sıcaklığı (°C)	Tork ( Nm)
0.0148	46.3	45.9	33.3
0.0172	52.4	76.00	177.4
0.0178	53.9	87.3	178.1
0.0283	54.7	90.00	176.6

600°C’de fırınlanmış input modül bearinginde, 500°C’ye göre tork ve yağ dönüş sıcaklığı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak, titreşim parametrelerinde önemli bir değişiklik saptanmamıştır. Bu, artan ısı işlem sıcaklığının bearingin mekanik yük taşıma kapasitesini (özellikle tork ve termal davranışı) etkilediğini, ancak titreşim performansının bundan bağımsız kaldığını göstermektedir.(Bakınız Tablo 3.5)

**Tablo 3.5.** İntput modül bearingi test değerleri (600°C )

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (BAR)	Yağ Çıkış Sıcaklığı (°C)	Tork ( Nm)
0.0373	55.2	89.8	175.9
0.0475	54.5	90.8	252.0
0.0550	54.3	92.8	251.3
0.0579	56.1	93.3	251.3

700°C’de fırınlanmış input modül bearingi için alınan test verilerinde, tork ve yağ dönüş sıcaklığı değerlerindeki artış daha da belirgin hale gelmiştir. Buna karşın, titreşim ölçümleri kritik bir parametre olarak öne çıkmamış ve stabil kalmıştır. Bu sonuç, 700°C’lik ısı işlem bearing üzerindeki termal ve mekanik yük etkilerini artırırken, titreşim değerlerinin bearing performans değerlendirmesinde belirleyici olmadığını doğrulamaktadır.

**Tablo 3.6.** İntput modül bearingi test değerleri (700°C )

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (bar)	Yağ Çıkış Sıcaklığı (°C)	Tork ( Nm)
0.0669	55.2	94.7	314.1
0.0703	56.00	95.2	377.6
0.0815	54.4	95.7	377.6
0.0881	55.3	93.2	175.9

Özetle, bu verilerin toplanma amacı, farklı ısı işlem sıcaklıklarının bearinglerin dinamik (tork, yağ dönüş sıcaklığı) ve geometrik performansları üzerindeki etkilerini sistematik olarak ortaya koymaktır. Özellikle Tablo 3.1’de görüldüğü gibi, devir artışı

(örneğin 91 artış) tork ve termal değerleri yükseltirken, titreşim değerlerinin sabit kalması, titreşimin bearingin kullanım ömrünü belirlemede kritik bir parametre olmadığını göstermektedir. Bu tablolar, ısıl işlem sonrası bearinglerin kalan faydalı ömürlerini kestirimci bakım yöntemleri ile değerlendirmede temel veri setini oluşturmaktadır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Bulgular

Uçuş süresi tamamlanmış motor ve input modül bearinglerinin performanslarının değerlendirilmesi sürecinde elde edilen veriler, rulmanların ısıtılma ve kullanım sonrası dinamik davranışlarının anlaşılmasına yönelik önemli ipuçları sunmuştur. Tüm testler (titreşim, tork, sıcaklık ve basınç ölçümleri) tamamlandıktan sonra, bearingler ısıtılma sıcaklığına ve kullanım alanına uygun olarak ambalajlanmış ve ilk montaja hazır hale getirilmiştir. Belirlenen montaj numarası ile bearinglerin uçuş süreleri sistematik olarak takip edilmiş, rutin ve zorunlu bakım işlemleri dışında ayrıca herhangi bir müdahale yapılmamıştır. Rulman, ömrünü tamamlayana ve HEK raporu verilene kadar uçuş için kullanılmaya devam edilmiştir. Bu süreç, bearinglerin gerçek kullanım koşulları altındaki davranışını ve kalan faydalı ömürlerini kestirimci bakım yöntemleriyle değerlendirme amacını ortaya koymaktadır.

#### 4.1.1. Isıtılma sıcaklığının rulman ömrüne etkisinin değerlendirilmesi

850° C 'de fırınlanan motor rulmanının kullanıma hazır ilk hali Şekil 4.1'de verildi. Tüm testler tamamlandıktan sonra ambalajlanan rulman, ısıtılma sıcaklığı ve kullanım alanına göre ambalajlanarak ilk montaja hazır hale getirilmektedir. Belirlenen montaj numarasıyla birlikte rulmanının uçuş süresi takip edilir. Rutin ve zorunlu bakımlar haricinde ayrıca bir işleme tabi tutulmaz. Rulman ömrünü tamamlayana kadar yani hek raporu verilene kadar uçuş için kullanılmaya devam edeceği anlaşıldı.



Şekil 4.1. 850°C'de fırınlanmış motor bearingi

850 C'lik tavlama sıcaklığında fırınlanan motor rulmanına ait bakım proses adımları Tablo 4.1'de verildi. Belirlenen bu sıcaklıkta 500 saatlik uçuş sonunda rutin bakım sonucunda bu rulmanın uçuş için uygun olduğu belirlendi Bu durum, rulmanı kullanılabilir (Faal) olarak yeniden sisteme monte edileceği anlamına gelmektedir. Ancak 300 saatlik uçuş sonunda korozyon olduğu gözlemlendiğinden rulman ömrünün tamamlandığı (Hek) görüldü.

**Tablo 4.1.** 850°C'de fırınlanmış motor bearingi ömür izlenimi

Rulman No	0001	Bakım periyodu	Rulman durumu
Üretim Yılı	2021	500 Saatlik rutin bakım	Faal
Isıl işlem sıcaklığı	850 °C	800 Saatlik zaruri bakım	Hek

800° C'de fırınlanan motor rulmanın kullanıma hazır ilk hali Şekil 4.2'de gösterilmektedir. 500 saat uçuşunu tamamlayan ve ısıl işleme tabi tutulan bu rulman kullanıma hazır olacak şekilde motor yağıyla yağlandı ve vakumlu ambalaj makinasıyla ambalajlandı. Daha sonra hava aracına takıldı ve 2410 formlarından ömürleri takip edildi.



**Şekil 4.2.** 800°C'de fırınlanmış motor bearingi

**Tablo 4.2.** 800°C’de fırınlanmış motor bearingi ömür izlenimi

Rulman No	0002	Bakım periyodu	Rulman durumu
Üretim Yılı	2021	500 Saatlik rutin bakım Motor Kontrolleri (800 Saat)	Faal Faal
Isıl işlem sıcaklığı	800 °C	1000 Saatlik rutin bakım	Hek

Tablo 4.2’ de de görüldüğü üzere 800° C de fırınlanan ON115 seri numaralı motor rulmanı 500 saat uçuş gerçekleştirdikten sonra görülen lüzüm üzerine motor kontrolleri için tekrar kontrol edildi ve faal olduğu görüldü. Daha sonra 1000 saatlik rutin kontrole geldiğinde tahribatsız muayene sonucunda süreksizlik olduğu görüldü ve hek edildi.

750° C ‘de fırınlanan N4029 seri numaralı motor rulmanının kullanıma hazır hali Şekil 4.3 gösterilmiştir.500 saat uçuşu gerçekleştikten sonra 750° C ‘de fırınlanan bu rulman kontrol edildikten hava aracında tekrar kullanılabilir olduğu görüldü ve motor yağıyla yağlanıp ambalajlandıktan sonra hava aracına takılmak üzere motor ayölyesine gönderildi ve ömür takibi FORM 2410 belgelerinden takip edildi.



**Şekil 4.3.** 750°C’de fırınlanmış motor bearingi

**Tablo 4.3.** 750°C’de fırınlanmış motor bearingi ömür izlenimi

Rulman No	0003	Bakım periyodu	Rulman durumu
Üretim Yılı	2021	500 Saatlik rutin bakım 700 Saatlik Zaruri Bakım	Faal Faal
Isıl işlem sıcaklığı	750 °C	1000 Saatlik rutin bakım 1100 Saatlik Zaruri Bakım	Faal Hek

750°C fırınlanan N4029 seri numaralı motor rulmanı hava aracına takıldıktan sonra ömür takibi Tablo 4.3 de verilmiştir. Bu rulmanın 500 saatlik uçuşu sonrası rutin olarak geldiği kontroller sonucu faal olduğu görüldü. Daha sonra hava aracında yaşanan güç düşüklüğü nedeniyle 200 saat sonra tekrar kontrol edildi ve rulmanın hala faal olduğu tespit edildi. 300 saat sonra hava aracında yaşanan güç düşüklüğünün devam etmesi münasebetiyle tekrar kontrol edildi ve faal olduğu yani yaşanan güç düşüklüğünün rulman sebebiyetinden dolayı olmadığı görüldü. Ve son olarak rulman 100 saat uçtuktan sonra yani toplam 1100 saatte hava aracının sert inişinden dolayı kontrol edildi ve yüksek korozyona uğradığı görüldüğünden gayrifaal (hek) olduğu tespit edildi.

700 C'lik tavlama sıcaklığında fırınlanan yüksek torkda çalışan 7977 seri numaralı input modül rulmanın kullanıma hazır hali Şekil 4.4 de verilmiştir. Bu rulman motor rulmanları gibi ısı işleme tabi tutulduktan sonra kontrol edildi ve yağlanıp ambalajlandıktan sonra hava aracına takılmak üzere transmission atölyesine gönderildi ve ömür bilgileri sicillerinden (FORM 2410) dan takip edildi.



Şekil 4.4. 700°C'de fırınlanmış input modül bearingi

**Tablo 4.4.** 700°C'de fırınlanmış input modül bearingi ömür izlenimi

Rulman No	0004	Bakım periyodu	Rulman durumu
Üretim Yılı	2021	500 Saatlik rutin bakım	Faal
Isıl işlem sıcaklığı	700 °C	800 Saatlik zaruri bakım	Hek

700°C fırınlanan 7977 seri numaralı input modül rulmanı hava aracına takıldıktan sonra ömür takibi Tablo 4.4 de verilmiştir. Bu rulmanın 500 saatlik uçuşu sonrası rutin olarak geldiği kontroller sonucu faal olduğu görüldü. Daha sonra hava aracı 300 saat uçtuktan sonra aşırı titreşimden dolayı arıza verdi ve rulman tekrar kontrol edildi. Kontrol esnasında rulmanın çalıştığı input modül sisteminden alınan yağ numunesinde demir oranının aşırı yüksek olduğu görüldü ve T raporu verildi. (UÇMAYINIZ, ÇALIŞTIRMAYINIZ). Böylece 700 °C fırınlanan 7977 seri numaralı input modül rulmanının toplam 800 saatte ömrünü tamamladığı görüldü.

600° C’de ısı işleme tabi tutulup oda ortamında soğumaya bırakılan 10122 seri numaralı input modül rulmanının kullanıma hazır hali Şekil 4.5 de gösterilmiştir. Tüm kontrollerden geçtikten sonra rulmanın faal olduğu görüldü ve hava aracına takılmak üzere ilgili atölyesine gönderildi. Ömürleri takip edildi.



**Şekil 4.5.** 600°C’de fırınlanmış input modül bearingi

**Tablo 4.5.** 600°C’de fırınlanmış input modül bearingi ömür izlenimi

Rulman No	0005	Bakım periyodu	Rulman durumu
Üretim Yılı	2021	500 Saatlik Rutin bakım	<b>Faal</b>
		700 Saatlik Zaruri Bakım	<b>Faal</b>
Isıl işlem sıcaklığı	600°C	900 Saatlik Zaruri bakım	<b>Hek</b>

Tablo 4.5’de de görüldüğü üzere 600° C de fırınlanan 10122 seri numaralı input modül rulmanı 500 saat uçuş gerçekleştirdikten rutin bakım için kontrol edildi ve kullanılabilir olduğu görüldü. Daha sonra 200 saat daha uçuş gerçekleştiren bu rulman hava aracının kalkış esnasında kuyruk palini tele taktığından dolayı zaruri olarak kontrol edildi ve hala faal olduğu tespit edilip ambalajlanarak tekrar kullanılmak üzere hava aracına takıldı.200 saat daha uçuş gerçekleştiren rulman hava aracı titreşiminden dolayı kontrole geldiğinde korozyona uğradığı görüldü ve hek edildi.

500° C ‘de ısıl işleme tabi tutulup oda ortamında soğumaya bırakılan 7943 seri numaralı input modül rulmanının kullanıma hazır hali Şekil 4.6 de gösterilmiştir. Tüm kontrollerden geçtikten sonra rulmanın faal olduğu görüldü ve hava aracına takılmak üzere ilgili atölyesine gönderildi. Ömürleri takip edildi.



**Şekil 4.6.** 500°C’de fırınlanmış input modül bearingi

**Tablo 4.6.** 500°C’de fırınlanmış input modül bearingi ömür izlenimi

Rulman No	0006	Bakım periyodu	Rulman durumu
Üretim Yılı	2021	500 Saatlik Rutin bakım	<b>Faal</b>
		750 Saatlik Zaruri Bakım	<b>Faal</b>
Isıl işlem sıcaklığı	500°C	1000 Saatlik Zaruri bakım	<b>Hek</b>

500° C de fırınlanan 7943 seri numaralı input modül rulmanına ait ömür izlenimi tablolaştırılmış ve Tablo 4.6 da gösterilmiştir. Rulmanın 500 saatlik rutin kontroller sonucu faal olduğu görüldü. Daha sonra 250 saatlik bir uçuş daha gerçekleştiren bu rulman hava aracında oluşan bir arıza sonucu 750 saat sonunda zaruri olarak tekrar kontrol edildi ve hala kullanılabilir olduğu görüldü.1000 saat sonunda rutin kontrole gelen rulman da deformasyon tespit edildi ve ömrünü tamamladığı görüldü.

#### **4.1.2. Isıl işlem sıcaklığının titreşim ve tork değerlerine etkisinin değerlendirilmesi**

Bu çalışma yurt dışından temin edilen, temini uzun zaman alan (Ortalama 200 gün) ayrıca maliyeti yüksek olan (motor bearingi:1294 \$ ve input modül bearingi:1320 \$) iki farklı rulmanın kalan faydalı ömrüne ısıl işlemin etkisini incelemek için yapılmıştır.

Rulmanlar hava aracına takılı olarak 500 saat uçtuktan sonra içindeki gerilimleri minimize etmek için farklı sıcaklıklarda ısıtılıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

Yapılan işlemlerin ardından yüksek sıcaklıkta çalışan motor bearingi için ısıl işlem sıcaklığı 850-800-750°C olarak, yüksek torka maruz input modül bearingleri için ısıl işlem sıcaklığı 700-600-500°C olarak belirlenmiştir.

Bu iki rulman farklı sıcaklıklarda fırınlandıktan sonra faal ya da gayri faal olduğunu anlamak için çeşitli testlerden geçmişlerdir. Öncelikle görsel olarak rulmanlarda çizik, çentik, korozyon, deformasyon, kırık, çatlak, oksidasyon, vuruntulu çalışma olup olmadığı izlenmiştir. Daha sonra sırasıyla sertlik, titreşim, iç-dış çap, tahribatsız muayene gibi kontrollerden geçmişlerdir. Yapılan kontroller sonucunda input modül bearinglerinin faal olduğu, motor bearinglerinin ise sadece 850 °C de fırınlanan bearingin gayri faal olduğu tespit edilmiştir. 850°C de fırınlanan motor bearingi başka bir 500 saat uçmuş bearingle değiştirilmiş ve 850 °C de tekrar ısıtılıp soğumaya bırakılmıştır.

Daha sonra, farklı sıcaklıklarda fırınlanıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılan bu 6 tane rulman hava aracı üzerindeki çalışma koşullarının simüle edildiği test bremzelerinde, kullanıldığı ilgili komponente takılmış ve teste tabi tutulmuşlardır. Motor bearingleri farklı T700 motorlarında, input modül bearingleri ise iş yoğunluğundan dolayı aynı sistemde teste tabi tutulmuşlardır. Test esnasında belirli aralıklarla yağ analizi, titreşim-sıcaklık-basınç ve tork değerleri alınmış ve geçmişten gelen FORM 2410'ları değerlendirilerek bir yorumlama yapılmıştır.

Öncelikle bu bearinglerin toplam ömürleri S70 A helikopteri Ömürlü Parça Listesinde (ÖPL) 1200 saat olarak verilmiştir.

**Tablo 4.7.** Motor bearingi test değerleri (850°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (PSI)	Yağ Dönüş Sıcaklığı (F°)	Tork (Feet Libre)	Devir (RPM)
1.861	9.804	271.137	202.933	40490
2.118	13.297	282.296	296.574	41960
1.475	17.497	296.245	393.294	43168
1.449	18.547	305.283	420.745	43668
1.698	18.901	313.875	435.882	44002

Tablo 4.7’de test verileri verilen 850°C de fırınlanan motor bearinginin 800 saat sonra kullanılamaz olduğu FORM 2410 test değerlerindeki titreşim değerlerinden anlaşılmaktadır. Motor bearingi için max titreşim değeri 1.5 inch per second olarak ilgili teknik yayında verilmiştir. Hakeza motor devri 41960 RPM iken 2.118 ips olan titreşim değeri devir artırılıp 43168 RPM e getirildiğinde düşüş göstererek 1.475 e gerilemiştir. Sonra devir artırılınca tekrar titreşim değerinin arttığı görülmüştür. Bu süreksizlikten dolayı 850°C de fırınlanan motor bearingi 800 saat te hek edilmiştir.

**Tablo 4.8.** Motor bearingi test değerleri (800°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (PSI)	Yağ Dönüş Sıcaklığı (F°)	Tork (Feet Libre)	Devir (RPM)
0.492	10.040	268.529	198.828	40449
0.409	13.887	278.627	291.443	41960
1.013	17.037	294.223	368.922	43200
0.994	18.193	298.038	406.635	43731
1.031	19.125	311.390	425.876	44.210

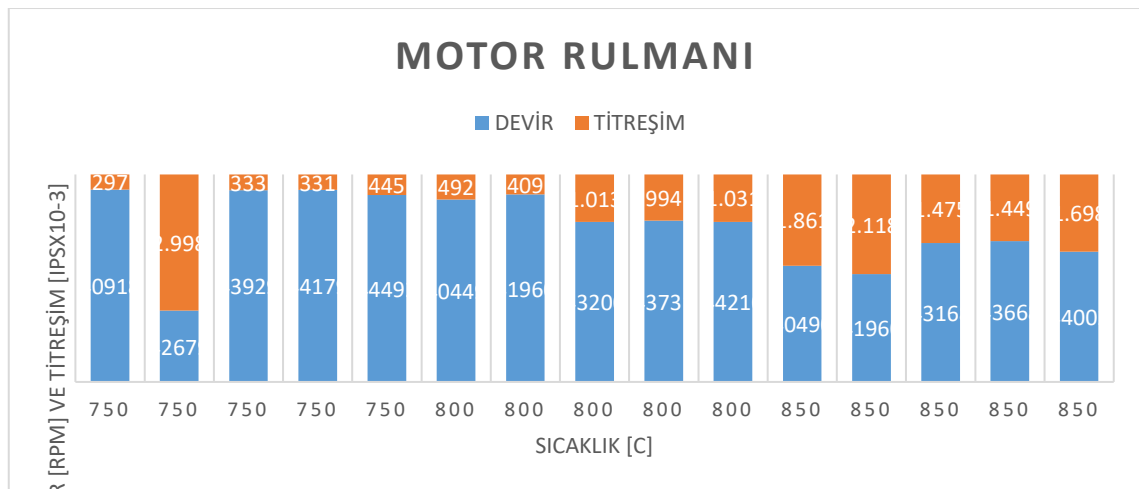
Aynı şekilde Tablo 4.8’de verilen 800°C de fırınlanan motor bearinginin performansları incelendiğinde 850°C’lik örneğe göre hafif bir iyileşme göstermiş; bu bearing de ilk kullanım döneminde operatif olup, belirli bir uçuş süresi sonunda performansında düşüş yaşanarak ömrünü tamamladığı saptanmıştır 1000 saatte gayri faale düştüğü görülmüştür. Aynı şekilde devir 41960 RPM iken 0.409 olan titreşim değeri devir 43200 iken orantısız artmış 1.13 olmuştur. Motor bremzeden gecmemiş ve tekrar sökölüp aksesuarları ilgili atölyelere gönderildiğinde 800°C de fırınlanan motor rulmanında limit dışı vuruntulu çalışma tespit edilmiştir. Bu yüzden bearing 1000 saatte hek edilmiştir.

**Tablo 4.9.** Motor bearingi test değerleri (750°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (PSI)	Yağ Dönüş Sıcaklığı (F°)	Tork (Feet Libre)	Devir (RPM)
0.297	6.654	286.443	184.717	40918
2.998	8.176	308.894	255.013	42679
0.333	11.669	320.398	335.313	43929
0.331	14.701	330.786	414.588	44179
0.445	15.279	335.031	425.876	44492

750°C de fırınlanan 4 numaralı motor bearinginin performans değerleri Tablo 5.3 de verilmiştir. Rulmanın performans değerleri incelendiğinde daha düşük ısıl işlem sıcaklığında işlem gördüğü için mekanik özelliklerini daha iyi koruduğu görülmüş; ölçümler, ilk 500 saat boyunca bearingin stabil çalıştığını, ancak uzun süreli kullanımdan sonra yine belirgin aşınma izlerinin oluştuğu görülmüştür. Nitekim 40918 RPM devirde 0.297 IPS olan titreşim değeri 42679 RPM devirde orantısız artarak 2.998 e kadar ulaştığı Tablo 5.3 de görülmüştür.

Titreşim değerinin orantısız bir şekilde artması rulmanın yüksek korozyondan dolayı ve penenrant sıvısıyla muayenede çatlak görüldüğü için hek edilmesini destekler. Rulmanın FORM 2410 ları incelendiğinde takıldığı T700 motorunun 700 saatte motorun güç düşüklüğü yasadığı ve uçup geldikten sonra 1000 saatte tekrar güç düşüklüğü olduğu görülmüştür. Bu sebeple ilgili kompenantları tekrar atölyelerine gönderildiğinde 4 numaralı bearingin 1000 saat uçtuktan sonra faal olduğu güç düşüklüğünün motora yakıt veren HMU dan dolayı olduğu görülmüştür. Aynı bearing aynı hava aracına takıldıktan 100 saat sonra hava aracı sert iniş yapmış ve bearing 1100 saatte kontrole geldiğinde içerisinde çatlak olduğu penenrant sıvısıyla anlaşılmıştır. Nitekim rulman hek edilmiştir.

**Şekil 4.7.** Motor rulmanı test değerleri

Farklı sıcaklıklarda fırınlanan 3 adet motor rulmanı için Devir-Titreşim ve Sıcaklık değerleri grafik haline getirilmiş ve Şekil 4.7’de grafik halinde gösterilmiştir. Bu grafiğe göre 850°C de fırınlanan rulmanın testinde bazı ölçümler kritik titreşim değerini aştığı görülmektedir.800°C de fırınlanan rulmanın titreşim değerleri düşük olsa da ömründe bir düşüş olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin sistemdeki başka yıpranmaların olduğu değerlendirilmektedir. 750°C de fırınlanan motor rulmanının titreşim değerleri kısmen diğerlerine göre daha düşük fakat bir aşırı değer dışında diğerlerine göre daha ideal olduğu görülmektedir. Her üç motor rulmanında yağ dönüş basıncı ve tork değerleri kritik eşğin altında kalmaktadır.

Genel olarak baktığımızda farklı sıcaklıklarda fırınlanan 1200 saat ömrü olan motor bearingleri için;

750°C, 800°C, 850°C ‘lik sıcaklıklarda fırınlanan bearinglerin 1200 saat ömrünü dahi tamamlayamadığı görülmüştür. Bu sebeple 100 Cr6 (52100 Çeliği)’nin imal edilmiş motor bearingleri için 750°C, 800°C, 850°C sıcaklıklarda fırınlama işleminin uygun olmadığı değerlendirilmektedir. Bu sıcaklıklar içinde aynı çalışma şartlarında 750°C sıcaklık fırınlama işleminin (Toplam Ömür:1100 saat, Kalan Ömür 600 Saat) uygulamalara göre daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Titreşim değerleri olarak her üç motor rulmanının titreşim değerlerini incelediğimizde 1 IPS değerini referans değeri olarak alabiliriz.1 IPS altında olan titreşim değerleri kullanıma uygun olurken 1 IPS den fazla olan titreşim değerleri havacılık ve uçuş güvenliği adına kullanıma uygun olmadığı değerlendirilmektedir.

**Tablo 4.10.** İntput modül bearingi test değerleri (500°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (BAR)	Yağ Çıkış Sıcaklığı (°C)	Tork ( Nm)
0.0148	46.3	45.9	33.3
0.0172	52.4	76.00	177.4
0.0178	53.9	87.3	178.1
0.0283	54.7	90.00	176.6

Tablo 4.10’da verilen 500° de fırınlanan input modül bearingini test değerlerini incelediğimizde titreşim değerlerinin gayet uygun olduğu görülmektedir. Fakat 90°C lik yağ çıkış sıcaklığında 500° de fırınlanan input modül bearinginin normale göre daha fazla ısındığı tespit edilmiş bu yüzden FORM 2410 ‘unda da belirtildiği gibi 1000 saatlik uçuş sonrasında gayri faale düşmüştür.

**Tablo 4.11.** İntput modül bearingi test değerleri (600°C)

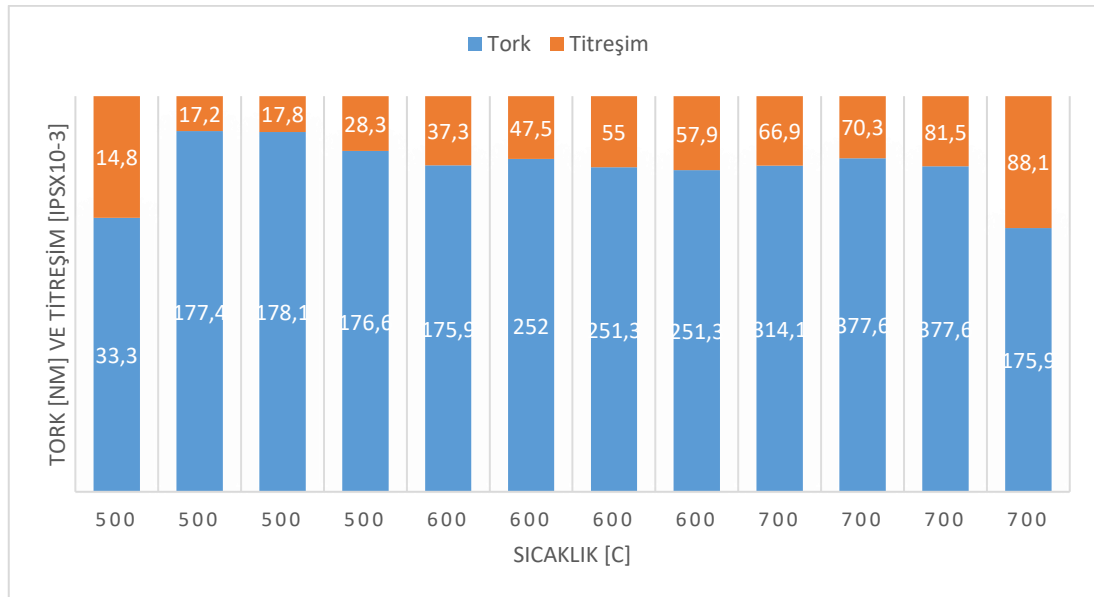
Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (BAR)	Yağ Çıkış Sıcaklığı (°C)	Tork ( Nm)
0.0373	55.2	89.8	175.9
0.0475	54.5	90.8	252.0
0.0550	54.3	92.8	251.3
0.0579	56.1	93.3	251.3

Tablo 4.11’de verilen 600°C de fırınlanan İntput modül bearinginin test değerlerini incelediğimizde 500 °C ye göre titreşim değerinin arttığı fakat artmasına rağmen limit içerisinde olduğu fakat hava aracı test uçuşu sırasında titreşim yaptığından dolayı 900 saatte korozyondan dolayı gayri faale düştüğünü görülmüştür.

**Tablo 4. 12.** İntput modül bearingi test değerleri (700°C)

Titreşim (IPS)	Yağ Dönüş Basıncı (bar)	Yağ Çıkış Sıcaklığı (°C)	Tork ( Nm)
0.0669	55.2	94.7	314.1
0.0703	56.00	95.2	377.6
0.0815	54.4	95.7	377.6
0.0881	55.3	93.2	175.9

Tablo 4.13’te 700° de fırınlanan input modül rulmanın test değerleri gösterilmiştir. İntput modül bearingindeki titreşim değerlerinin en fazla 700°C de fırınlanan bearingde olduğunu ve bearingin içinde olduğu yağdan alınan numunenin analiz raporunda FE oranının aşırı fazla olduğu ve T işleminin uygulanacağı görülmektedir. Bu yüzden 700°C de fırınlanan rulman 800 saatte hek olmuştur.

**Şekil 4.8.** İntput modül rulmanı test değerleri

Şekil 4.8’de grafik halinde verilen 3 input modül rulmanı için Titreşim-Tork-Sıcaklık değerleri incelendiğinde 500°C de fırınlanan rulmanın optimal performans sergilediği (düşük titreşim, stabil basınç, düşük tork) görülmektedir. 600 ve 700°C de fırınlanan input modül rulmanları için ise artan titreşim, sıcaklık, basınç ve tork değerleri artan termal ve mekanik gerilimlerin rulmanları ömrünü olumsuz etkilediği görülmektedir.

\*Farklı sıcaklıklarda fırınlanan input modül bearingleri için aynı şekilde 500°C, 600°C ve 700°C’lik sıcaklıklarda fırınlanan bearinglerin 1200 saat ömrünü tamamlayamadığı tespit edilmiştir. Bu sebeple yukarıda bahsedilen sıcaklıklarda ısı işleme tabi tutulmasının uygun olmadığı değerlendirilmektedir. Fakat 500 °C de ısıtılan bearingin test değerleri ve FORM-2410 de görülen ömür bilgileri diğer sıcaklıklara (600°C, 700°C’) göre daha uygun olduğu görülmüştür. Titreşim değerleri olarak her üç input modül rulmanının titreşim değerlerini incelediğimizde 0.01 IPS değerini referans değeri alınmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir. 0.01 IPS altında olan titreşim değerleri kullanıma uygun olurken, 0.01 IPS den fazla olan titreşim değerlerinin havacılık ve uçuş güvenliği için kullanıma uygun olmadığı değerlendirilmektedir.

Genel olarak her iki bearing tipi için düşük test sıcaklıklarında ölçülen parametreler nominal ömüre yakın değerler verirken sıcaklık arttıkça artan mekanik ve termal yük rulman ömrünü azaltıyor denilebilir.

Alternatif Yaklaşım: İntput modül bearinginin üretici firması SKF firması, motor bearinginin üretici firması GE ELECTRONİC firmasıdır. SKF firması kendi üretici kataloğunda input modül bearinginin ömrünü (Şekil 5.1);

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P}\right)^P \quad (4.1)$$

Formülü ile belirtmiştir. Bu formül milyon devir cinsinden input modül bearinginin ömrünü hesaplamamız için bize alternatif bir yaklaşım sağlar. Bu formülde;

L<sub>10</sub>: Milyon devir cinsinden temel ömür oranını (%90 güvenilir)

a<sub>1</sub>: Ömür Ayarlama Faktörü (ISO 281’e göre Tablo 3 sayfa 90 daki değerler)

a<sub>SKF</sub>: Ömür Dönüşüm Faktörü

C: Temel Dinamik Yük Oranı (kN)

P: Eşdeğer dinamik bearing yükü (kN)

p: Ball Bearing:3, Roller Bearing:1013

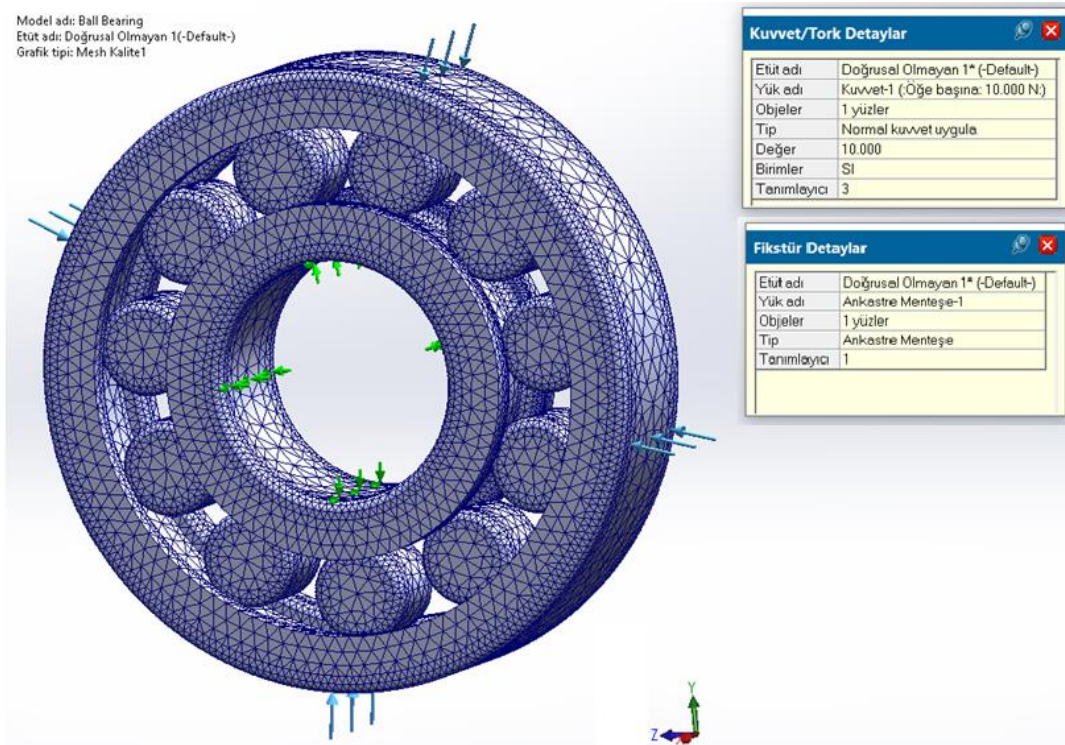
Bu çalışma, kestirimci bakım yöntemi kullanarak hava araçlarının parça beklemesinden kaynaklı olarak gayri faal kalma sürelerinin minimize edilmesini,

kullanılan bearinglerin ömürlerinin doğru tespit edilebilmesini ve bakım onarımdan kaynaklı maliyetlerin asgari düzeye indirilmesini amaçlamaktadır.

#### 4.1.3. Motor giriş rulmanının non-linear dinamik analizi ve simülasyonu

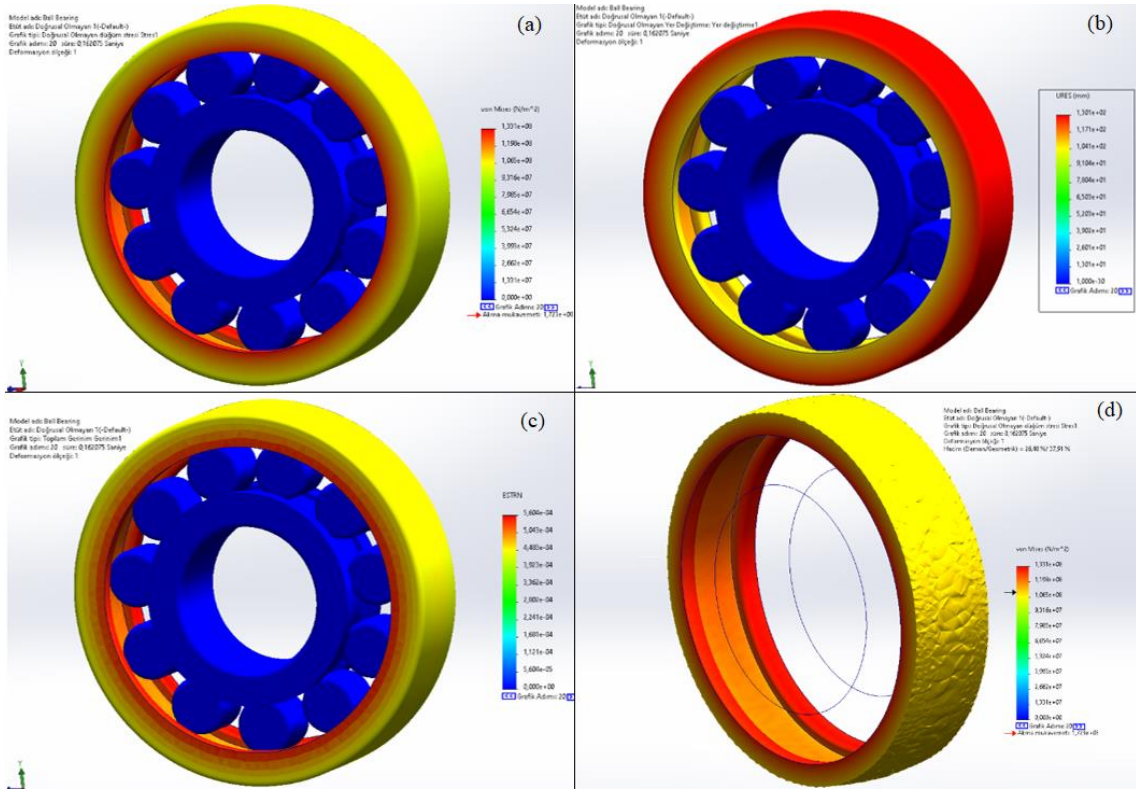
Bu kısımda, motorun giriş rulmanına ilişkin nonlinear dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında, rulmanın dış yüzeyine 10.000 N'luk kuvvet uygulanmış ve bu kuvvetin rulman üzerindeki davranışı incelenmiştir. Bu tür yüksek kuvvetli yüklemeler, özellikle yüksek hız ve yük koşullarında çalışan motorların rulman performans ve dayanıklılık değerlendirmelerinde kritik öneme sahiptir.

Analiz sırasında, rulmanın iç kısmında sabitleme yapılmış ve dış yüzeye uygulanan kuvvet sonucunda oluşan iç ve dış yüzeydeki deformasyonlar ve yer değiştirmeler detaylı olarak incelenmiştir. Analiz koşulları ve mesh yapısı, Şekil 4.9'da gösterildiği gibi belirlenmiş olup, elde edilen gerileme, yer değiştirme ve gerinim sonuçları Şekil 4.10 (a, b ve c)'de sunulmuştur. Ayrıca, dış yüzeydeki deformasyonlar, rulmanın elastik ve plastik sınırları içinde nasıl tepki verdiğini ve yük altında oluşan deformasyonların sınırlarını anlamada önemli bilgiler sağlar. Bu deformasyon dağılımları Şekil Y.d'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Analiz koşulları ve mesh yapısı

İç rulman yüzeyiyle dış yüzey arasındaki yer değiştirme ve deformasyonlar, rulmanın yükler altındaki davranışını ve dayanıklılığını değerlendirmede kritik veriler sunar. Bu sonuçlar, yüksek yük koşullarında rulmanların tasarımını optimize etmek ve ömrünü tahmin etmek açısından literatürde sıkça kullanılan analizlerle uyumludur. Ayrıca, deformasyonların analizi, rulmanın malzeme ve yapısal dayanıklılığıyla doğrudan ilişkilidir ve yüksek kuvvetler altında rulmanların sınırlarını anlamak için temel bilgiler sağlar.



**Şekil 4.10.** Analiz sonuçları a) gerilim, b) yer değiştirme c) gerinim ve d) deformasyon

Sonuç olarak, bu nonlinear dinamik analiz, motor giriş rulmanının yüksek kuvvetler altında mekanik performansını ve dayanıklılığını değerlendirmede önemli veriler sunmaktadır. Bu tür analizler, yüksek yük ve hız koşullarında rulmanların performansını optimize etmek ve bakım stratejilerini geliştirmek adına literatürde geniş yer tutmakta olup, modern makine tasarımı ve ömür tahmin modellerinde temel teknik araçlar olarak kullanılmaktadır.

## 4.2. Tartışma

Endüstriyel uygulamalarda rulmanlar, yüksek yük taşıma kapasitesi ve düşük sürtünme özellikleri sayesinde makine performansının ve verimliliğinin artırılmasında merkezi bir rol oynar. Ancak, rulmanlar uzun süreli kullanım, yüksek tork, yüksek sıcaklık ve titreşim gibi zorlu çalışma koşullarına maruz kaldığında, mikroyapısal değişiklikler ve aşınma gibi problemler nedeniyle ömürleri kısalabilmektedir. Bu çalışmada, özellikle Skorsky (S70-A) helikopterinde kullanılan iki farklı bearing tipi – yüksek sıcaklığa maruz kalan motor bearingi ve yüksek torka maruz kalan input modül bearingi – üzerinde ısıl işlem uygulamalarının etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Çalışmada, her iki bearingden belirli sayıda örnek alınmış ve uçuş simülasyonu olarak 500 saatlik uçuş koşulları gerçekleştirildikten sonra, farklı ısıl işlem sıcaklıkları (850°C, 800°C, 750°C gibi motor bearingi için; 700°C, 600°C, 500°C gibi input modül bearingi için) uygulanmış; ardından, oda sıcaklığında soğutma süreci tamamlanmıştır. Bu işlem süreci, bearinglerin ısıl işlem prosedürleri sonrası mekanik ve termal davranışlarının, titreşim, tork, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerle izlenmesine olanak tanımıştır. Ölçüm verileri, test bremzesinde simüle edilen uçuş koşulları altında alınmış ve belirli referans değerler (örneğin, NAVAIR-01-1A-503 dokümanında belirtilen norm değerler) ile karşılaştırılmıştır.

Motor bearingleri için elde edilen veriler incelendiğinde; 850°C’de fırınlanmış motor bearingi (Tablo 5.1) ilk 500 saatlik uçuş süresi sonunda, titreşim, tork, sıcaklık ve basınç değerlerinin referans aralıklar içinde olduğu, bearingin faal ve kullanılabilir durumda kaldığını göstermiştir. Ancak, 300 saatlik uçuş süresinin ardından artan aşınma ve gözlemlenen yapısal kusurlar neticesinde, bearingin ömrünün tamamlandığı (HEK) belirlenmiştir. Benzer şekilde, 800°C ve 750°C’de fırınlanmış motor bearingleri (Tablo 5.2 ve Tablo 5.3) için yapılan ölçümler de, ısıl işlem sıcaklığı azaldıkça bearinglerin ilk kullanım dönemindeki performansının iyileştiğini, ancak uzun süreli kullanım sonunda her iki durumda da aşınma ve performans düşüşünün kaçınılmaz olduğunu ortaya koymuştur.

Input modül bearingleri için ise, daha düşük ısıl işlem sıcaklıklarında (örneğin, 700°C, 600°C, 500°C) yapılan testlerde, ilk 500 saatlik uçuş süresi boyunca bearinglerin ölçülen parametreleri referans norm değerler ile uyumlu bulunmuş, bu da bearinglerin başlangıçta kullanılabilir (faal) olduğunu göstermiştir. Fakat, ikinci 500 saatlik uçuş süresi sonrasında, artan aşınma ve yapısal bozulmaların belirgin hale gelmesi

sonucunda, bearinglerin ömrünün tamamlandığı gözlemlenmiştir (Tablo 4.4, 4.5 ve 4.6'de sunulan verilerden anlaşılmaktadır).

Çalışmanın metodolojisi kapsamında, bearinglerin geometrik ve mekanik özellikleri, Coordinate Measurement Machines (CMM) kullanılarak da detaylı ölçüme tabi tutulmuş; bu ölçümler, bearinglerin dış ve iç yüzey çapları, düzlemsellik ve tolerans değerlerinin ısıtma işlem sonrası meydana gelen değişikliklerini ortaya koymuştur. Ayrıca, titreşim testleri, rulmanların dinamik performanslarının, yani uçuş sırasında maruz kaldıkları titreşim genliklerinin, ısıtma işlem ve uzun süreli kullanım koşulları altında nasıl değiştiğini değerlendirmeye yönelik gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamlı veri toplama ve analiz süreci, elde edilen verilerin kestirimci bakım stratejilerinin oluşturulmasında kullanılması ve bearing ömrünün optimize edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, helikopterlerde kullanılan rulmanlara uygulanan farklı ısıtım işlem sıcaklıklarının rulmanların kalan faydalı ömrü üzerindeki etkisi kestirimci bakım yöntemleriyle analiz edilmiştir. Gerçek uçuş koşullarını simüle eden test ortamında sıcaklık, tork, titreşim ve basınç gibi veriler değerlendirilmiş ve ısıtım işleminin rulman performansında belirleyici olduğu saptanmıştır. Farklı sıcaklıklarda temperlenmiş rulmanların ömürleri karşılaştırıldığında, belirli sıcaklık aralıklarının rulman ömrünü olumlu etkilediği görülmüş, kestirimci bakım tekniklerinin ise bu tür analizlerde etkin bir araç olduğu kanıtlanmıştır.

### 5.1. Temel Sonuçlar

- **Sıcaklığın etkisi:** Motor rulmanlarında  $750^{\circ}\text{C}$ , giriş mekanizması rulmanlarında  $500^{\circ}\text{C}$  'de temperlenen rulmanın, diğer sıcaklıklarda işlem görmüş rulmanlara kıyasla daha uzun faydalı ömür sunduğu belirlendi.
- **Titreşim verileri:** Titreşim analizine göre, yüksek titreşim değerleri gösteren rulmanların ömrü daha kısa olmuş, dolayısıyla titreşim düzeyinin rulman sağlığı için kritik bir parametre olduğu görüldü.
- **Tork değişimi:** Test sırasında ölçülen tork değerlerinin ısıtım işlem sıcaklıklarına bağlı olarak değiştiği ve bu değişimin rulmanların yük taşıma kapasitesi ile ilişkili olduğu tespit edildi.
- **Isıtım işlem farkları:** Giriş mekanizması rulmanlarında  $500^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan ısıtım işleminin,  $600^{\circ}\text{C}$  ve  $700^{\circ}\text{C}$ 'ye göre ve motor rulmanları için  $750^{\circ}\text{C}$  de yapılan ısıtım işleminin  $800$  ve  $850^{\circ}\text{C}$  'lere göre daha yüksek kalan ömür sağladığı
- **Kestirimci bakımın etkinliği:** Titreşim, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin düzenli izlenmesiyle, rulmanların olası arızalarının önceden tespit edilebildiği ve planlı bakım yapılabildiği gösterildi.

### 5.2. Temel Öneriler

- Isıtım işlem uygulamaları yapılmadan önce rulman tipi ve kullanım koşulları dikkate alınmalı, motor rulmanları için  $750$ - $800$ - $850$  °C derecelerinden  $750^{\circ}\text{C}$  ve input modül rulmanları için  $500$ - $600$ - $700$  °C derecelerinden  $500^{\circ}\text{C}$  tercih edilmelidir. Diğer ısıtım işlem sıcaklıkları için ayrı bir çalışma yapılabilir.

- Rulmanlara ait titreşim değerleri düzenli aralıklarla izlenmeli ve sınır değerler aşılmadan rulman değişimi planlanmalıdır.
- Tork, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesiyle bakım planlaması daha sağlıklı yapılmalıdır.
- Kestirimci bakım sistemlerinin yaygınlaştırılması, hem ekonomik kayıpları azaltacak hem de operasyonel sürekliliği artıracaktır.
- Rulmanların kalan ömrü için sadece üretici verilerine değil, gerçek kullanım koşullarındaki analizlere dayalı bir izleme sistemi kurulmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abidi, M.H., Mohammed, M.K., & Alkhalefah, H. (2022). Predictive maintenance planning for industry 4.0 using machine learning for sustainable manufacturing. *Sustainability*, 14(6), 3387.
- Acar, G. (2014). *Otomotiv sektöründe kullanılan kestirimci bakım yöntemleri ve uygulamaları* [Yüksek Lisans Tezi]. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ali, J. B., Chebel-Morello, B., Saidi, L., Malinowski, S., & Fnaiech, F. (2015). Accurate bearing remaining useful life prediction based on Weibull distribution and artificial neural network. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 56, 150-172. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327014004087>
- Aliustaoğlu, C. (2008). *Rulman arızalarının gerçek zamanda analizi ve arıza kaynaklarının tespit edilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Andritoi, D., Luca, C., Corciova, C., & Ciorap, R. (2019). The use of thermography as a prediction element in the maintenance of medical equipment. İçinde S. Vlad & N. M. Roman (Ed.), *6th International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology*; 17–20 October 2018, Cluj-Napoca, Romania (C. 71, ss. 73-78). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6207-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6207-1_12)
- Ayan, Ö. A. (2019). *Döner makine elemanların titreşim analizi ile kestirimci bakımı*. [Yüksek Lisans Tezi]. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Babu, G. S., & Das, V. C. (2013). Condition monitoring and vibration analysis of boiler feed pump. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(6), 1-7.
- Bai, R., Li, Y., Noman, K., & Wang, S. (2023). Diversity entropy-based Bayesian deep learning method for uncertainty quantification of remaining useful life prediction in rolling bearings. *Journal of Vibration and Control*, 29(21-22), 5053-5066. <https://doi.org/10.1177/10775463221129930>
- Barron, R. (1996). *Engineering condition monitoring: Practice, methods and applications*. Prentice Hall.
- Bektaş, O. (2020). Kestirimci bakım için döner mekanizma bozulma eğrisinin tanımlanması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19, 420-428.

- Bircan, A. (2011). *Makina parçalarının hasar analizi* [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Castaneda, L., & Zótowski, B. (2010). *Bases del diagnóstico técnico de máquinas*. Editorial EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/items/1216091c-e3eb-48b6-ab5b-f29a06678a0a>
- Cempel, C. (1989). *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Państwowe Wydaw. Naukowe.
- Cempel, C. (2005). Diagnostyka wibroakustyczna maszyn-historia, stan obecny, perspektywy rozwoju. *Problemy Eksploatacji*, 3, 7-25.
- Cui, C. L., Zarrintan, S., Marmor, R. A., Nichols, J., Cajas-Monson, L., & Malas, M. (2022). Performance of carotid revascularization procedures as modified by sex. *Annals of Vascular Surgery*, 81, 171-182. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890509621007950>
- Çolak, M., Çetin, T., & Atılğan, A. (2017). Mobilya endüstrisinde tamir bakımın önemi ve bir uygulama. *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2(3), 60-70. [https://www.academia.edu/download/55345688/Cilt\\_2\\_8\\_AJE\\_3\\_2\\_8.pdf](https://www.academia.edu/download/55345688/Cilt_2_8_AJE_3_2_8.pdf)
- Deniz, T. & Danışmaz, M. (2024). Rulmanlarda ısıtma işlemi ve kestirimci bakım incelemesi. M. Danışmaz (Ed.), *Makine mühendisliği yaklaşımıyla: uygulama problemleri ve yenilikçi çözümler 1* içinde. Bidge Yayınları.
- Denli, H. B. (2007). *Kestirimci bakım ve uygulamalarının iyileştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Erol, S. S. (2015). *Dinamik sistemlerin kestirimci bakımına etki eden faktörlerin durum bazlı incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Fujishima, M., Mori, M., Nishimura, K., & Ohno, K. (2017). Study on quality improvement of machine tools. *Procedia CIRP*, 59, 156-159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116309684>
- Gawali, S. V., Naik, S. S., Kamepalli, K. S., & Yadav, R. (2021). Implication of condition-based maintenance in roller bearing of the paper industry. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(5), 3098-3101. <https://www.academia.edu/download/81819746/IRJET-V8I5572.pdf>
- Goel, S., Ghosh, R., Kumar, S., & Akula, A. (2014). A methodical review of condition monitoring techniques for electrical equipment. *National Seminar & Exhibition*

- on *Non-Destructive Evaluation (NDE 2014)*, Pune.  
[https://www.ndt.net/article/nde-india2014/papers/CP0073\\_full.pdf](https://www.ndt.net/article/nde-india2014/papers/CP0073_full.pdf)
- Goyal, D., & Pabla, B. S. (2016). Development of non-contact structural health monitoring system for machine tools. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(4), 245-258.
- Göktaş, C. (1997). *Toplam verimli bakım ve kordsa'daki toplam verimli bakım uygulamalarının değerlendirilmesi* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Guo, W., & He, M. (2022). An integrated method for bearing state change identification and prognostics based on improved relevance vector machine and degradation model. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-14.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9740127/>
- Guo, Y., Li, P., & Boltze, J. (2023). Recent advances in mechanistic, therapeutic, and diagnostic research of cerebrovascular diseases: Updates from brain & BrainPET 2022. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 43(2\_suppl), 4-7.  
<https://doi.org/10.1177/0271678X231183290>
- Günindi, Z. Ö., Kurban, A. O. & Danışmaz, M. (2022). Soğutma fanının kestirimci bakım yöntemi uygulaması ile titreşim analizi ve yapısal esneklik arızasının giderilmesi. *Icontech International Journal of Surveys, Engineering, Technology*, 6 (1), 33-41, <https://doi.org/10.46291/ICONTECHvol6iss1pp33-41>.
- Han, T., Pang, J., & Tan, A. C. (2021). Remaining useful life prediction of bearing based on stacked autoencoder and recurrent neural network. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 576-591.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612521002168>
- Hancı, G. (2009). *Lastik endüstrisinde kullanılan kestirimci bakım uygulamaları* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Jiang, M., & Xiang, Y. (2023). *Prediction on the remaining useful life of rolling bearings using ensemble DLSTM*. *Shock and Vibration*, 2023.  
<https://www.hindawi.com/journals/sv/2023/3742912/>
- Joshi, M. B., & Pujari, K. S. (2023). Fault diagnosis of high-speed rotating machines using MATLAB. *Diagnostyka*, 24(2), <https://bibliotekanauki.pl/articles/2203637.pdf>

- Juvonen, M. (2010). Ruuvikuljettimien kuntokartoitus ja kunnossapidon kehittäminen. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/14365/Juvonen\\_Matti.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/14365/Juvonen_Matti.pdf?sequence=1)
- Karamanlı, A. F. (2003). *Toplam verimli bakım sürekli iyileştirme takımlarının ekipman iyileştirme faaliyetleri* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kartepe, M. O. (1991). *Demir ve çelik tesislerinde bakım uygulamaları* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kaya, B. (1992). *Muayenede teknolojik gelişmeler* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kitai, M., Kobayashi, T., Fujiwara, H., Tani, R., Numao, M., & Fukui, K.-I. (2021). A framework for predicting remaining useful life curve of rolling bearings under defect progression based on neural network and Bayesian method. *IEEE Access*, 9, 62642-62652. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9408580/>
- Koçak, A., & İşçiöğlü, F. (2018). Meyve suyu dolum hatlarında güvenilirlik analizi. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 13(50), 185-196.
- Kong, X., & Yang, J. (2019). Remaining useful life prediction of rolling bearings based on RMS-MAVE and dynamic exponential regression model. *IEEE Access*, 7, 169705-169714. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8908795/>
- Kotowski, A., & Lindstedt, P. (2002). Metoda wibroakustyczna w procesie oceny stanu technicznego maszyn. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, 10, 99-115. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BPB1-0007-0095>
- Köse, R. K. (2004). Makina arızalarının belirlenmesinde titreşim analizi. *Mühendis ve Makina*, 45(538), 24-32.
- Lee, J. (1995). Modern computer-aided maintenance of manufacturing equipment and systems: Review and perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 28(4), 793-811. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/036083529500012P>
- Leendertz, J. S., Besten, C., Dooren, F. van, Sliedrecht, H., & Vries, J. de. (2008). *Erfahrungen aus den Niederlanden*. [https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/files/384/stahlbrAckenbau\\_leendertz.pdf](https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/files/384/stahlbrAckenbau_leendertz.pdf)
- Li, W., & Deng, L. (2023). A hybrid model-based prognostics approach for estimating remaining useful life of rolling bearings. *Measurement Science and Technology*,

- 34(10), 105012. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ace3e7/meta>
- Li, X., Fan, H., Wang, Q., & Wang, Q. (2023). Effects of normalizing temperature on microstructure and impact toughness of V-N micro-alloyed P460NL1 steel. *Materials*, 16(21), 6921. <https://doi.org/10.3390/ma16216921>
- Liang, P., Song, X., Wang, S., Cong, Y., & Chen, Y. (2021). Remaining useful life prediction for rolling bearings using correlation coefficient and Kullback–Leibler divergence feature selection. *Measurement Science and Technology*, 33(2), 025005. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ac346d/meta>
- Liu, H., Mo, Z., Zhang, H., Zeng, X., Wang, J., & Miao, Q. (2018). Investigation on rolling bearing remaining useful life prediction: A review. 2018. *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*, 979-984. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8603483/>
- Luo, Y., Tang, H., Li, H., Zhao, R., Huang, Q., & Liu, J. (2019). Recent advances in the development of neuroprotective agents and therapeutic targets in the treatment of cerebral ischemia. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 162, 132-146. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0223523418309681>
- Mao, W., He, J., & Zuo, M. J. (2019). Predicting remaining useful life of rolling bearings based on deep feature representation and transfer learning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(4), 1594-1608. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8718405/>
- Mohanty, A. R. (2014). *Machinery condition monitoring: Principles and practices*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781351228626/machinery-condition-monitoring-amiya-ranjan-mohanty>
- Muminjonovich, K. A. (2023). Methods of technological machinery monitoring and fault diagnosis. *Intent Research Scientific Journal*, 2(10), 11-17. <https://intentresearch.org/index.php/irsj/article/view/219>
- Mushiri, T., & Mbohwa, C. (2015). Machinery maintenance yesterday, today and tomorrow in the manufacturing sector. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2, 1-3. [https://www.iaeng.org/publication/WCE2015/WCE2015\\_pp1149-1153.pdf](https://www.iaeng.org/publication/WCE2015/WCE2015_pp1149-1153.pdf)

- Mustafa, M. N. (2021). Classification of maintenance techniques and diagnosing failures methods. *Journal of Physics: Conference Series*, 2060(1), 012014. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2060/1/012014/meta>
- Nishonov, F. A., & Saloxiddinov, N. (2023). mashina detallarining yeyilishini payvandlash va mustahkamlash texnologiyalari. *Scientific Impulse*, 1(10), 1782-1788. <http://nauchniyimpuls.ru/index.php/ni/article/download/9758/6449>
- Olarte, W., & Botero, M. (2011). La detección de ultrasonido: Una técnica empleada en el mantenimiento predictivo. *Scientia et Technica*, 17(47), 230-233. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84921327035.pdf>
- Park, P., Jung, M., & Di Marco, P. (2020). Remaining useful life estimation of bearings using data-driven ridge regression. *Applied Sciences*, 10(24), 8977. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/8977>
- Plaščak, I., Jurić, T., & Emert, R. (2010). Application of ferrography in condition based maintenance. *Strojarstvo: Časopis za Teoriju i Praksu u Strojarstvu*, 52(2), 233-240. <https://hrcak.srce.hr/file/86086>
- Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018). Havacılık komponentlerinin bakım uygulamalarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 59(691), 59-69.
- Que, Z., Jin, X., & Xu, Z. (2021). Remaining useful life prediction for bearings based on a gated recurrent unit. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-11. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9335231/>
- Rathore, S. S., Mishra, S., & Paswan, M. K. (2019). An overview of diagnostics and prognostics of rotating machines for timely maintenance intervention. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 691(1), 012054. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/691/1/012054/meta>
- Saffiudeen, M. F., Mohammed, F. T., & Syed, A. (2023). Standardized repair procedure for failures in heat exchangers. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23(4), 1385-1392. <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01709-5>
- Shamsuzzaman, Md., Mashud, M., Rahman, Md. M., Rahman, Md. M., Hoq, E., & Das, D. (2023). Management and maintenance of textile machinery. Md. M. Rahman, M. Mashud, & Md. M. Rahman (Ed.), *Advanced Technology in Textiles* içinde (ss. 31-63). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-2142-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2142-3_2)

- She, D., Jia, M., & Pecht, M. G. (2020). Sparse auto-encoder with regularization method for health indicator construction and remaining useful life prediction of rolling bearing. *Measurement Science and Technology*, 31(10), 105005.
- Sheng, Y., Liu, H., & Li, J. (2023). Bearing performance degradation assessment and remaining useful life prediction based on data-driven and physical model. *Measurement Science and Technology*, 34(5), 055002. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/acb374/meta>
- Sidahmed, M. (2001). Diagnostics and condition monitoring, basic concepts. S. Braun (Ed.), *Encyclopedia of Vibration* içinde (ss. 376-380). Elsevier.
- Singh, G. R. P., Paul, A. K., Chatterjee, A. K., Ganesh, P. S. S., & Mishra, C. (2000). *Improving equipment availability and reliability through condition monitoring at cold rolling mill complex of TATA STEEL*. Tata Search.
- Sturm, A., & Förster, R. (2013). *Maschinen-und Anlagendiagnostik: Für die zustandsbezogene Instandhaltung*. Springer-Verlag.
- Tabak, A. (2014). *Ekipmanlarda kestirimci bakım teknolojilerinin araştırılması ve seçilen bir yöntemin uygulandığı sanayi tesisinde elde edilen neticelerin irdelenmesi* [Karabük Üniversitesi]. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Tabak, A., & Özkaymak, M. (2020). Elektrik motorlarında uygulanan bakım yöntemlerinin incelenmesi, karşılaştırılması ve uzaktan erişimin kestirimci bakıma etkisi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(4), 889-905.
- Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 32(8), 469–480.
- Tirpude, V. D., Modak, J. P., & Mehta, G. D. (2011). Vibration based condition monitoring of rolling mill. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 2(12), 1-10.
- Tolga, E., Marangoz, M. C., & Işık, M. Z. (2012). Endüstriyel işletmelerde bakım kültürünün değişimi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 1(2), 365-371.
- Trzecznyński, J., & Murzynowski, W. (2019). Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy. *Energetyka*, 488-491.
- Uysal, V. (2019). *Enerji santrallerinde titreşim analizi ile kestirimci bakım* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Ünal, G. (2009). *Güvenilirlik merkezli bakım ve bir endüstriyel uygulama* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünal, V. (2019). *Kilim koruma ve onarım ilkeleri, meslek analizi ve uygulanabilirliği*. [Sanatta Yeterlik Tezi]. Gazi Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Ankara.
- Wang, T., Liu, Z., & Mrad, N. (2020). A probabilistic framework for remaining useful life prediction of bearings. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-12. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9217958/>
- Wang, Z., Zhao, W., Li, Y., Dong, L., Wang, J., Du, W., & Jiang, X. (2023). Adaptive staged RUL prediction of rolling bearing. *Measurement*, 222, 113478. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224123010424>
- Yan, M., Wang, X., Wang, B., Chang, M., & Muhammad, I. (2020). Bearing remaining useful life prediction using support vector machine and hybrid degradation tracking model. *ISA Transactions*, 98, 471-482. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057819304045>
- Yang, X., Huang, Q., Li, A., Chen, Y., Xu, W., Li, J., Wang, Y., & Fang, Y. (2020). A long-term retrospective study on sporadic *Burkitt lymphoma* in Chinese population. *Medicine*, 99(5), e18438. [https://journals.lww.com/md-journal/FullText/2020/01310/A\\_long\\_term\\_retrospective\\_study\\_on\\_sporadic.3.aspx](https://journals.lww.com/md-journal/FullText/2020/01310/A_long_term_retrospective_study_on_sporadic.3.aspx)
- Zafer, N., Türkeş, E., & Kasap, M. (2003). Bakım mühendisliği ve yeni teknikleri. *Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi*, 16-19 Ekim 2003, Denizli.
- Zhang, M., Jin, L., Yang, J., Duan, Y. L., Huang, S., Zhou, C. J., & Zhang, Y. H. (2018). Clinical and prognostic analysis of 186 children with Burkitt's lymphoma. *Zhonghua er ke za zhi= Chinese Journal of Pediatrics*, 56(8), 605-610. <https://europepmc.org/article/med/30078243>
- Zhang, T., Wang, Q., Shu, Y., Xiao, W., & Ma, W. (2023). Remaining useful life prediction for rolling bearings with a novel entropy-based health indicator and improved particle filter algorithm. *IEEE Access*, 11, 3062-3079. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10006785/>
- Zhu, J., Chen, N., & Shen, C. (2020). A new data-driven transferable remaining useful life prediction approach for bearing under different working conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 139, 106602. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019308234>

## EKLER

### EK-1

#### Kongre Katılım Belgesi



## Performance Evaluation and Durability Analysis of 52100 Bearings under Varying Heat Treatment Conditions in Aerospace Applications

Tuncer Deniz<sup>1</sup> and Merdin Danişmaz<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Kırşehir Ahi Evran University, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Kırşehir Ahi Evran University, Türkiye

\*[m.danismanz@ahievran.edu.tr](mailto:m.danismanz@ahievran.edu.tr)

(Received: 03 March 2025, Accepted: 07 March 2025)

(4th International Conference on Recent Academic Studies ICRAS 2025, March 04-05, 2025)

**ATIF/REFERENCE:** Deniz, T. & Danişmaz, M. (2025). Performance Evaluation and Durability Analysis of 52100 Bearings under Varying Heat Treatment Conditions in Aerospace Applications. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(3), 148-154.

**Abstract** – This study investigates the performance and longevity of two types of bearings—the motor bearing and the input module bearing—fabricated from 52100 (100 Cr6) bearing steel, following a 500-hour flight operation. Case evaluations, including hardness testing and vibration analysis, were conducted after the bearings underwent various heat treatments, specifically at temperatures of 600°C and 700°C. The findings revealed that the input module bearing heat-treated at 600°C experienced increased vibration levels, which, while initially within acceptable limits, resulted in the bearing becoming inactive after 900 hours due to the cumulative effects of the operational environment. In contrast, the bearing treated at 700°C exhibited the highest vibration levels, correlating with excessive iron contamination in the oil, suggesting a requirement for further thermal processing. Additionally, the analysis indicated that vibration and torque values remained stable at 600°C but deteriorated significantly at 700°C. These results underscore the critical influence of heat treatment and operational conditions on bearing performance. Consequently, this research emphasizes the necessity for optimized heat treatment processes and routine maintenance protocols to enhance bearing reliability in high-stress and elevated temperature environments, particularly in aerospace applications. This work provides valuable insights into the factors impacting bearing failure and offers a foundation for future studies aimed at improving bearing technology and maintenance practices.

*Keywords* – Bearings, Heat Treatment, Vibration Analysis, Aerospace Applications, Durability.

### I. INTRODUCTION

Bearings are critical components in helicopter engines, functioning as supports that enable smooth rotation and movement of various engine components. In these high-stress environments, bearings are subjected to extreme loads, temperatures, and speeds, which can significantly impact their performance and longevity. The reliability of bearings directly influences the overall efficiency and safety of helicopter operations, as failures can lead to costly repairs, operational downtime, and, in severe cases, catastrophic incidents. Selecting the appropriate bearing material and employing suitable heat treatment processes is essential in enhancing their wear resistance and fatigue life, thereby ensuring that helicopter engines remain operational under the demanding conditions they face [1, 2].

## ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Tuncer DENİZ
Uyruğu:	T.C.
Orcid Numarası:	0009-0009-9689-2296

EĞİTİM BİLGİLERİ	
<b>Lisans</b>	
Üniversite:	Atatürk Üniversitesi
Fakülte:	Mühendislik Fakültesi
Bölümü:	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2014
<b>Yüksek Lisans</b>	
Üniversite:	Ahi Evran
Enstitü:	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı:	İleri Teknolojiler
Mezuniyet Yılı:	2025

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
<p><b>Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler</b></p> <p><b>Deniz, T. &amp; Danışmaz, M. (2025).</b> Performance evaluation and durability analysis of 52100 bearings under varying heat treatment conditions in aerospace applications. <i>International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches</i>, 9(3), 148-154</p>