



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



PİRİNÇ ESASLI KAYMALI YATAKLARIN
TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Abdullah Emirhan AKSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdullah Emirhan AKSOY tarafından hazırlanan “Pirinç Esaslı Kaymalı Yatakların Tribolojik Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 03/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
(Konya Teknik Üniversitesi)

Danışman

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin Çetin
(Konya Teknik Üniversitesi)

Üye

Sena Kaba ve KILINÇARSLAN
(Karabük Üniversitesi)

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Abdullah Emirhan Aksoy

Tarih: 03.05.2024

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****PIRİNÇ ESASLI KAYMALI YATAKLARIN
TRIBOLOJİK PERFORMANSLARININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ****Abdullah Emirhan AKSOY****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN****2024, 58 Sayfa****Jüri****Danışman: Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Sena Kaba ve KILINÇARSLAN**

Çalışmada, hidrodinamik radyal kaymalı yatakların ömrünün maksimizasyonu için etkili olan parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda; radyal kaymalı yatakların tribolojik performansına yük, hız ve yağlayıcı parametrelerinin etkisi, pirinç malzeme üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Çalışmada test ünitesi şeklinde tasarlanmış bir kaymalı yatak sistemi kullanılmış olup malzeme davranışları parametrik olarak araştırılmıştır. Çıkış parametresi olarak sıcaklık değişimi ve yüzey kalitesi ölçülmüştür. Kaymalı yataklarda bitkisel esaslı yağlayıcı kullanımı ve yatakların tribolojik davranışlarının istatistiksel olarak araştırılması çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır.

Deneysel çalışmada 3 farklı güç seviyesi (düşük: 95 N-500 dev/dk, orta: 120 N-1000 dev/dk ve yüksek: 145 N-1500 dev/dk) ve 3 farklı yağlayıcı (bitkisel yağ, bor yağı, sentetik yağ) kullanılmıştır. Deneyler tam faktöriyel deney tasarımına göre modellenmiştir. Yağlayıcı seçiminde endüstriyel kullanım alanı yoğunluğu ve temin edilebilirlik dikkate alınmıştır. Kaymalı yatak malzemesinin aşınma davranışının incelenmesi için deney numunelerinin yüzey pürüzlülükleri, sıcaklık değişim değerleri ve yüzey topoğrafyası görüntüleri incelenmiştir. Çıkış parametreleri için ANOVA testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde sıcaklık farkı için düşük güç şartlarında (95 N yük ve 500 dev/dk) bitkisel yağ kullanımı en iyi sonuçları vermiştir. Yüzey pürüzlülüğü için düşük güç şartlarında (95N yük ve 500 dev/dk) ve sentetik yağ kullanımında en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Kaymalı yataklar, Pirinç, Sıcaklık, Yağlayıcı

ABSTRACT**MS THESIS****EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF
BRASS BASED PLAIN BEARINGS****Abdullah Emirhan AKSOY****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering****Advisor: Assoc. Prof. Muhammet Hüseyin ÇETİN****2024, 58 Pages****Jury****Advisor: Assoc. Prof. Muhammet Hüseyin ÇETİN****Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI****Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI****Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI**

The aim of the study was to determine the parameters effective in maximizing the lifespan of hydrodynamic radial journal bearings. In this context, the effect of load, speed, and lubricant parameters on the tribological performance of radial journal bearings was investigated through experimental studies conducted on brass material. A sliding bearing system designed as a test unit was used in the study, and material behaviors were investigated parametrically. Temperature change and surface quality were measured as output parameters. The use of vegetable-based lubricants in journal bearings and the statistical investigation of their tribological behaviors constitute the original contribution of the study.

In the experimental study, three different power levels (low: 95 N-500 rpm, medium: 120 N-1000 rpm, and high: 145 N-1500 rpm) and three different lubricants (vegetable oil, boron oil, synthetic oil) were used. The experiments were modeled according to a full factorial experimental design. Industrial application density and availability were considered in the selection of lubricants. Surface roughness of the test samples, temperature change values, and surface topography images were examined to investigate the wear behavior of the journal bearing material. ANOVA tests were conducted for the output parameters. Upon examination of the results, it was observed that the use of vegetable oil yielded the best results for temperature difference under low power conditions (95 N load and 500 rpm). For surface roughness, the lowest values were obtained under low power conditions (95N load and 500 rpm) with the use of synthetic oil.

Keywords: Brass, Lubricant, Plain bearings, Temperature, Wear**ÖN SÖZ**

Radyal kaymalı yatakların tribolojik performanslarının deneysel olarak incelenmesi amaçlanan bu çalışmanın ilk üç bölümünde literatürde yapılan çalışmalar ve teorik bilgiler ele alınmıştır. Dördüncü bölümde yapılması planlanan deneylerde kullanılan deney düzeneği ve ekipmanlar tanıtılmış ayrıca deney tasarımları aktarılmıştır. Beşinci bölümde yapılan deneyler sırasındaki sıcaklık değişimlerinin ve numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin sonuçlarına değinilmiştir. Son bölümde ise çıkan sonuçlar ele alınmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmasının planlanmasından sonuçlandırılmasına kadar her aşamasında bilgi ve tecrübelerini paylaşarak desteklerini esirgemeyen ve her konuda yardımcı olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e anlayış ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen ve yanımda olan Zeynep Sezer'e ve maddî ve manevî anlamda her zaman yanımda olan aileme, teşekkürü borç bilirim. Deney numunelerinin imalatı ve deneylerin yapımı süresince makine ve ekipmanları kullanmamızda yardımcı olan Selçuklu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Makine Bölümü öğretmenlerine teşekkür ederim.

Abdullah Emirhan AKSOY

KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖN SÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Literatür Taraması	4
2.2. Literatür Değerlendirmesi	11
3. TEORİK ESASLAR	12
3.1. Triboloji.....	12
3.2. Kaymalı Yataklar	12
3.3. Sürtünme	13
3.4. Aşınma	17
3.4.1. Adhezif aşınma.....	18
3.4.2. Abrasyon aşınması	19
3.4.3. Yorulma aşınması.....	19
3.4.4. Korozyon aşınması	19
3.5. Yağlama	20
3.6. Yataklarda Kullanılan Yağ Çeşitleri	21
3.6.1. Katı yağlayıcılar	21
3.6.2. Yarı katı yağlayıcılar	22
3.6.3. Gaz yağlayıcılar.....	22
3.6.4. Sıvı yağlayıcılar ve viskozite	22
3.7. Yataklarda Malzeme Seçimi	24
3.8. Geçme Toleransları	25
3.8.1. Boşluklu geçme tolerans çiftleri.....	25
3.8.2. Sıkı geçme tolerans çiftleri.....	26
3.8.3. Presle geçme tolerans çiftleri	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
4.1. Deney Düzeneklerinin Özellikleri	27
4.2. Sıcaklık Ölçüm Cihazı	29
4.3. Dijital Takometre	30
4.4. Yağlayıcılar	30
4.5. Deney Numunelerinin Hazırlanması	32
4.5.1. Hesaplamalar	34

4.6. Deney tasarımı ve Uygulama	38
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	42
5.1. Deneysel Sonuçların İstatiksel ve Görsel Analizi	42
5.1.1. Sıcaklık değişimi analizi	44
5.1.2. Yüzey pürüzlülüğü analizi	46
5.1.3. Yük ve Devir Değişiminin Etkisinin İncelenmesi.....	51
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
6.1 Sonuçlar.....	52
6.2 Öneriler.....	53
KAYNAKLAR.....	54
EKLER.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

°C	:	Santigrat derece
Al	:	Alüminyum
Cp	:	Dinamik Viskozite
Cu	:	Bakır
e	:	Eksantrisite
F	:	Kuvvet
Fe	:	Demir
F_s	:	Sürtünme kuvveti
MoS2	:	Molibden disülfid
N	:	Newton
Ni	:	Nikel
ρ	:	Yoğunluk
Pb	:	Kurşun
Ra	:	Yüzey pürüzlülüğü
S/N	:	Sinyal/Gürültü
Sn	:	Kalay
u	:	Sürtünme katsayısı
Um	:	Mikrometre
V	:	Hız
Zn	:	Çinko
ω	:	Açısal hız

KISALTMALAR

Dev	:	Devir
DIN	:	Deutsches Institut für Normung
dk	:	Dakika

1. GİRİŞ

Makine elemanları, güç iletimi ve yük taşıma gibi işlevleri yerine getirmek üzere bir araya gelir ve bu birliktelik sırasında birbirleriyle temas ederek çalışırlar. Bu çalışma sırasındaki temas ve hareket, zaman içinde aşınma ve yıpranmaya neden olur. Bu durum, makine elemanlarının yüzey kalitesini düşürerek aşınmalara yol açabilir. Bunun sonucunda, makine elemanlarının ömrü kısalabilir, maliyetleri artabilir ve hatta kullanımı tehlikeli bir hâl alabilir.

Aşınma, karmaşık bir olay olmasından dolayı pek çok tanımı yapılmıştır. Teknik olarak tanımlayacak olursak; DIN 50320'ye göre aşınma, "Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) temasıyla yani mekanik etkiler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucunda meydana gelen ve istenmeyen yüzey hasarlarıdır." (Bağcı, 2005) Aşınma genel olarak, çok sayıdaki küçük parçacıkların hareketleri nedeniyle yüzeyde meydana gelen erozyon olarak tanımlanmaktadır. (Cürgül, 2005) Başka bir tanımlama ise; "Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde malzemenin, istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır." şeklindedir. (Akkurt, 1990) Aşınmanın etkilediği diğer bir husus olan ekonomik kayıpları şöyle sıralamak mümkündür:

- Aşınan malzemelerin değişiminden kaynaklanan maliyetler
- Aşınmış elemanlardan dolayı eksik veya hatalı operasyonların tekrarlanması için ortaya çıkan maliyetler
- Aşınmış elemanların onarımı için sistemin durdurulmasından dolayı oluşan imalat kayıpları ve oluşacak kazaların getirdiği maliyetler

Bahsedilen hususlar firmaların üretimlerini devam ettirebilme, üretimin zamanında yapılması gibi konulardan dolayı önem arz etmektedir.

Aşınmayı tamamen engellemek mümkün değildir fakat minimum düzeye indirmek için yatak elemanları ve yağlayıcılar kullanmak mümkündür. Kullanılan yataklardan biri kaymalı yataklardır. Kaymalı yataklar, yükün yönüne bağlı olarak eksenel ve radyal olarak ayrılmaktadır. Kaymalı yataklar, sadece aşınmayı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sessiz çalışma, titreşimi absorbe edebilme, ağır yükleri taşıma gibi önemli avantajlar sunarlar. Kaymalı yatakların geliştirilmesi, malzeme ve yağlayıcı olmak üzere iki grupta ele alınabilir.

Uygun yağlayıcıların kullanıldığı kaymalı yatak sistemlerinde, aşınma dirençlerinin dikkate değer ölçüde arttığı görülmektedir. Yatak malzemelerinin aşınmaya karşı dayanıklılığının artırılması ve ideal sertlik seviyelerine ulaşılması, yatakların kullanım ömrünü

önemli ölçüde etkileyebilir. Malzeme ve yağlayıcı performanslarının incelenmesi ve geliştirilmesi için deney düzeneklerinde belirlenen çeşitli parametreler üzerinde çalışmalar yapılacaktır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçların, alana ve alanda yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı kanaatindeyiz.

Kaymalı yataklar, endüstriyel makine sistemlerinde önemli bir rol oynayan özel bileşenlerdir. Bu bileşenler, içten yanmalı motorlardaki krank-biyel kolu bağlantılarından tarım makinelerine, santrifüj pompalardan hava kompresörlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Geniş kullanım alanları nedeniyle, kaymalı yataklar Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarında da oldukça önemlidir.

Kaymalı yatakların işlevselliğinde temel faktör, yağ filmi tabakasının oluşumudur. Bünyesinde aşınmaya maruz kalan makine elemanı bulunduran sistemlerde uygun yağlayıcıların kullanımı, devamlılık bakımından dikkate alınmalıdır. Devamlılık; aşınmanın yağlayıcılar sayesinde azaltılması ve bu sayede makine elemanlarının ömürlerinin artırılarak makine ve sistemlerin çalışmasını sürdürmesi olarak tanımlanabilir. Yüksek gerilmelere maruz kalan sistemlerde aşınmaların önüne geçebilmek için daha iyi yağlama ve soğutma özelliklerine sahip yağlayıcılar kullanılması gerekmektedir. Makine elemanlarının temas noktasında oluşan sıcaklık artışı malzemelerde deformasyona neden olmaktadır. Dolayısıyla malzemelerin ömrünü de kısalmaktadır.

Sürtünmeden kaynaklı deformasyonları engellemek için ısı transferinin artırılması gerekmektedir. Kritik devir hızına ulaşıncaya kadar, yağlama işlemi yarı-sıvı koşullarda gerçekleşir ve bu aşamada yüksek temas gerilmeleri ortaya çıkar. Yüksek gerilmeler, muylu ara yüzeyinde yatak sarma olarak bilinen kaynama riskini artırır. Bu nedenle, kaymalı yataklarla ilgili gerçekleştirilecek deneysel çalışmaların, farklı çalışma koşullarında doğru bir şekilde simüle edilmesi mühim bir konudur.

Tarih boyunca hayatın pek çok alanında kullanılan temel malzemeler arasında pirinci saymak mümkündür. Pirincin içeriğinde bulunan bakır ve çinko sayesinde mukavemet, süneklik, sertlik özellikleri barındırır. Böylece aşınma dayanımına sahip malzemeler elde edilebilmektedir. Pirinç malzemelerin içeriğinde bakır ve çinko dışında az miktarda da olsa görülen kurşun, silisyum, mangan, alüminyum gibi elementler sayesinde ihtiyaç duyulan farklı özellikler elde edilmektedir. Pirinç alaşımına bulunan alüminyum, korozyona karşı direnci artırırken kurşun ilavesi, malzemenin işlenebilirliğini artırmaktadır. Pirinç malzemelerin talaşlı imalatı esnasında takımlarda oluşan aşınma oranı düşüktür. Bu durum pirinç malzemelerin imalat maliyetini de azaltmaktadır. Yüksek korozyon direncine sahip pirinçler, diğer

malzemelerde ihtiyaç duyulan korozyon önleyici kaplama maliyetlerinden tasarruf sağlar. Pirinç, mekanik özelliklerinin yanı sıra yukarıda belirtilen maliyet avantajlarından dolayı da tercih edilmektedir.

Çalışmada, yatak ömrünün maksimizasyonu için etkili olan parametrelerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, hidrodinamik radyal kaymalı yatakların tribolojik performansına etki eden farklı güç seviyelerinde, farklı yağlayıcıların etkisi pirinç malzemenin aşındırılması yoluyla incelenecektir. Gerçek bir deney düzeneğinde yatak ömrünün incelenmesi, çıkış parametresi olarak sıcaklık değişimi ve yüzey pürüzlülük değerleri çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında 95 N, 120 N, 145 N olarak üç farklı yük, 500 dev/dk, 1000 dev/dk, 1500 dev/dk değerinde üç farklı hız ve bitkisel yağ, sentetik yağ ve bor yağı olmak üzere üç farklı yağlayıcı kullanılmıştır. Deneyler tam faktöriyel deney tasarımına göre planlanmış ve 9 deney yapılmıştır. Yağlayıcı seçiminde endüstriyel kullanım alanı yoğunluğu ve temin edilebilirlik dikkate alınmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Taraması

Davim, yürüttüğü deneysel çalışmalarda pirinç ve çelik gibi yaygın olarak kullanılan malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını kuru ortamda incelemiştir. (Davim,2000) Deneyler pin-on disk deney cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deney cihazı, malzemelerin yüzeylerinin temas etmesini ve kaymasını simüle eden bir ortam sağlamaktadır. Deneylerde incelenen ana parametreler şunlardır: yük (F), kayma hızı (V), sıcaklık (T) ve sürtünme katsayısı (μ). Deneylerin tasarımı ve verilerin toplanması, taguchi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hız/yük ve yük/sıcaklık değişkenlerinin sürtünme katsayısı üzerinde önemli etkilerinin olduğunu göstermiştir. Ayrıca, aşınma davranışı üzerinde yapılan analizler sayesinde, yük faktörünün aşınma üzerinde önemli bir etkisinin olduğu sonucunu verirken, sıcaklık değişikliğinin aşınmaya etkisinin yüke göre daha az olduğu görülmüştür.

Adatepe ve Bıyıklıoğlu, yapmış oldukları çalışmalarda radyal kaymalı yatakların, dinamik yükler altında farklı yağ giriş sıcaklıklarına karşı göstermiş oldukları performansı incelenmişlerdir. (Adatepe ve Bıyıklıoğlu, 2009) Deneylerde, yatak yükü ve diğer parametreler sabit olacak şekilde, sadece yatağa aktarılan yağın sıcaklığı 20 °C, 40 °C ve 60 °C olacak şekilde belirlenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Yatakta oluşan minimum güç kaybı, 60 °C yağ giriş sıcaklığında ortaya çıkmıştır. 20 °C ve 40°C sıcaklıklarındaki sonuçlar incelendiğinde ise yağ giriş sıcaklığı arttıkça radyal kaymalı yatakta güç kaybının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Maksimum yağ film basıncı, 60 °C yağ giriş sıcaklığında meydana gelmiştir. Kaymalı yataklarda yükü, yağ filmi taşımaktadır. Yağ film basıncının büyük olması yatağın yük taşıma kapasitesinin fazla olması anlamına gelmektedir. Yağ giriş sıcaklığının fazla olması yatak çalışma sıcaklığını artıracak, böylece yağın viskozitesi azalacaktır. Viskozite azaldıkça yağ film kalınlığı da azalacaktır. Yağ film kalınlığının azalması sonucunda yükü karşılamak için gereken yağ film basıncı artacaktır. Bu bilgilere paralel olarak yatakta görülen yağ film kalınlığının minimum değeri 60 °C yağ giriş sıcaklığında ortaya çıkmıştır.

Baş, yapmış olduğu deneysel çalışmalarla, hidrodinamik kaymalı yatakların çalışma performanslarına yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemeyi amaçlamıştır. (Baş, 2022) Bu amaç doğrultusunda, aynı malzeme ve geometrik boyutlara sahip üç farklı yatak numunesi kullanmış ve bu numuneler üzerinde farklı yüzey pürüzlülükleri oluşturmuştur. Deneyleri iki farklı yük

koşulunda gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde, sıvı sürtünme bölgesine kıyasla yüzey pürüzlülüğünün daha belirgin bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yatak yüzeyinin pürüzlü olmasının, yağ filmi oluşumunun kapasitesini azalttığını, buna bağlı olarak aşınma miktarının arttığını ve yatak içindeki güç kaybının arttığını göstermektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte, yatak ömrünün azaldığı ve yatak performansının düştüğü tespit edilmiştir.

Varol, toz metalürjisi (T/M) yöntemi ile imal edilen ve içerisinde Cu ve Fe malzemelerini barındıran kendi kendini yağlayan yatak malzemeleri üzerinde hızın, aşınma üzerindeki etkilerini incelemiştir. (Varol, 2001) Aynı yük koşulları altındaki çalışmalarda aşınma miktarları incelendiğinde, her iki yatak malzemesinde belirgin değişiklik olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanında demir esaslı T/M yatakların sürtünme performanslarının, bronz yataklarından daha kötü olduğu görülmüştür.

Rodichev ve ark., sert iklim koşullarında çalışan kamyon süspansiyonlarında kullanılan yatakların güvenilirliğini ve verimlerini sürtünmeyi azaltan malzemeler kullanarak artırmayı hedeflemiştir. (Rodichev ve ark., 2021) Bunun için çeşitli kaplama türlerinin sürtünmeyi azaltma özelliklerini teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Aşınma direnci çalışmaları, kamyon süspansiyonlarında kullanılan düz yataklara uygulanan ve sınır sürtünme koşullarında çalışan bir sürtünme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda, sabit numune ve birbirine bastırılmış dönen karşı numune arasındaki sürtünme torkunu belirlemeyi amaçlanmıştır. Test için BrOF 10-1 bronz ve molibden disülfür bazlı sert anti sürtünme kaplamalı çelikten üretilen iki tür numune seçilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde BrOF 10-1 bronz numunenin, molibden disülfür bazlı sert anti sürtünme kaplamalı çelik numuneye göre düşük aşınma direncine ve yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda molibden disülfür bazlı anti-sürtünme kaplaması, daha düşük bir sürtünme katsayısında en az aşınmayı sağlamıştır.

Feyzullahoğlu ve Şakiroğlu, yapmış oldukları çalışmada yatak malzemeleri için daha iyi performans gösterebilecek Al esaslı alaşımlar geliştirmeyi amaçlamış ve bu alaşımların tribolojik performansını yağlama şartlarında incelemiştir. (Feyzullahoğlu ve Şakiroğlu, 2010) Araştırma kapsamında farklı Al esaslı alaşımlar, aşınma test cihazında ele alınmıştır. Aşındırıcı disk olarak SAE1040 çelik malzeme kullanılmıştır. Deney parametreleri arasında sürtünme basıncı 0,231-1,036 N/mm² ve kayma hızı 0,6-2,4 m/s olarak belirlenmiştir. Deneyler, 70 N normal yük altında, 20W/50 motor yağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, farklı alaşımların sürtünme ve aşınma davranışlarının kayma koşullarına bağlı olarak değiştiğini

göstermektedir. Özellikle Al8.5Si3.5Cu alaşımının diğer alaşımlara göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Al8.5Si3.5Cu ve Al15Sn5Cu3Si alaşımlarının yağlama altında yüksek aşınma direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın, Al15Pb3.7Cu1.5Si1.1Fe alaşımının en yüksek aşınma hızına sahip ve diğerlerine göre daha fazla aşındığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, yağlama koşullarında Al-Si ve Al-Sn alaşımlarının iyi performans sergilediğini ve tercih edilebileceğini göstermektedir.

Feyzullohoğlu ve ark., yapmış oldukları çalışmalarda dövme ve ısıtma işlemi görmüş farklı kimyasal bileşimlerdeki alüminyum alaşımların yağla yağlanmış şartlardaki tribolojik performanslarını incelemiştir. (Feyzullohoğlu ve ark., 2013) İncelemeye tâbi tutulan test numuneleri Al-8.5Si-3.5Cu ve Al-15Pb-3.7Cu-1.5Si-1.1Fe'dir. Numunelerin dövme, ısıtma işlemi ve sertliğin aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dövme işlemi ile malzemelere %10-%20 gerilme ve T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Dövme işleminin, numunelerin sertlik değerinde artışa sebep olduğu saptanmıştır. %20 gerilim uygulanmış numune, %10 gerilim uygulanmış numuneden daha yüksek sertliğe sahip olmuştur. Dövme işlemi, malzemelerin aşınma hızını artırsa da %10 ile %20 arasında değişen dövme gerilimi, malzeme kaybı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır. Isıtma işlemi süreci, test edilen numunelerin sertliğinde artışa sebep olmuştur. Ancak sertlik artışına bağlı olarak ısıtma işlemiyle ortaya çıkan aşınma direnci, tane büyümesi nedeniyle yok olmuştur. İnceleme sonucu, yağla yağlanmış koşullarda Al-Pb alaşımının Al-Si alaşıma göre yüksek aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir.

Li ve Yin, kalay esaslı yatak malzemelerinin başlatma ve durdurma koşullarındaki tribolojik davranışlarını incelemiştir. Başlatma ve durdurma koşulları için hız 0 ile 3000 dev/dk arasında yapılmıştır. (Li ve Yin, 2020) Kararlı durum testi için hız 3000 dev/dk'dır. Tüm testler, 5-15 MPa yük altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ulaşılan sonuçlar şu şekildedir; yatak yükü 5MPa ve 500 d/dk hızda, minimum yağ film kalınlığı 4,57 mm'dir. Bu değer minimum film kalınlık değeri olan 4,3 mm'ye çok yakındır. Yani 500 d/dk'dan düşük hızlarda ve 5MPa'dan fazla yüklerde yatak karışık yağlama durumunda çalışacak ve yatak aşınması görülecektir. Yağ film kalınlığı 15,9 mm de sabit tutulduğunda ve hız 1000 / 3000 d/dk arasında arttıkça maksimum film basıncı 4,53MPa'dan 13,6MPa'ya çıkmaktadır. Yani film kalınlığı sabit olduğunda yüksek dönme hızı, yatak yüzeyi film basıncını ve kavitasyonu artırır. Yüksek yağ film basıncı ve kavitasyon, yatak yüzey yorgunluğunu hızlandırır ve bu durum yatak ömrünü azaltır. Yük 5.0 ila 15.0 MPa arasında arttıkça, yatağın ağırlık kaybı sadece 0.27 ila 1.27 mg artmıştır. Ancak başlatma-durdurma çalışma koşullarında, yük 5.0 ila 12.5 MPa arasında arttıkça yatak aşınma kaybı 33.73 ila 86.5 mg arasında artmıştır. Bu nedenle, yatağının ömrünü etkileyen önemli faktörler yük ve başlatma-durdurma döngülerinin sayısıdır.

Yatağın karışık yağlama durumundan dinamik yağlama durumuna geçişi için gerekli kritik hız, yük arttıkça artar. Ayrıca film kalınlığı sabit tutulmaya çalışıldığında dönme hızındaki artış, yatakların maksimum film basıncını ve kavitasyonu artırır. Başlatma-durdurma çalışma koşullarında yatak aşınması, kararlı çalışma koşullarına göre çok daha fazladır. Bu durum motorun çalışma ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. Bununla birlikte tam bir yağ filmi oluşmadığından başlatma anında yataklar genellikle sınır yağlaması durumunda ve karışık yağlama durumunda bulunur. Yatakların sürtünme ve aşınma hızları, stabil yağlamaya göre çok daha yüksektir.

Sınır yağlama sırasında, yük arttıkça yatak ve şaft arasındaki mekanik kilitlenme ve yapışma artar. Bu statik sürtünme katsayısının artmasına neden olur. Karışık yağlama sırasında ise yük arttıkça yağ filminin sıcaklığı artar ve yağlayıcı yağın viskozitesi azalır. Bunun sonucunda yatağın sürtünme katsayısını azaltır. Ancak hidrodinamik yağlamada yükün sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi belirgin değildir. Çünkü şaft ve yatak tamamen yağlayıcı yağ film tarafından ayrılmıştır. Kararlı çalışma koşullarında yatakların başlıca aşınma biçimleri, abrazyon aşınmasıdır. Başlatma-durdurma çalışma koşullarında ise yatakların başlıca aşınma biçimleri; yapışma aşınması, abrazyon aşınması ve yorgunluk aşınmasıdır.

Cabrera ve ark., AISI 52100 rulman çeliğinin DC akım altındaki etkilerini elektrikli kuru ve sınır yağlanmış temas koşullarında incelemiştir. (Cabrera ve ark., 2023) Elektrikli araçların güç aktarım sistemlerinde bulunan rulmanlar; yüksek hız, yüksek tork ve sıcaklık gibi zor çalışma şartlarına sahiptir. Bununla beraber elektrik akımı ile birleştiğinde kontrolsüz veya kaçak elektrik akımlarının temas ara yüzlerinden geçmesi durumu daha da kötü bir hale getirmektedir. Çünkü yapışkan, aşındırıcı ve oksidatif aşınmayı tetiklediği için hizmet ömürlerini azaltmaktadır. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda, temas yüzeylerinden DC akım geçirilmesinin çeliklerin kuru ve yağlanmış koşullarda sürtünme katsayısı ve aşınma oranında önemli değişiklikler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. DC akımın kuru kayma temaslarında sürtünme katsayısı ve aşınma oranı ciddi anlamda artmıştır. Yağlanmış koşullarda ise sürtünme katsayısında azalma olurken aşınma kuru temasta olduğu gibi artmıştır. Elektrik akımının kuru ve yağlanmış koşullarda aşınmayı artırmasının nedeni, yüzeylerin daha hızlı ve etkili bir şekilde oksitlenmesi ve bunun sonucunda büyük miktarda oksitlerle zengin aşınma parçacıkları üretmesine dayandırılmaktadır.

İçten yanmalı motorların krank yataklarında düşük sürtünme özellikleri ve iyi uyum sağlama kabiliyetlerinden dolayı kurşun bazlı malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat çevre sorunları ve düşük mukavemeti sebebiyle kurşun kullanımı kısıtlanmaktadır.

Gebretsadik ve ark., kurşun yerine kullanılabilecek kurşun içermeyen malzemelerin yataklardaki performansını deneysel olarak incelemişlerdir. (Gebretsadik ve ark., 2015) Kullanılan malzemeler $AlSn_{25}Cu_{1.5}Mn_{06}$, $CuSn_5Zn_1$, $CuSn_5Zn_1$ 'dir. Kurşun içeren $CuPb_{23}Sn_2$ malzemesi ise referans olarak alınmıştır. Yapılan deneyler ve incelemelere göre; hem oda sıcaklığında hem de $95\text{ }^{\circ}C$ 'de Al-Sn bazlı kaplama (A1) ve Pb bazlı kaplama malzemeleri (B1) için, dönme hızı arttıkça sürtünme katsayısındaki düşüş keskindir. PAI tabanlı kaplama (A2) için dönme hızı arttıkça sürtünme katsayısındaki azalma yavaştır ve bu değerler oda sıcaklığında ve $95\text{ }^{\circ}C$ ' de önemli ölçüde farklıdır. Pb içermeyen Al-Sn esaslı kaplama (A1), herhangi bir kaplama olmayan Pb içeren rulman malzemesinden (B1) daha yüksek sürtünmeye fakat daha iyi aşınma direncine sahiptir. Benzer sürtünme davranışı, PAI esaslı malzeme aşındığında Al-Sn esaslı kaplama (A3) için de gözlemlenmiştir. Daha yüksek yüklerde, Al-Sn esaslı kaplama (A1) ve ara kaplamanın (A3) sürtünme davranışı sıcaklıktan etkilenmektedir. Yapışma kayma derecesi oda sıcaklığında $95\text{ }^{\circ}C$ 'de olduğundan daha yüksektir. PAI bazlı kaplama, daha düşük kayma hızlarında en düşük sürtünmeyi göstermekte ve Pb bazlı Al-Sn bazlı malzemelere göre daha iyi aşınma direncine açığa çıkmaktadır.

Wang ve Sheng, SA508 ile üç farklı tür grafit malzeme olan M300T, ZC7-3 ve ZC7-3S arasındaki sürtünme ve aşınmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Bu grafit malzemelerinin farklı sıcaklık ve yük altında sürtünme ve aşınma miktarından yola çıkarak nükleer güç santrallerine uygulanıp uygulanamayacağını belirlemeyi amaçlamışlardır. (Wang ve Sheng, 2020) Bu üç grafit malzemenin sürtünme katsayıları belirli bir sıcaklık veya yük altında hedef değeri aştığından dolayı nükleer güç santrallerine uygulanmasının mümkün olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ünlü ve ark., yapmış oldukları çalışmada $CuSn_{10}$ bronzundan üretilen kaymalı yatakların farklı yük ve hızlarda, kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme ve aşınma özelliklerini inceleyerek birbirleriyle karşılaştırmışlardır. (Ünlü ve ark., 2005) Deneyler, radyal kaymalı yatak aşınma test cihazında yapılmıştır. Aşındırıcı olarak SAE1050 çelik mil kullanılmıştır. Deney parametreleri 10 N ve 20 N yük, 750 dev/dk ve 1500 dev/dk hızlarda kuru ve yağlı ortam şartları dikkate alınmıştır. Kuru ortamda ve yağlı ortamlarda yapılan deneyler sonucunda yağlı ortamlara göre yüksek sürtünme katsayısı değerleri ($0,6-0,8\text{ }\mu$) elde edilmiştir. Bunun sonucunda kuru ortamlarda aşınmanın 7-8 kat daha fazla aşınma ve ağırlık kaybı olduğu sıcaklık değerlerinde ise 2-3 kat arasında farklılık görülmüştür.

Salman, makine sistemlerinde yağlayıcı olarak kullanılan mineral yağlar yerine yağlayıcı ya da katkı maddesi olarak bitkisel yağları kullanarak bir çalışma yapmıştır. Farklı

çalışma koşullarında tribolojik özellikleri incelemiştir. (Salman, 2011) Deneyler sırasında sabit yüklü radyal kaymalı yatak deney cihazı ve pim disk aşınma test cihazından faydalanmıştır. Çalışmalarda sürtünme kuvveti, aşınma oranı, yağ numunelerinin viskoziteleri, yüzey pürüzlülükleri ve mikroskopik görüntüleri incelemiştir.

Yapılan deney sonuçlarına göre; yağların tribolojik performanslarına katkı maddesi miktarının önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Bitkisel yağlar ve metil esterlerde madeni yağlardaki gibi yatakta oluşan yükün artmasıyla sürtünme kuvveti artarken, sürtünme katsayısı azalmıştır. Sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısına mil hızı, madeni yağlarda etkili olurken, bitkisel yağlar ve esterlerde daha az etkili olmuştur. Viskozite testleri sonucunda, kullanılan tüm madeni ve bitkisel yağların viskozitelerinde azalma olduğu görülmüştür. Fakat madeni yağlara katkı olarak bitkisel yağların eklenmesiyle karışımların viskozitelerinin yüksek sıcaklıklarda arttığı görülmüştür. Buradan da bitkisel yağların sınır ve karışık yağlama koşullarında, yüksek sıcaklıklarda katkı maddesi olarak kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır.

Sınır yağlama koşullarında aşınmanın fazla olduğu, SEM görüntülerinde yüzeydeki izlerin büyük olduğu ve abrasif aşınma görülmüştür. Sınır yağlama koşullarında pim temas yüzeylerindeki izler sıvı filmlili yağlama koşullarındaki pim izleri daha belirgin olarak gözlenmiştir. Aşınma deney sonuçlarına göre sınır yağlama koşullarındaki sürtünme katsayıları ve aşınma miktarları sıvı filmlili yağlama koşullarına göre daha fazladır. Bitkisel yağlar ve esterler sınır yağlama koşullarında sürtünme katsayısını düşürmüş, aşınma oranı bakımından ise sıvı filmlili yağlama koşullarında baz yağa yakın veya daha az değerde olmuştur. Bitkisel yağlar ve esterlerin sürtünmenin azaltılması bakımından sınır yağlamada etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Temas yüzeyleri incelendiğinde aşınma miktarına ve aşınma izlerine yağlayıcının ve katkı maddelerimin etkisinin olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda madeni yağlar yerine çevreye zarar vermeyen bitkisel yağlar ve esterlerin kullanımının mümkün olduğu görülmüştür.

Yılmaz ve ark., yapmış oldukları çalışmada toz metalürjisi ve döküm yöntemiyle üretilmiş yatakların tribolojik performanslarını karşılaştırmışlardır. (Yılmaz ve ark., 2010) Toz metalürjisi ile üretilen yataklar CuSn10 ve Fe-Grafit iken döküm ile bakır esaslı CuSn10 ve demir esaslı Fe-C olmuştur. Deney parametreleri 20N yük ve 0,785m/s hız belirlenmiş olup radyal kaymalı yatak test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı mil olarak SAE 1050 çeliği seçilmiştir. Deney 2,5 saat yağlı ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı toz metalürjisi ile üretilen bronz yatakta 0,01-0,02 değerleri görülürken, en yüksek

sürtünme katsayısı döküm ile üretilen bronz yatakta 0,8-0,9 olarak görülmüştür. Yatak sıcaklıklarında çok fazla bir değişiklik olmamakla birlikte en yüksek sıcaklığın 48-52 °C ile döküm bronz yatakta ölçülmüş, en düşük sıcaklığın ise 42-45 °C ile döküm demir yatakta ölçülmüştür. Ağırlık kaybında ise 12-13 mg ile en fazla bronz yatakta olurken, 1-2 mg ile döküm demir yatakta en az seviyede ağırlık kaybı olmuştur.

Ünlü ve ark., saf haldeki Cu, Sn, Zn malzemelerini radyal kaymalı yatak test cihazında 2,5 saat boyunca 20N yük altında, 1500 dev/dk hızda SAE90 yağ kullanarak test etmişlerdir. (Ünlü ve ark., 2010) Deneylerden elde edilen sonuçlara göre en yüksek sürtünme katsayısı 0,08-0,1 olarak Cu malzemedan üretilen yatakta meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak en fazla ağırlık kaybı yine Cu malzemede görülmüştür. Deney malzemelerin sahip oldukları mukavemetin yetersiz olmasından dolayı tek başına kullanımı uygun olmadığı sonucuna ulaşılmış. Cu malzemenin mukavemetini Zn ve Sn elementlerinin ilavesi ile artırılabilceği belirtilmiştir.

Gao ve ark., CuSn10 kalay bronzuna T-401 alaşımın eklenmesiyle elde edilen malzeme ile AISI 4340 çelik burcun iç yüzeyi kaplanmıştır. (Gao ve ark., 2011) Aşındırıcı mil için AISI 9310 malzeme kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılacak diğer numune ise AISI 1015 burç Pb/CuSn10 karışımı ile kaplanmıştır. Elde edilen numunelerin tribolojik özellikleri kıyaslanmıştır. Yapılan deneyler 9 m/sn hız ve sürtünme katsayısı 0,5 olana kadar iki dakikada bir 1 N'dan 50 N'a kadar yükleme yapılmıştır. Pb/CuSn10 kaplı bronz burçta T-401/CuSn10 kaplı malzemeye göre sürtünme katsayısının daha fazla olduğu ve aşınma direncinin daha düşük olduğu sonucuna ulaşımlardır.

Tevrüz, yapmış olduğu çalışmada PTFE+%35 karbon elyaf takviyeli malzeme ve PTFE + %25 malzemenin sürtünme ve aşınma davranışlarını kaymalı yatak test cihazında incelemiştir. (Tevrüz,1998) Deney parametrelerini yük, hız ve kayma mesafesi olarak belirlemiştir. Öncelikle Yük ve hızı artırmış daha sonra kayma mesafesini artırarak yatakları incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda PTDE + %35 karbon elyaf malzemenin sürtünme katsayısı saf PTFE ve PTFE + %25 cam malzemeye göre daha iyi aşınma özelliği gösterirken en kötü sürtünme katsayısı saf PTFE malzemede görülmüştür.

Jia ve ark., bronz-grafit kompozit malzemelerini toz metalürjisi yöntemi ile üretmişlerdir. Bu malzemeleri 100, 200, 300 ve 400 N yüklerde 0,53 ve 1,06 m/sn hızda 120 dk boyunca kuru ve sulu ortamlarda ring on blok test cihazında teste sokarak incelmişlerdir. (Jia ve ark.,2004) Elde edilen sonuçlara göre sürtünme katsayısı sulu ortamda 0,25-0,32

olurken, kuru ortamda 0,21-0,28 olarak bulmuşlardır. 100-200 N yük altında aşınma miktarı sulu ortam koşullarında daha az bir aşınma gözlemlenmiştir.

2.2. Literatür Değerlendirmesi

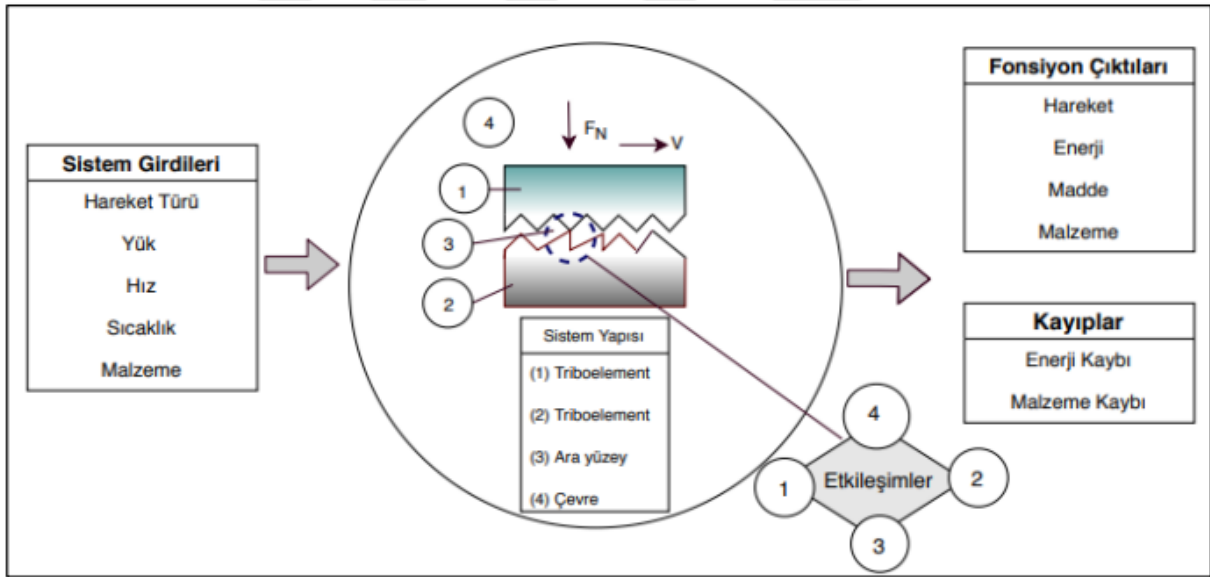
Yatak performanslarını artırmaya yönelik pek çok teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, farklı malzemelerin çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak imal edilen yatakların tribolojik davranışları incelenmiş; yük, hız, yağ sıcaklığı, yüzey pürüzlüğü ve yağ tipi parametreleri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda literatür çalışmaları incelendiğinde kaymalı yatakların makine ve sistemlerin verimli ve güvenilir şekilde çalışabilmesinde önemli bir etken olduğu ve yataklara ilişkin Ar-Ge çalışmalarının zorluğu da var olan bir gerçektir.

Bu çalışmada ise; kaymalı yatakların servis ömürlerinin arttırılması için dikkate alınması gereken parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylerde iş parçası olarak pirinç esaslı kaymalı yatak malzemesi kullanılmış olup farklı hız, yük ve yağlayıcı koşullarında parametrik olarak deneyler yapılmıştır. Kaymalı yatakların tribolojik performansları, kaymalı yatak deney düzeneğinde incelenmiştir.

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Triboloji

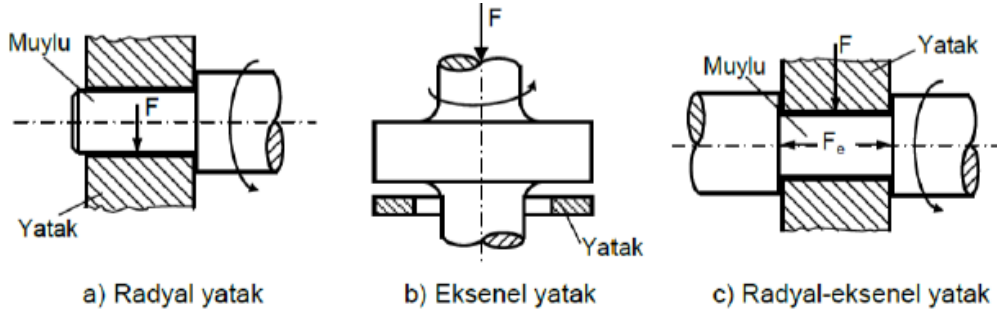
Triboloji; endüstriyel uygulamalarda birbiri ile temas halinde çalışan makine elemanlarının sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve birbirleri arasındaki ilişkileri incelemektedir. Fren ve kavrama gibi mekanizmalarda sürtünmeye ihtiyaç duyulurken genel olarak istenen bir durum değildir. Triboloji makine ve sistemlerde oluşacak sürtünme ve aşınmayı azaltarak sistemlerin daha verimli, dayanıklı ve güvenilir şekilde çalışabilmelerini amaçlamaktadır. Aşınmanın ana nedeni sürtünmedir. Sürtünmenin engellenememesi deformasyonu artırmakta ve malzemelerin performansını olumsuz etkilemektedir. Genel olarak aşındırıcı malzeme, aşınan malzeme, temas yüzeyi, ortam ve çevresel etkilerin içinde olduğu sisteme tribosistem denir. Tribosistemin daha iyi anlaşılması, aşınmaya karşı alınacak önlemlerin alınmasında yardımcı olacaktır. Tribosistem bileşenleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Tribosistem bileşenleri (Korkmaz, 2019)

3.2. Kaymalı Yataklar

Kaymalı yataklar; birlikte çalıştıkları millerin kuvvet doğrultusundaki hareketini sınırlayan, sürtünme kaybını azaltmaya çalışan ve dönme hareketi yapmasına izin veren makine elemanlarıdır. Yataklar kuvvet doğrultusuna göre eksenel ve radyal yataklar olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki yönden gelen kuvveti taşıyan yataklara ise radyal-eksenel yatak denir. Şekil 3.2’de radyal ve eksenel yataklar gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Radyal ve eksenel yataklar (Artun, 2022)

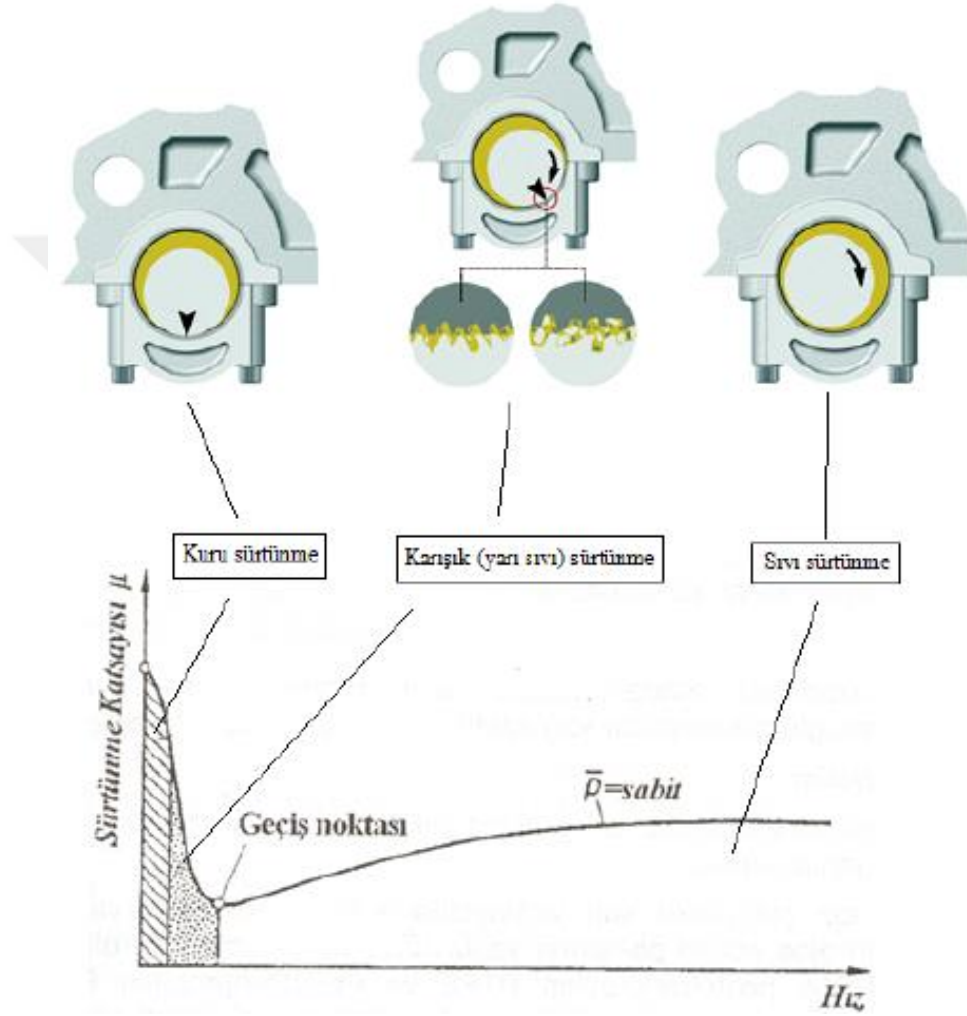
Yataklar, bağlı bulunan mil ve muylu yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi minimumda tutup aşınmayı engellemeyi sağlar. Sürtünmeyi düşürmek için yuvarlanma elemanları barındıran rulmanlı yataklar kullanılmaktadır. Diğer bir seçenek ise kaymalı yatak kullanımıdır. Kaymalı yataklar, mil ve yatak yüzeyleri arasındaki yağ filmi yardımıyla yatak yükünü karşılayacak basıncın meydana gelmesi ile yüzey temasını keserek aşınmayı azaltmaya çalışır. Yatakların temel kullanım avantajları şunlardır;

- Sürtünmeyi azaltırlar ve daha verimli çalışma ortamı sağlarlar.
- Aşınmayı azaltır.
- Titreşim ve darbeleri sönmüleyebilmektedir.
- Sessiz çalışır.
- Basit ve ucuz parçalardır.

3.3. Sürtünme

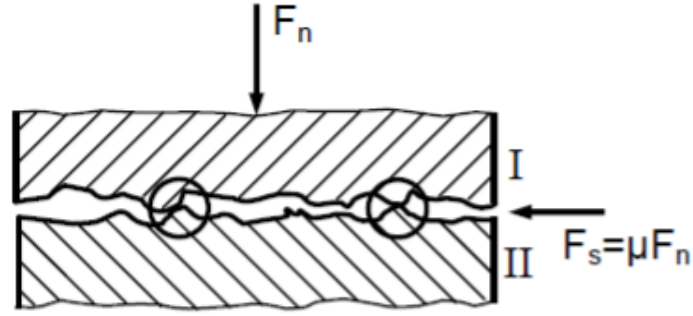
Sürtünme; birbirleriyle temas halinde olan ve izafi hareket eden cisimlerin temas yüzeylerindeki yüzey pürüzlerinin harekete veya hareket isteklerine karşı göstermiş oldukları dirençtir. Sürtünmeyi azaltabilmek için yüzeyler arasına yağlayıcı koyularak bir film tabakası elde edilir. Yağlayıcı kullanımına göre sürtünme; kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç şekildedir. Şekil 3.3'te kuru, yarı sıvı ve sıvı yağlamanın da olduğu tüm yağlama durumlarını gösteren Stribeck eğrisi verilmiştir. Stribeck eğrisinde sürtünmenin görüldüğü yatak ve mil arasında oluşan sürtünme katsayısının hıza bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Bu eğriye göre milin durduğu veya çok düşük hızlarda olduğu alanda kuru sürtünme görülmüştür. Ayrıca burada, sürtünme katsayısı en yüksek değere ulaşmıştır. Hızın artmasıyla sürtünme katsayısında düşüş görülmüştür. Bu bölgede ince bir yağ filmi oluşmuş ve yarı sıvı sürtünme olarak

isimlendirilir. Burada sürtünme katsayısı daha düşüktür ve karışık sürtünme görülür. Yarı sıvı sürtünmeden sıvı sürtünme bölgesine geçiş noktası sürtünme katsayısının en az olduğu yerdir. Bu noktadan sonra sıvı sürtünme başlar. Sıvı sürtünme bölgesinde sürtünme katsayısındaki artış, yağın iç basıncından kaynaklanmaktadır. Geçiş noktasının sol tarafındaki bölge “sınır yağlama”, sağ tarafındaki bölge “sıvı yağlama” olarak adlandırılmaktadır.



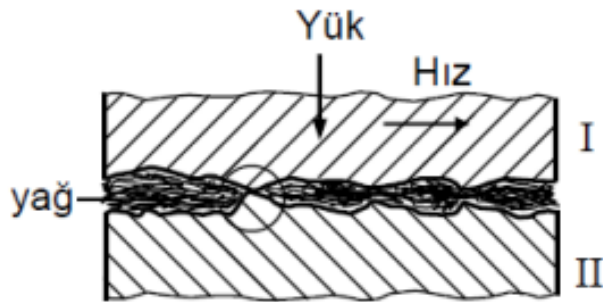
Şekil 3.3. Stribeck eğrisi (Adatepe,2012)

Kuru Sürtünme: Parçaların temas yüzeyleri arasında film tabaksı oluşturacak bir yağlayıcı olmadan yüzeylerin birbiri üzerinde kayarak hareket etmesi sonucu oluşan sürtünmedir. Yüzeyler oldukça temiz olsa bile girinti ve çıkıntı olarak tanımlanan yüzey pürüzlülüğü vardır. Cisimlerin temas noktaları bu girinti ve çıkıntılardır. Gerçek temas alanı, gözüken temas alanından çok azdır. Şekil 3.4'te kuru sürtünme hali gösterilmiştir.



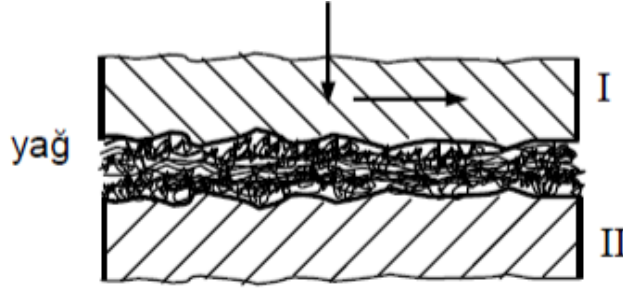
Şekil 3.4. Kuru sürtünme durumu (Artun, 2022)

Yarı Sıvı Sürtünme: Yüzeyleri birbirinden tamamen ayıracak bir yağlayıcı filmin olmadığı ve sıvı sürtünmenin oluşturulamadığı durumlardaki sürtünmedir. Şekil 3.5'te yarı sıvı sürtünme hali gösterilmiştir.



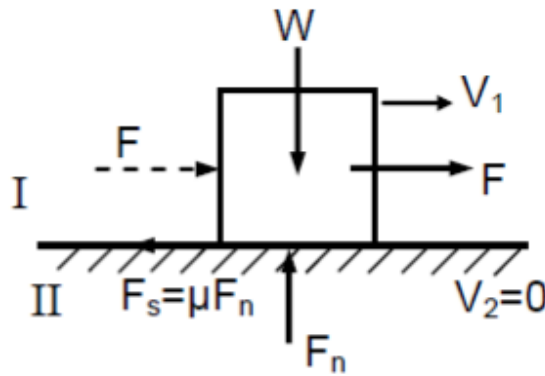
Şekil 3.5. Yarı sıvı sürtünme durumu (Artun, 2022)

Sıvı Sürtünme: İzafi hareket eden parça yüzeylerinin arasında yüzeylerin temasını kesecek şekilde yağ filminin olduğu durumlarda görülür. Şekil 3.6’da sıvı sürtünme hali gösterilmiştir.



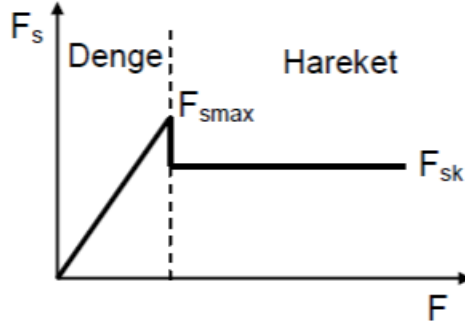
Şekil 3.6. Sıvı sürtünme durumu (Artun, 2022)

Sürtünme teorik olarak Şekil 3.7’de gösterilmiştir. “Coulomb sürtünme kanunu”na göre sürtünme, $F_s = \mu F_n$ denklemi ile tanımlanmıştır. Denklemdaki μ sembolü, sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Bir cisme itme veya çekme kuvveti uygulandığında iki durum görülür. Bunlar statik sürtünme ve dinamik sürtünme durumlarıdır. Uygulanan kuvvetin, cismin hareketi için yetersiz olduğu ve cisimlerin hareketsiz kaldığı durum statik sürtünme olarak tanımlanır. Bu denge için $F_s = F$ denklemi ortaya çıkmaktadır. Dinamik sürtünmede ise uygulanan F kuvveti F_s sürtünme kuvvetinden fazladır ve hareket söz konusudur. Bu durumda aşınma, sıcaklık değişikliği ve enerji kaybı meydana gelmektedir.



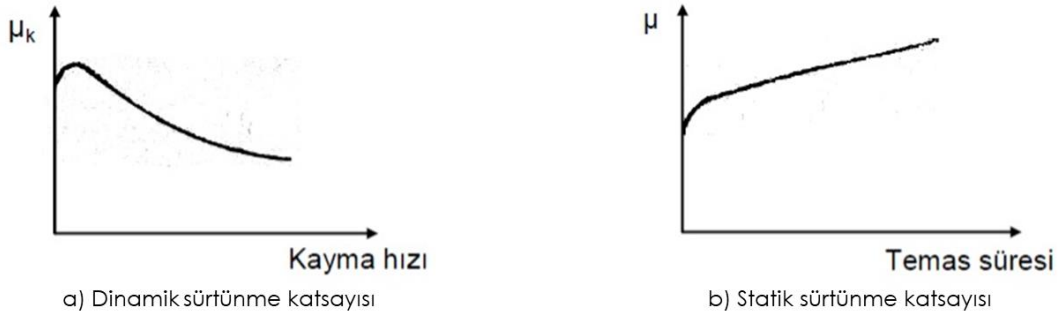
Şekil 3.7. Teorik sürtünme modeli (Koç, 2013)

Sürtünme kuvveti için F değeri arttıkça F_s kuvveti artar ve $F_{s\max}$ değerine kadar çıkar. F değeri, $F_{s\max}$ değerini aştıktan sonra cisim kaymaya başlar. Hareket başladıktan sonra F_s , $F_{s\max}$ 'tan daha küçük bir nokta olan dinamik sürtünme kuvveti olarak tanımlanan F_{sk} 'ya düşer ve cismin hareketi boyunca yaklaşık olarak sabit kalır. Sürtünme kuvvetindeki değişiklik Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Sürtünme kuvveti-Hareket kuvveti ilişkisi (Koç, 2013)

Dinamik sürtünme katsayısında kayma hızı arttıkça, az miktarda düşüş olmaktadır. Statik sürtünme katsayısı Şekil 3.9'da görüldüğü gibi temas süresine göre değişmektedir.



Şekil 3.9. Sürtünme katsayısının kayma hızı ve temas süresine göre değişimi (Koç, 2013)

3.4. Aşınma

Aşınma; temas halinde çalışan elemanların yüzeylerinde mekanik ya da kimyasal etkilerin yanında yağlamanın yetersiz kalması ve kayma hızına paralel olarak sıcaklığın artması gibi durumlardan dolayı küçük parçaların kopmasıyla meydana gelen istenmeyen yüzey bozulmalarıdır. Birbirlerine temas eden yüzeyler bir yağ filmi ile ayrılmadığı süre boyunca aşınma ortaya çıkmaktadır. Aşınma sonucunda malzemeler işlevsiz hale gelme ihtimali vardır.

Yağlayıcının olmadığı ya da yetersiz kaldığı durumlarda oluşan ısı, temas halindeki malzemeler tarafından uzaklaştırılır. Bu yüzden ısı iletkenliği yüksek olan malzemeler tercih edilmelidir. Aşınmaya etki eden faktörleri üç farklı grupta ele almak mümkündür:

Malzeme özelliklerine bağlı etkiler

- Yüzey pürüzlülüğü
- Sertlik
- Korozyon direnci
- Kristal yapı

Çevresel etkiler

- Sıcaklık
- Nem

Çalışma şartlarına bağlı etkiler

- Basınç
- Hız

Çeşitli şartlara bağlı aşınmalar olmasına rağmen bunlar birbirinden tamamen ayrılamamaktadır. Oluşan aşınmalar deformasyon durumlarına göre şu şekilde ayrılmaktadır:

- Adhezif aşınma
- Abrasyon aşınması
- Yorulma aşınması
- Korozyon aşınması

3.4.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma; temas halindeki cisimlerin izafi hareketleri sırasında birbirlerine mikro kaynak bölgeleri oluşturmaları ve hareketin devamında kaynaklanan bölgelerin kopması sonucu oluşan aşınma türüdür. Temas noktalarında oluşan basınç ve sıcaklığın aşırı yükselmesi kaynak oluşumunu kolaylaştırır. Adhezif aşınma yağlayıcının olmadığı kuru kayma yüzeylerinde izafi hareket eden malzemeler arasında sıklıkla görülen bir aşınmadır. Bu aşınma türü, birbiriyle kolay etkileşime geçen veya benzer yapıdaki malzemeler arasında meydana gelmektedir. Söz konusu aşınmayı engellemek yahut en aza indirmek adına sert ve

yumuşak malzemeler beraber çalışacak şekilde malzeme seçimi yapılmalıdır. Şekil 3.10’da adhezif aşınma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Adhezif Aşınma (Kopeliovich, 2023)

3.4.2. Abrazyon aşınması

Sürtünme halinde olan yüzeylerin arasına sert parçacıkların dışarıdan girmesi ya da bu parçacıkların yüzeylere gömülerek sert yüzeylerden parça koparması şeklinde gerçekleşmektedir. Yağlamalı yataklarda aşınma genellikle abrazyon aşınması olarak görülmektedir. Bunun önüne geçmek için yüzey sertleştirilmelidir. Sert parçacıkların dışarıdan girmesini engellemek için de sızdırmazlıkların iyi olması gerekir.

3.4.3. Yorulma aşınması

Yüzeylerin titreşimli yüklere tekrarlı şekilde maruz kalması sonucu yüzeyde küçük çatlaklar veya çukurların oluştuğu aşınma durumudur. Yorulma aşınması, rulmanlı yataklar gibi yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde görülmektedir. Temas alanları çok küçük bölgelerdir ve buralarda Hertz basınçları oluşmaktadır. Bu basınç, yüzeyin altında değişken kayma gerilmeleri oluşturur ve malzeme yüzeyinde yorulma başlar. Şekil 3.11’de yorulma aşınması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Yorulma Aşınması (Kopeliovich, 2023)

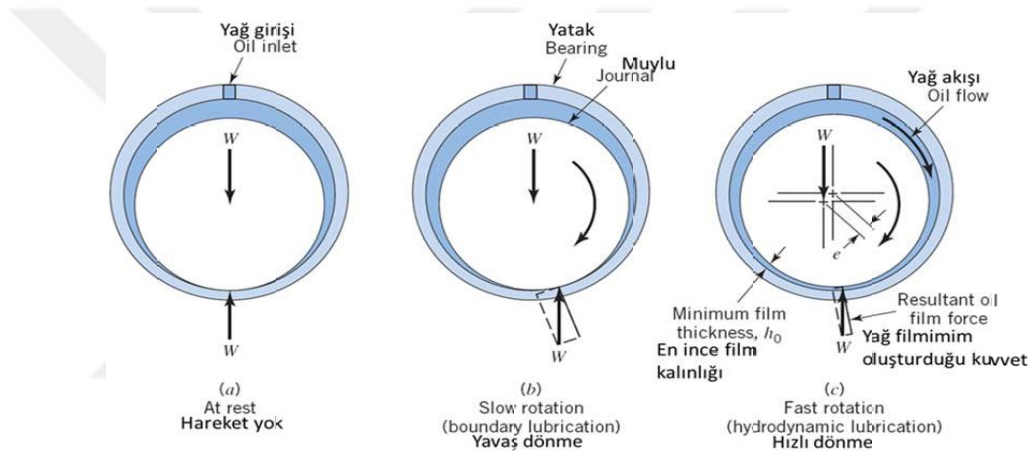
3.4.4. Korozyon aşınması

Metallerin çevre ile yaptığı kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeler sonucu görülen aşınmadır. Malzemelerin nemli ortamlarda yüksek sıcaklıklarda oksitlenmesi “kimyasal korozyon”; çözelti içerisinde oluşan oksitlenme ise “elektrokimyasal korozyon” olarak

tanımlanır. Korozyon zaman içinde en çok hasara neden olan aşınma türlerindendir. Korozyonu önleyebilmek için yüzeyin oksijenle olan bağının kesilmesi gerekir. Bu durumu yağlama veya kaplama gibi yöntemler ile sağlamak mümkündür.

3.5. Yağlama

Yağlama; birlikte çalışan makine elemanlarının yüzeyleri arasında meydana gelen sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı ortadan kaldırmak ve sıcaklık artışını engellemek için yüzeyler arasında yağ filmi oluşturulması durumudur. Yağ filminin oluşum aşamaları Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Radyal Kaymalı Yataklarda Sürtünmeler (Juvinall and Marshek, 2006)

Yataklar, yüzeydeki yağ filminin oluşma durumuna göre “hidrostatik kaymalı yataklar” ve “hidrodinamik kaymalı yataklar” olarak ikiye ayrılmaktadır.

Hidrostatik kaymalı yataklar; yağ filminin bir basınç pompası ile yağın yüzeylerin arasına gönderilmesiyle oluşturulan yataklardır.

Hidrodinamik kaymalı yataklar; yüzeylerin izafi hareketi sonucunda yağ filminin kendiliğinden oluştuğu yataklardır. Yüzeyler arasında sıkışan sıvı filminin oluşturduğu basınç sayesinde yüzeylerin teması engellenir, sürtünme kuvveti düşer ve yük taşıma kabiliyeti artmış olur. Milin dönüşü sırasında en dar yere yakın bir bölgede maksimum basınç oluşur. Şekil 3.13’te radyal kaymalı yataklardaki basınç dağılımları gösterilmiştir.

sorunsuz bir şekilde çalışmasını sürdürebilmesi açısından gereklidir. Grafit, MoS₂, polimerler ve metalik yağlayıcılar en sık kullanılan katı yağlayıcılar arasındadır.

3.6.2. Yarı katı yağlayıcılar

Yarı katı yağlayıcılar gres diye bilinen içerisinde katılaştırıcı katkıları ve sıvı yağlar olan yağlayıcılardır. Katılaştırıcı olarak madensel sabunlar olan alüminyum, baryum, kalsiyum, lityum, sodyum maddelerin yanında organik esaslı sabun olmayan maddeler kullanılmaktadır. Yarı katı yağlayıcılar % 65-95 yağ, %3-30 katılaştırıcıdan oluşmaktadır. Genellikle tekrar eden yükler altında, düşük ve orta hızlarda, uzun süreli yağlama gerektiren, sıvı yağ kullanımının mümkün olmadığı, bakım ihtiyacı az olan sistemlerde kullanılmaktadır. Yarı katı halde bulunmasından dolayı akmaya karşı dirençlidir ve yüksek basınçlar altında çalışabilmektedir. Fakat soğutucu özelliği az olduğu için yüksek sıcaklıklarda işlevini tam olarak yerine getirememektedir.

3.6.3. Gaz yağlayıcılar

Yüksek hız ve düşük yüklerde çalışan sistemlerde gaz yağlayıcı niteliğindeki hava, hidrojen, azot gibi gaz yağlayıcılar ve sıvı nitrojen, buhar ve organik buhar kullanılır. Gazların viskozitelerinin düşük olması oluşan sürtünme ve sıcaklık artışını azaltır. Fakat yük taşıma kapasiteleri düşüktür. Sıvı yağlayıcı kullanımı ilaç ve gıda sektöründe tercih edilmediğinden bu sektörlerde gaz yağlayıcılar kullanılmaktadır.

3.6.4. Sıvı yağlayıcılar ve viskozite

Katı yağlayıcılara göre kullanım rahatlığı, etki alanının daha geniş olması, ısı iletkenliği ve uzun ömürlü olması gibi avantajları sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. İlave edilen katkı maddeleri sayesinde çeşitli özelliklere sahiptir ve kullanım yerlerine bağlı olarak istenilen özelliklerde pek çok alanda tercih edilmektedir. Yağ seçimini etkileyen faktörler viskozite, yapışma kabiliyeti, yoğunluk, ısı iletkenlik ve donma noktası olarak sıralanabilir.

Sıvı yağlayıcılar madensel, organik ve sentetik yağlar olarak sınıflandırılmaktadır. Sıvı yağların özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Sıcaklık arttıkça viskozitesi azalmaktadır.
- Yüksek hızlara karşı dirençlidir.
- Korozyona karşı dayanıklıdır.
- Yağlamanın yanında yüzey temizleme ve soğutma özelliği vardır.

Madensel yağlar hidrokarbonlardan meydana gelen mineral yağ olarak da bilinen petrol türevi yağlayıcılardır. Madensel yağlar katkı maddeleri ile takviye edilebilme ve maliyet açısından uygun olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Organik yağlayıcılar hayvansal yağlar ve bitkisel yağlardan oluşmaktadır. Bu tür yağlayıcılar madensel yağlara göre daha iyi yağlama kabiliyetine ve yüksek viskoziteye sahiptir. Madensel yağların içerisine katkı olarak eklenen organik yağlar ısılatma kabiliyetini artırmaktadır. Çevreye zarar vermemesi, kolay temin ediliyor oluşu ve alevlenme noktasının yüksek oluşu gibi avantajları vardır. Fakat kullanım ömrünün az oluşu ve düşük sıcaklıklarda katılaşmasından dolayı yaygın olarak kullanımını engellemektedir.

Sentetik yağlar, ham petrol olmayan çeşitli kimyasal maddelerden ısı ve basınç yardımıyla üretilen yağlardır. Diğer yağlayıcılara göre molekül yapıları daha düzenli olduğundan dolayı sürtünme, geniş çalışma sıcaklığı, yağlama, soğutma ve aşınma özellikleri olarak daha iyidir. Düşük sıcaklıklarda akışkanlığı yüksektir. Sıcaklık arttıkça incelme görülmez. Bu özellikleri kıyaslandığında madensel yağlara göre performansları ve kullanım ömürleri daha uzundur. Fakat üretimleri sırasında pek çok işleminden geçtiği için maliyetleri yüksektir.

Yağlayıcı maddelerin seçiminde diğer bir özellik ise yağların viskoziteleridir. Viskozite akışkanların harekete karşı gösterdikleri dirençtir. Bu direnç akışkanların iç sürtünmesidir ve akışkanların yoğunluğunu belirlemektedir. Yağlayıcının yük taşıma, ısıl iletkenlik, kararlılık gibi özelliklerini belirlemektedir. Viskozitesi yüksek olan yağlayıcıların akışa gösterdikleri direnç daha büyüktür. Sıvı akışkanlarda sıcaklık arttıkça viskozite azalırken, gaz akışkanlarda sıcaklık arttıkça viskozite de artmaktadır. Yani sıcak sıvı bir akışkan harekete karşı daha düşük bir direnç göstermektedir. Basınç ise sıvı moleküllerini daha sıkı bir hale getirdiğinden viskoziteyi artırmaktadır. Viskozitenin sıcaklıkla azalması sonucu yağlayıcının yük taşıma kapasitesi düşmektedir. Bunun için kullanım şartlarının belirlenip bu yönde uygun viskoziteye sahip yağlayıcı tercih edilmelidir.

3.7. Yataklarda Malzeme Seçimi

Makine ve sistem tasarımında kullanılacak olan yatak malzemelerinin seçimi makinelerin verimli ve uzun ömürlü çalışmaları açısından önemli bir etkidir. Kullanım yerlerine göre metal, plastik ve kompozit malzemeler yatak malzemesi olarak seçilmektedir. Malzeme seçiminde hız, yük, sıcaklık, basınç, yağlama tipi gibi dikkat edilmesi gereken çeşitli parametreler vardır. Yatak malzeme seçiminde belirlenmesi gereken temel özellikler şu şekilde sıralanabilir;

Makinenin çalışma şartlarında maruz kalacağı yük, hız ve sıcaklığın belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar makine ömrü ve güvenliğini etkileyen faktörlerdir. Aşırı yükleme, aşırı sıcaklık ve hız sürtünmeyi artıracığından dolayı yatak aşınmalarını hızlandırmaktadır.

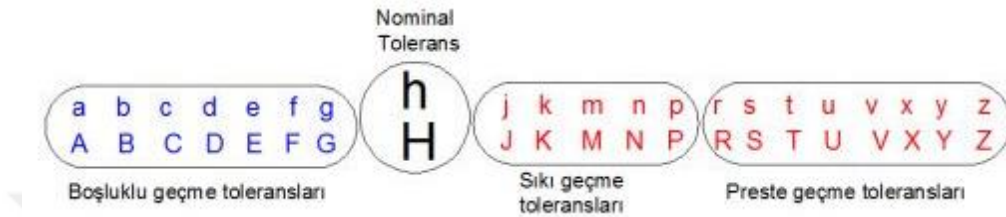
Yağlamanın nasıl yapılacağı yatak seçiminde göz önünde bulundurulmalıdır. Bazı yataklar kendinden yağlama özelliğinde olurken bazı yataklar dış yağlamaya ihtiyaç duymaktadır.

Birbirleriyle uyumlu çalışabilecek malzemelerin seçilmesi gerekmektedir. Yatağın yetersiz yağlama koşullarında dahi aşınma veya yatak sarmasıyla karşılaşmadan çalışabilmesi önemlidir. Bu ise mil, yatak ve yağlayıcının uyumuna bağlıdır. Uyumlu malzemeler yağlamanın yetersiz kaldığı ya da olmadığı durumlarda daha düşük sürtünme katsayısı görülür. Benzer özellikteki malzemeler birbirlerini daha hızlı aşındırırlar. Bu yüzden farklı tür veya farklı ısıl işlem görmüş malzemeler tercih edilmektedir. Genelde mil malzemesi sert çelikten seçilirken yatak malzemesi daha yumuşak bir malzeme tercih edilir. Bu sayede aşınma azaltılmış ve sadece yumuşak malzemedan yapılmış olan yatağın aşınması sağlanmış olur.

Yatak yüzeylerinde yorulmadan dolayı çatlaklar görülebilir. Bu çatlakların ilerlemesi yağ filmini olumsuz etkiler ve sıcaklık artışına neden olur. Bu sebeplerden dolayı yorulma direnci yüksek malzeme seçimi yapılmalıdır. Bunun yanında yataklarda görülen ortalama basıncın yaklaşık 2 katı maksimum basınç görülebilmektedir. Bu basıncın kalıcı deformasyon etkisi yapmaması için basma mukavemetinin yüksek olması gerekmektedir. Sürtünmeden dolayı oluşan ısının hızlı bir şekilde sistemden uzaklaştırılması için ısı iletkenliği iyi olan malzemeler seçilerek yatak performansını artırmaktadır. Yatak maliyetlerini azaltmak için metal yataklarda kolay işlenebilme özelliklerine sahip malzemeler seçilmelidir.

3.8. Geçme Toleransları

Makine ve sistemlerde pek çok farklı makine elemanı birlikte çalışmaktadır. Makine elemanlarının birlikte düzgün çalışabilmelerini sağlayan ölçü toleranslarını çalışma şartları belirlemektedir. Bu şartlar boşluklu geçmeden sıkı geçmeye kadar değişebilmektedir. Şekil 3.14.'te geçme toleranslarının harflendirme sistemi verilmiştir. A-G arasında bulunan büyük ve küçük harfler boşluklu geçmeyi gösterirken, J-Z arasında bulunan harfler sıkı geçmeyi göstermektedir.



Şekil 3.14. Geçme Toleransları

Geçme toleranslarının dereceleri bulunmaktadır. Bu dereceler 1-17 arasında değişmektedir ancak 1-4 arasındaki derecelendirmeler çok fazla hassasiyet gerektiren ölçü aletlerinin işleminde kullanılmaktadır. Genel olarak 5-11 arasındaki derecelendirmeler kullanılmaktadır. Parçaların kullanım yerlerinin belirlenip bu doğrultuda ölçülendirilmesi gerekmektedir. Çünkü gerektiğinden fazla hassasiyet maliyeti artırmaktadır. Her ölçüye göre tolerans değişmektedir ve bu ölçüler standartlara göre belirlenerek EK-1' de verilen tablo halinde oluşturulmuştur. Bunun yanında beraber çalışan elemanların ölçüleri tolerans çiftleriyle belirlenmektedir. Tolerans çiftleri tecrübeler doğrultusunda pratikte kullanım yerlerine göre aşağıdaki gibi standartlaştırılmıştır.

3.8.1. Boşluklu geçme tolerans çiftleri

H7-h6: Yüzeyleri yağlanarak geçirilen elemanlar için kullanılır. Örnek: Sık aralıklarla değiştirilmesi gereken kasnak göbekleri, kavramalar, tezgah parçaları.

H7-g6: Tutuk geçme. Örnek: Eksenel kayması gereken dişliler, biyel yatakları.

H8-h9: Rahat geçme. Örnek: Kayış kasnaklar, dişliler, kavramalar vb.

H7-f7: Hareketli geçme. Örnek: Takım tezgahları ana yataklar, krank şaftları.

H7-e8: Boşluklu geçmeler. Örnek: Yüksek sıcaklıklarda hareketliliğini devam ettirmesi gereken geçmeler

H7-d9: Çok boşluklu geçmeler.

3.8.2. Sıkı geçme tolerans çiftleri

H7-j6: Tık tıklayarak geçirme: Ağaç çekiçle vurularak yapılan kolay sıkı geçmelerdir. Örnek: kayış kasnaklar, dişliler, el tekerleri, yatak burçları vs.

H7-k6: Çekiçle rahat geçirme: Örnek; kasnaklar, rulman iç bilezikleri, el tekerleri

H8-n6: Çekiçle zor geçirme: Örnek; kasnaklar, kavramalar, kaplinler vs.

H7-n6: Presle geçirme: Örnek; Bir daha çıkarılmayacak kasnaklar, motor miline geçirilen rotorlar, muylu üstüne geçecek dişliler, göbek içlerine burçlar vs.

3.8.3. Presle geçme tolerans çiftleri

Tekrar sökülmesi istenmeyen parçaların geçmesi presle yapılmaktadır ve tolerans çiftleri şu şekildedir:

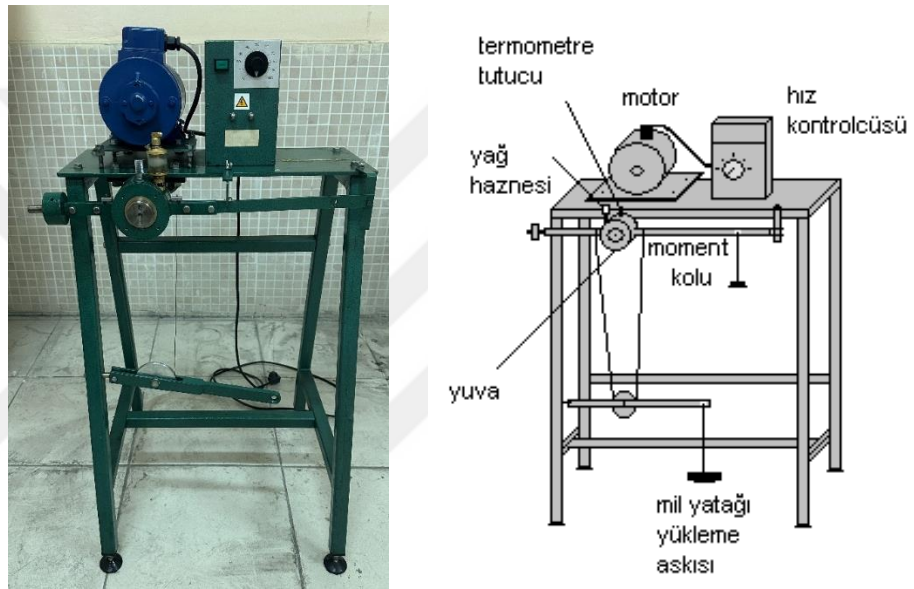
H7-r6: Orta şiddette sabit kuvvet etkisinde oynamayacak geçmeler. Örnek pik döküm göbek üstüne çelik çember geçirme, biyellerde yatak içine presle geçirilen burçlar vs.

H8-u8: Büyük sabit kuvvet altında oynamayacak geçmeler.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

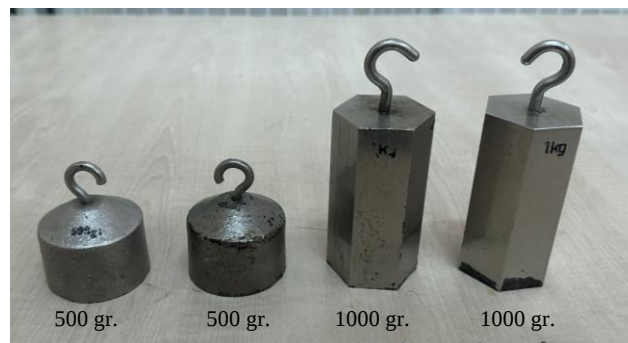
4.1. Deney Düzenekinin Özellikleri

Çalışmada kullanılan kaymalı yatak deney düzeneği Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunmaktadır. Düzenek tek fazlı bir elektrik motoru, hız kontrol ünitesi, aşındırıcı mil, moment kolu ve yükleme mekanizmasından oluşmaktadır. Deney düzeneğinin genel görünümü ve şematik olarak isimlendirilmesi Şekil 4.1’de verilmiştir. Motor ve hız kontrol ünitesi masa üzerine yerleştirilmiştir. Sistem, ayarlanabilir ayaklar sayesinde zemin üzerinde denge halinde kalabilmektedir.

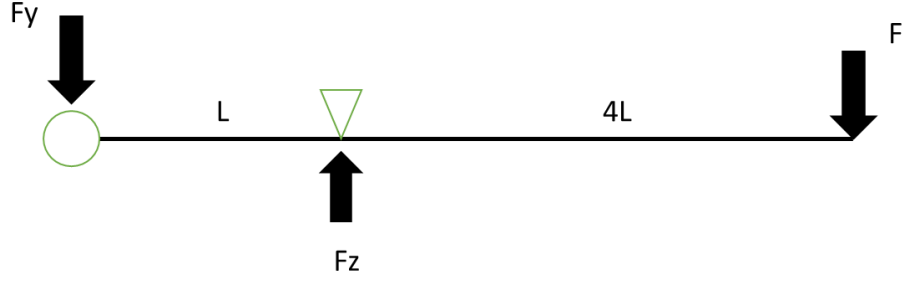


Şekil 4.1. Deney Düzeneği Genel Görünüşü

Deney düzeneğinde bulunan 4/1 oranında çalışan kaldıraç sistemi ve metal teller sayesinde yuvaya düşey yük uygulanabilmektedir. Sistemin kendi ağırlığı ve moment kolu dengeleyici yüklerinden kaynaklı olarak mile 45 N yük uygulanmaktadır. Sistemde kullanılan ilave yükler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu yüklerin mil üzerinde oluşturacağı kuvvetler Şekil 4.3’te verilen serbest cisim diyagramına göre belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Moment Kolu Yükleri



$$F * 4L = Fy * L$$

$$Fz = Fy + F$$

Şekil 4.3. Serbest cisim diyagramı

Aşındırıcı mil, olarak SAE 1050 çeliği kullanılmıştır ve Şekil 4.4'te gösterildiği gibi zeminin alt kısmında bulunmakta olup iki adet rulmanla yataklanmıştır. Milin uç kısmında moment kolunun bağlı olduğu ve yatak burcunun takılacağı bir yuva bulunmaktadır.



Şekil 4.4. Aşındırıcı Mil

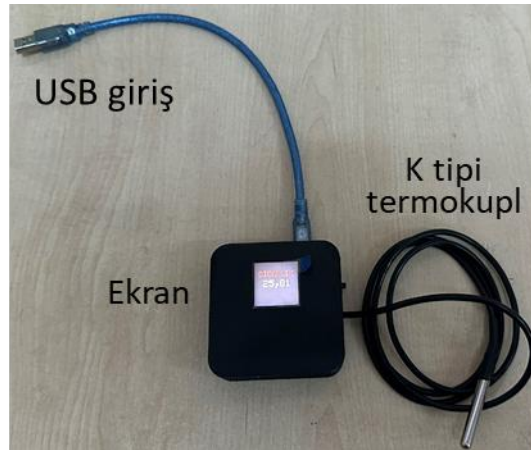
Yuvanın üst kısmında Şekil 4.5'te görüldüğü gibi mil ve burcun yağlanmasını sağlayan bir yağ haznesi bulunmaktadır. Yuvanın alt kısmında ise yağ tahliye delikleri yer almaktadır. Ayrıca çalışma sırasında yatakta meydana gelen sıcaklık değişimini incelemek için sıcaklık ölçüm yuvası bulunmaktadır. Elektrik motorundan elde edilen tork, kayış kasnak sistemiyle mile aktarılmaktadır.



Şekil 4.5. Yağlayıcı ve Sıcaklık ölçüm yuvası Görünümü

4.2. Sıcaklık Ölçüm Cihazı

Deneyler sırasında yatakta oluşacak anlık sıcaklık değişimleri Şekil 4.6’da verilen sıcaklık ölçüm cihazı sayesinde belirlenmiştir. Cihazda K tipi termokupl kullanılmıştır. Cihaz saniyede bir ölçüm yapmaktadır ve 0,05 °C sıcaklık hassasiyetine sahiptir. Sistemin yazılımı özel olarak hazırlanmış, ticari paket program kullanılmamıştır. Cihazın topladığı veriler ile anlık sıcaklık değişim grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.6. Sıcaklık Ölçüm Cihazı

4.3. Dijital Takometre

Deney sırasında devir ölçümü için Şekil 4.7’de verilen Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan DT-2234B modelinde 0,1 dev/dk hassasiyete sahip olan dijital takometre kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Dijital Takometre

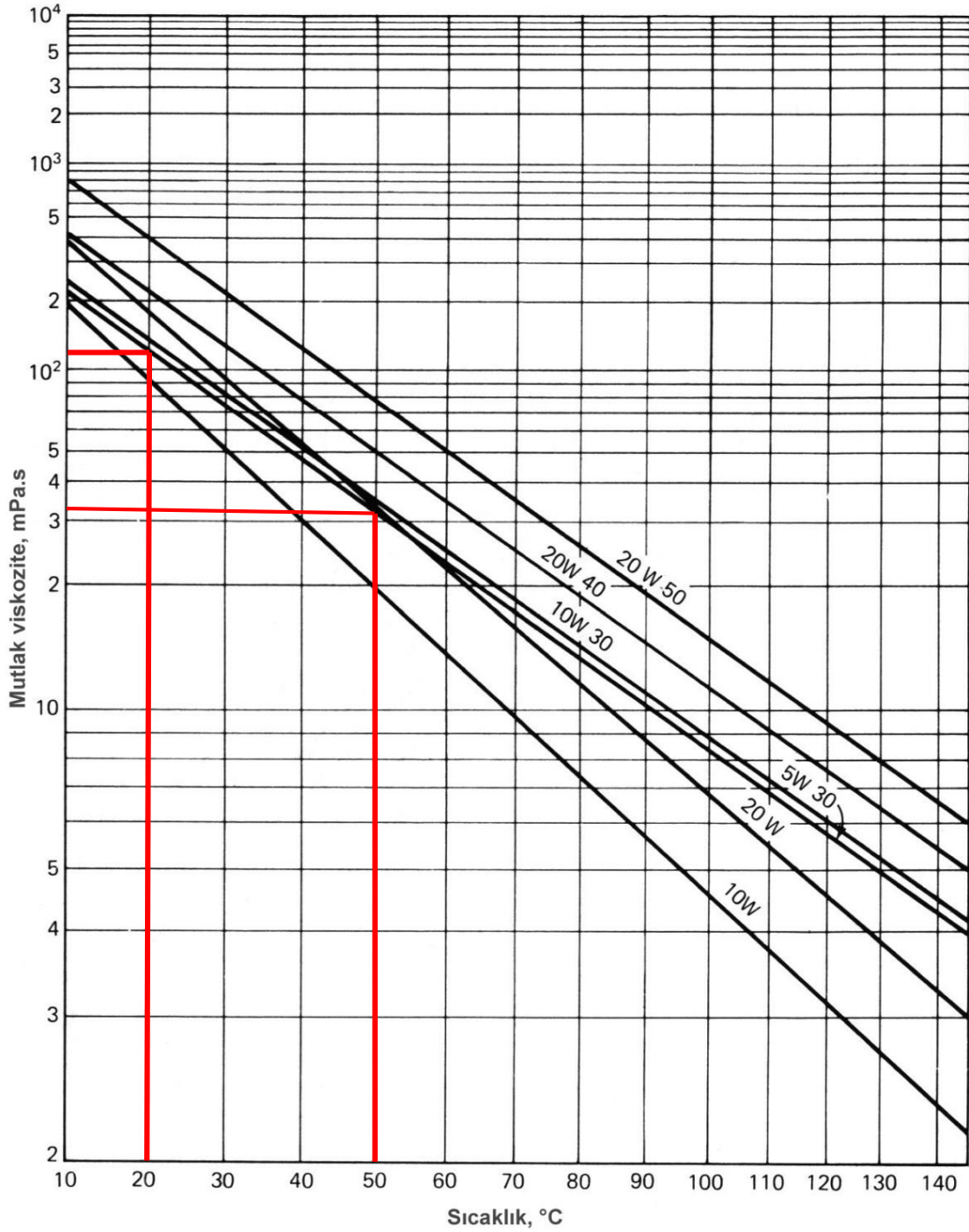
4.4. Yağlayıcılar

Deneylerde kullanılan yağlayıcılar bor yağı, sentetik yağ ve bitkisel yağ olarak belirlenmiştir. Sentetik yağ olarak Castrol marka 5w30 ve bitkisel yağ olarak Generex Se-Lf/14 kullanılmıştır. Kullanılan yağlar Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bor yağ solüsyon oluşturulmadan baz formunda kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Yağlayıcılar

Castrol marka sentetik yağ, otomotivde yaygın olarak kullanılmaktadır. Generex Self/14 marka bitkisel yağ çevreye zararsız ve korozyona karşı dirençli özelliği ile bilinmektedir. Çalışmada kullanılan yağlar, endüstride kullanım alanı ve erişim kolaylığı sebebiyle tercih edilmiştir. Kullanılan yağlayıcıların dinamik viskozite değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ayrıca sentetik yağın 50 °C' deki dinamik viskozite değeri Şekil 4.9'dan 33 mPa.s olarak okunmuştur.



Şekil 4.9. Sentetik yağ viskozite değerleri

Çizelge 4.1. Yağlayıcıların dinamik viskozite değerleri

Yağlayıcı	Yoğunluk, ρ , (gr/ml)	Dinamik Viskozite (mPa.s) – Oda sıcaklığında	Dinamik Viskozite (mPa.s) – 50 °C
Bor Yağı	0,995	136	-
Sentetik Yağ	0,851	121	33
Bitkisel Yağ	0,999	125	-

4.5. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneylerde, endüstride MS58 adıyla bilinen CuZn40Pb2 pirinç malzeme kullanılmıştır. Bakır malzemeye farklı oranlarda çinko eklenerek meydana gelen alaşımlara pirinç adı verilmektedir. Pirinç malzemeler mukavemet, süneklik, işlenebilirlik, aşınma dayanımı, iletkenlik, korozyon direnci ve maliyet özelliklerinin iyi olması sebebiyle yaygın şekilde kullanılmaktadır. Alaşımdaki çinko oranı pirinçlerin, içyapı ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Pirincin mekanik özelliklerini artırmak için bakır ve çinko elementleri haricinde diğer alaşım elementlerine sahip pirinçler de vardır. Bu elementler nikel, mangan, demir, kalay, alüminyum, silisyum gibi elementlerdir. Alaşımlara ilave edilen elementlerin miktarı % 5'ten azdır. Deneylerde kullanılan pirinç malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. CuZn40Pb2 Malzeme Bileşimi

CuZn40Pb2	Cu	Zn	Pb	Al	Fe	Ni	Sn	Diğer %
% ağırlık	56	40	2	0,05	0,4	0,3	0,3	0,95

Aşındırıcı mil ile numune arasındaki boşluk için, deney düzeneğine uygun hareketli geçme toleransı olan F7-h7 kullanılmıştır. Mil ve numune ölçülerinin toleransları EK 1'de verilen geçme tolerans tablosuna göre belirlenmiştir. Aşındırıcı milin çapı Ø40 0/-0,025 gelmektedir. EK 1'de verilen geçme tolerans tablosuna göre numune delik ölçüsü Ø40 +0,02/+0,04 olarak belirlenmiştir. Numunelerin dış çap ölçüsü ise deney düzeneğine uygun olacak şekilde Ø50 olarak belirlenmiştir. Numuneler EK 2'de verilen teknik resme göre imal edilmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. CuZn40Pb2 Numune

İmalat sırasında takım izleri veya titreşim nedeniyle yüzey üzerinde dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu dalgalanmalar ne kadar büyükse yüzey o kadar pürüzlüdür. Yüzey pürüzlülüğünün fazla olması sürtünme ve aşınmayı artırır dolayısıyla ürün performansını düşürmektedir. Yüzey kalitesi kötü olan yatak malzemelerinde sürtünme fazla olduğundan dolayı yatak sarma diye tabir edilen kaynama olayı görülmektedir. Çalışmada yapılan deneylerin sağlıklı olabilmesi için talaşlı imalattan sonra yüzey kalitelerini artırıcı yüzey parlatma diğer adıyla mikroler operasyonu yapılmıştır. 3 farklı ölçüm sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Numune Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort.
Ort. Ra (µm)	0,3	0,3	0,25	0,3	0,2	0,5	0,2	0,3	0,5	0,31

Belirlenen ölçülerin yağ filmi oluşumu için uygunluğu Sommerfeld bağıntısına göre aşağıda verilen hesaplamalar ile kontrol edilmiştir. Hesaplamalarda sentetik yağın kullanıldığı maksimum yük ve ulaşılan maksimum sıcaklığa ulaşılan 1500 dev/dk koşulları dikkate alınarak, yağ filmi oluşumu hesaplamaları yapılmıştır.

4.5.1. Hesaplamalar

Numunenin ortasında bulunan yağ kanalı nedeniyle iki farklı yataklama yapılacağı düşünülmüş yatak genişliği 21 mm ve etki eden toplam basıncın yarısı dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

B=21 mm yatak genişliği ve D=40 mm mil-delik çapı için B/D=0,52 olarak hesaplanmıştır.

Boyutsuz yatak boşluğu (ortalama yatak boşluğuna göre);

$$\Psi = \frac{\Delta d}{d} = \frac{(70 + 20)/2}{40000} = 0,001125$$

Boyutsuz yatak boşluğu Ψ değeri yüksek devir için büyük boşluk, yüksek yüzey basıncı için küçük boşluk kuralı ile 0,001-0,0025 aralığında olmalıdır. (Babalık F.C., Çavdar K., 2021)

Yağ viskozitesi μ :0,035 Pa.s

Yataktaki ortalama yüzey basıncı;

$$P = \frac{F}{B * D} = \frac{145}{0,021 * 0,04} = 172619 \frac{N}{m^2}$$

$$P = \frac{172619}{2} = 86309 \frac{N}{m^2}$$

Açısal hız;

$$w = \frac{2 * \pi * n}{60}$$

$$= \frac{2 * \pi * 1500}{60} = 157,07 \frac{rad}{sn}$$

Sommerfeld Sayısı;

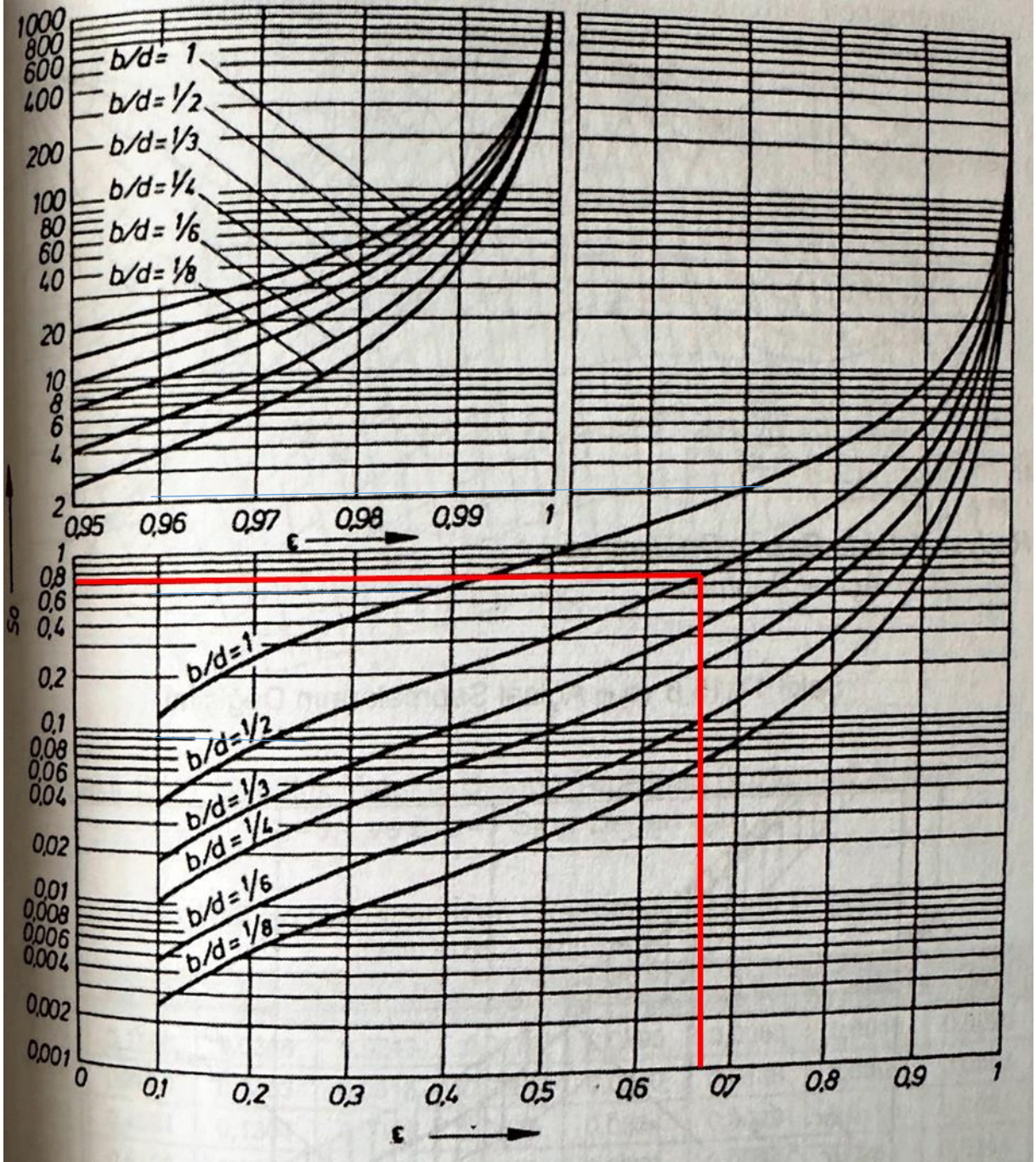
$$So = \frac{P * \Psi^2}{\mu * w} = \frac{86309 * 0,001125^2}{0,033 * 157,07} = 0,021$$

$So \leq 1$ olması yatak karakteristiğinin yüksek hızlı, hafif zorlanan, hafif yüklü yatak olduğunu göstermektedir.

So ve B/D = 0,52 değerleri için izafi eksantriklik değeri Şekil 4.11' den enterpolasyon ile $\varepsilon=0,052$ olarak okunur.

Yatak boşluğu;

$$S = \Psi * D = 0,001125 * 40000 = 45 \mu m$$



Şekil 4.11. İzafi eksantriklik – Sommerfeld grafiği (Babalık F.C., Çavdar K., 2021)

Minimum yağ filmi kalınlığı;

$$h_{0min} = 0,5 * S * (1 - \epsilon)$$

$$= 0,5 * 45 * (1 - 0,052) = 21,3 \mu m$$

Sıvı sürtünmeye geçiş için yüzey pürüzlülük değerlerinin aşılması gerekir.

$$h_0 = 1,2 * 4 * (R_{a-mil} + R_{a-yat})$$

$$= 1,2 * 4 * (1 + 0,5) = 7,2 \mu m$$

$S = 45 \mu\text{m}$ ve $h_0 = 7,2 \mu\text{m}$ değerleri için izafi geçiş eksantrikliği;

$$h_{0min} = 0,5 * S * (1 - \varepsilon_\varepsilon)$$

$$7,2 = 0,5 * 45 * (1 - \varepsilon_\varepsilon) \quad \varepsilon_\varepsilon = 0,68$$

$B/D = 0,52 \longrightarrow \varepsilon_\varepsilon = 0,68$ değerleri için geçiş Sommerfeld sayısı

Şekil 4.11'den $So_\varepsilon = 0,8$ olarak okunur;

Geçiş devir sayısı;

$$N_\varepsilon = \frac{p * \Psi^2}{\mu * 2 * \pi * So_\varepsilon}$$

$$= \frac{86309 * 0,001125^2}{0,035 * 2 * \pi * 0,8} = 0,62 \frac{dev}{sn} = 37,2 \text{ dev/dak}$$

Yapılan kabul ve hesapların doğruluğunu kontrol etmek için N_ε olarak elde ettiğimiz sayının, başlangıçta verilen n devir sayısının $1/3$ 'ünden küçük olması gerekmektedir.

$$n = 1500 \text{ dev/dk} \longrightarrow 1500/3=500$$

$$N_\varepsilon \leq \frac{n}{3}$$

$$37,2 \leq 500$$

Sıcaklık değişim hesapları;

Sürtünme katsayısı (μ) 0,045 olarak kabul edildi. (Workel ve diğ., 2003)

Çevresel hız;

$$v = r * \omega$$

$$= 0,02 * 157$$

$$= 3,14 \text{ m/s}$$

Sürtünme ile ısıya dönüşen güç;

F: Yatağa gelen yük (N)

v: Yatağın çevresel hızı (m/s)

μ : Sürtünme katsayısı

P_1 : Dışarıya verilen güç

α : Isı geçiş katsayısı

A: Yatağın dış alanı ($A=20*B*D$) (m^2)

t_y : Yatak sıcaklığı

t_0 : Ortam sıcaklığı

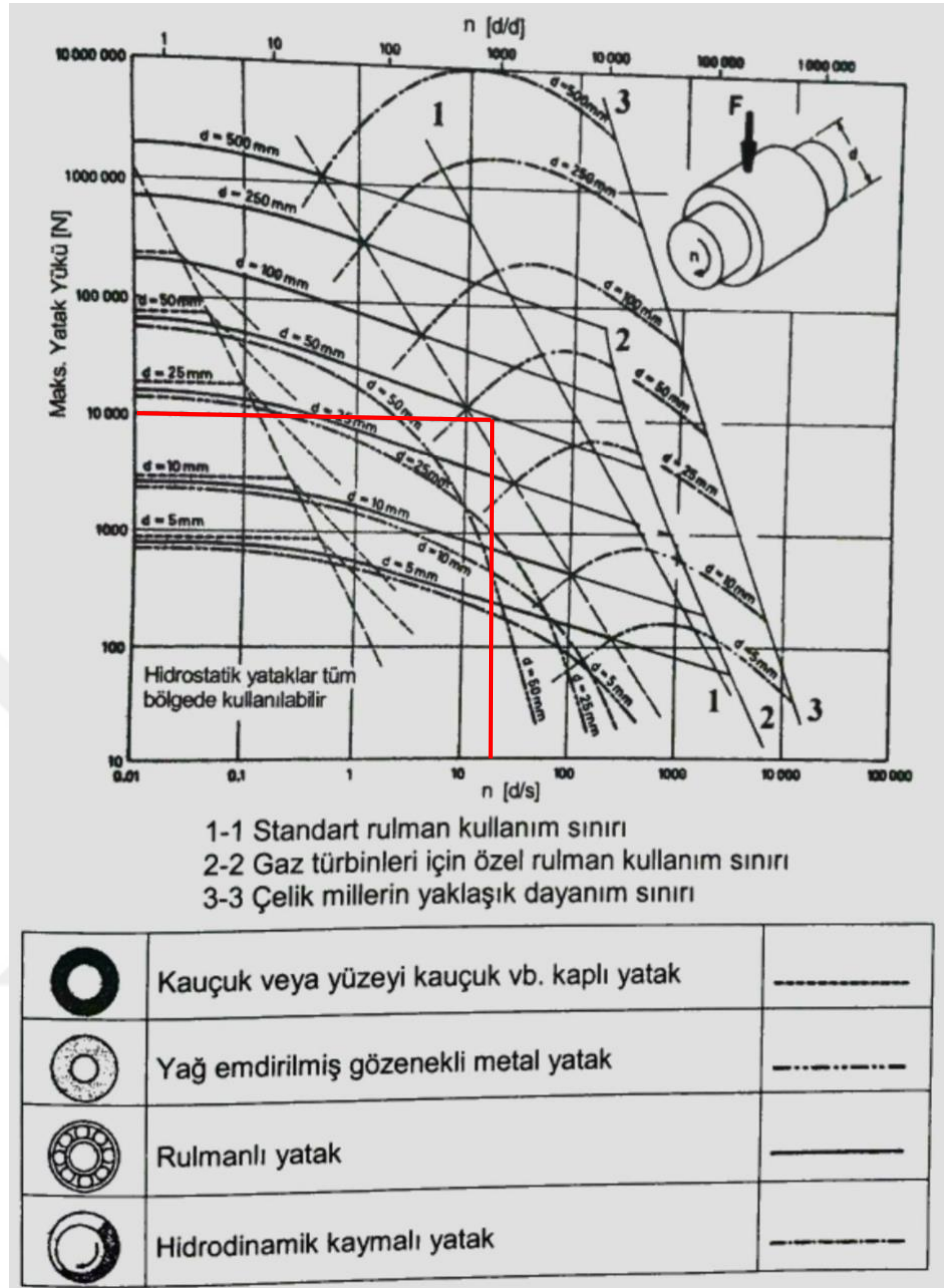
$$\begin{aligned} P_s &= F * \mu * v \\ &= 72,5 * 0,045 * 3,14 \\ &= 10,2 \text{ W} \end{aligned}$$

Oluşacak yatak sıcaklığı;

$$\begin{aligned} P_1 &= \alpha * A * (t_y - t_0) \\ 10,2 &= 20 * 0,016 * (t_y - 25) \\ t_y &= 57,37 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Deneyisel çalışmada sentetik yağ – yüksek güç koşullarında $51,18 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık değeri ölçülmüştür. Hesaplanan sıcaklık değeri deney sonuç ile karşılaştırıldığında sonuçların %10 hata ile yakınsadığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kabul ve hesapların doğruluğu teyit edilmiş, geometrik parametrelerin yağlama filmi oluşumu için yeterli olduğu belirlenmiştir.

Literatürde yk ve hız koşullarına göre yatak tavsiyesi amacıyla oluşturulan grafik şekil 4.12’de verilmiştir. Tez alışması kapsamında deney numunesinin belirlenen boyut ve hızlara göre şekil 4.12’deki grafik dikkate alındığında, yatağın ~10000 N’luk maksimum yüke maruz kalabileceği, bu değerin altında yükleme olduğu müddetçe yataklamanın sağlanacağı görülmektedir. Deneylerde dikkate alınan yük değeri maksimum 145 N olduğu için yataklamanın sıvı bölgede gerçekleşeceği belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Yük ve hız bağı olarak radyal yatak seçim önerileri (Koç, 2004)

4.6. Deney tasarımı ve Uygulama

Çalışma kapsamında tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Bu kapsamda deney parametreleri 3 farklı güç seviyesi (düşük: 95 N-500 dev/dk, orta: 120 N-1000 dev/dk ve yüksek: 145 N-1500 dev/dk) ve 3 farklı yağlayıcı (bitkisel yağ, bor yağı, sentetik yağ) olarak belirlenmiş ve 9 deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılacak yağlar bor yağı, bitkisel yağ ve sentetik yağ olarak belirlenmiştir (Şekil 4.8). Deney giriş parametreleri ve deney tasarımı Çizelge 4.4. ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Yük ve hız parametreleri literatüre göre ve çalışma şartlarındaki kısıtlar dikkate alınarak belirlenmiştir (Ünlü, 2005). Çalışma kapsamında yüzey

pürüzlülüğü ve sıcaklık olarak 2 farklı çıkış parametresi incelenmiştir. Yapılan deneylerde giriş parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkilerinin sayısal olarak incelenebilmesi ve giriş parametrelerinin etki oranlarının belirlenebilmesi için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Deney sonuçlarının anlamlı olduğunu göstermek için ise regresyon analizi yapılmıştır. Burada R-Sq (adj) değeri dikkate alınmıştır. R-Sq (adj) değerinin %70 ve üzeri olması başarı ve anlamlılık için literatürde kabul görmektedir. (Ersöz F., Ersöz T., 2017) Analizler için Minitab programı kullanılmıştır. Giriş parametrelerinin çıkış parametreleri üzerindeki tekil etkileri varyans analizine bağlı olarak elde edilen faktör analiz grafikleri ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Giriş parametreleri

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Yağlayıcı	Bor Yağı	Sentetik Yağ	Bitkisel Yağ
Güç seviyesi	Düşük (95 N-500 dev/dk)	Orta (120 N-1000 dev/dk)	Yüksek (145 N-1500 dev/dk)

Çizelge 4.5. Tam faktöriyel deney tasarımı

Deney No	Yağlayıcı	Güç Seviyesi
1	Bor Yağı	Düşük (95 N-500 dev/dk)
2	Bor Yağı	Orta (120 N-1000 dev/dk)
3	Bor Yağı	Yüksek (145 N-1500 dev/dk)
4	Sentetik Yağ	Düşük (95 N-500 dev/dk)
5	Sentetik Yağ	Orta (120 N-1000 dev/dk)
6	Sentetik Yağ	Yüksek (145 N-1500 dev/dk)
7	Bitkisel Yağ	Düşük (95 N-500 dev/dk)
8	Bitkisel Yağ	Orta (120 N-1000 dev/dk)
9	Bitkisel Yağ	Yüksek (145 N-1500 dev/dk)

Deneye başlamadan önce sıcaklık değişimini görebilmek için yatağın üst kısmında bulunan yuvaya K tipi termokupl yerleştirilmiş ve bilgisayar bağlantısı yapılarak anlık sıcaklık değişim grafiği oluşturulmaya başlanmıştır. Deney sisteminin görüntüsü Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Deney sistemi

Sistem çalıştırıldıktan sonra belirlenen devirler dijital takometre kullanılarak ayarlanmıştır. Deney süresince sistem sürekli kontrol edilmiştir. Sistemin yağsız kalmaması için yağ haznesi devamlı olarak beslenmiş ve sistemin çalışma esnasındaki görüntüsü Şekil 4.14’te verildiği gibi gözlenmiştir.



Şekil 4.14. Sistemin çalışma görüntüsü

Numunelerin tribolojik performanslarının ölçümünde istatistiksel analizin yanında malzeme yüzeylerinde oluşan fiziksel değişikliklerin incelenerek değerlendirilmesi tribolojik performans açısından önemlidir. Aşınan numunelerin 3d topografya görüntüleri Şekil 4.15’te verilen cihaz ile ölçülmüştür. Aşınan yüzeylerden alınan SEM görüntüleri Selçuk Üniversitesi İltek Laboratuvarında elde edilmiştir. SEM görüntülemeye 500 ve 2000 büyütme değerlerinde görüntü alınmıştır.

Profil3D optik profilometre, yüzey profillerini ve pürüzlülüğü ölçmek için beyaz ışık interferometrisi (WLI) kullanmaktadır. Beyaz ışık interferometrisi, yüzey profillerini ve pürüzlülüğü 0,05 μm 'ye kadar ölçmektedir. Profil3D ile yüksek eğimli yan duvarları ve kaba yüzeyleri temas etmeden, hassas bir şekilde görüntülenebilmektedir.



Şekil 4.15. 3d topografya cihazı

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Deneysel Sonuçların İstatiksel ve Görsel Analizi

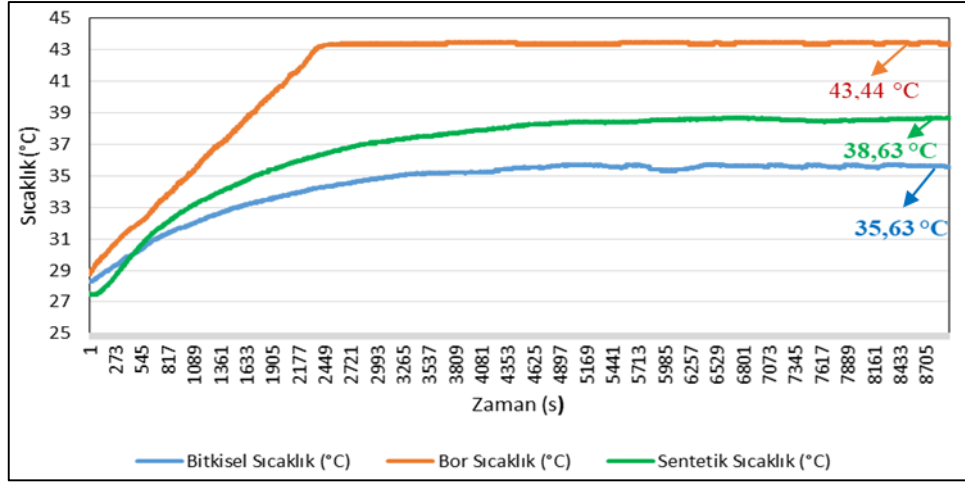
Deneysel sonuçların incelenmesi için aşınmanın oluşumu Şekil 5.1’de verilen akış diyagramı ile gösterilmiştir. Birbiri ile temas halinde çalışan yüzeyler sürtünme enerjisine sahip olmaktadır. Sürtünme enerjisi de ısı ve plastik deformasyona sebep olmaktadır. Isı; plastik deformasyon, sıcaklık artışı ve yüzey bozulmaları olarak karşımıza çıkmaktadır.



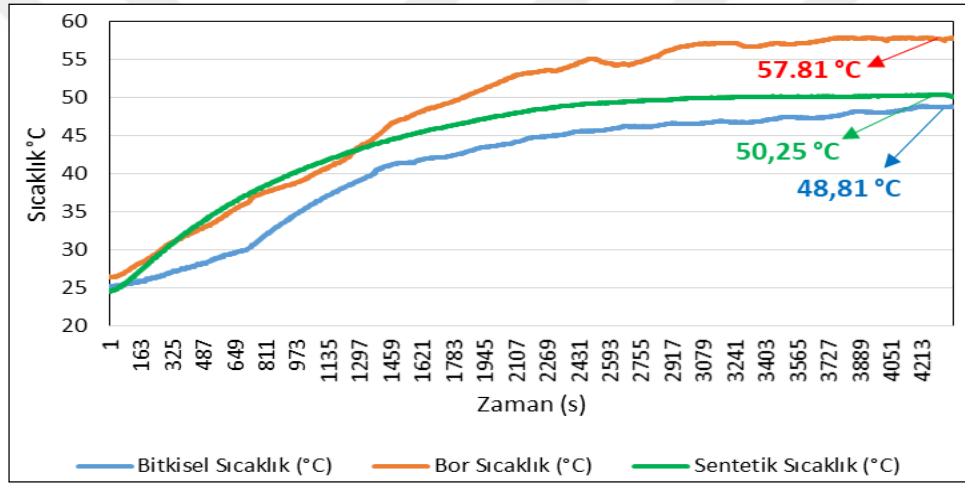
Şekil 5.1. Aşınma diyagramı

Aşınma yüzeylerinde yağlayıcı kullanımı, yüzeylerde oluşan ısıнын bir bölümünün yağlayıcıya aktarımını sağlayarak yüzey sıcaklığının azalmasını ve yağlayıcı sıcaklığının artması sonucunu doğurur. Bununla birlikte yağlayıcılar sıkıştırılamaması özelliği sayesinde yüzeyde oluşan basıncın belli bir oranını absorbe ederek aşınma direncini artırıcı bir etki oluşturur. Aşınma yüzeyleri ve yağlayıcı etkileşimini incelemek için yağlayıcı sıcaklık değişimi ve fonksiyonel yüzeylerin morfolojisinin analiz edilmesi önemlidir.

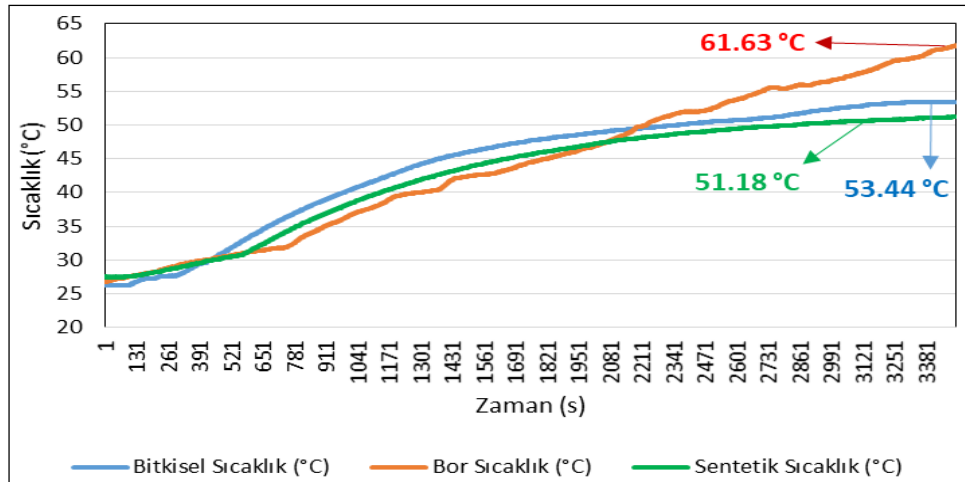
Öncelikli olarak aşınma yüzeylerinde oluşan sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Bunun için her bir numune 10 km boyunca çalışmaya maruz bırakılmış ve anlık sıcaklık ölçümleri yapılarak sıcaklık değişim grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı ortam şartlarındaki sıcaklık değişimleri Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.2. Düşük güç (95 N ve 500 dev/dk) deney koşullarında sıcaklık değişim grafiği



Şekil 5.3. Orta güç (120 N ve 1000 dev/dk) deney koşullarında sıcaklık değişim grafiği



Şekil 5.4. Yüksek güç (145 N ve 1500 dev/dk) deney koşullarında sıcaklık değişim grafiği

Farklı güç ve yağlayıcı parametrelerine göre tam faktöriyel olarak tasarlanan deneylerdeki sıcaklık değişimleri ve yüzey pürüzlülük değerinin sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney giriş ve çıkış parametreleri

Giriş Parametreleri		Çıkış Parametreleri	
Yağlayıcı	Güç Seviyesi	Sıcaklık Farkı (°C)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
Bor Yağı	Düşük (95 N-500 dev/dk)	16,75	2,34
Bor Yağı	Orta (120 N-1000 dev/dk)	31,38	2,65
Bor Yağı	Yüksek (145 N-1500 dev/dk)	35	2,84
Sentetik Yağ	Düşük (95 N-500 dev/dk)	11,13	1,95
Sentetik Yağ	Orta (120 N-1000 dev/dk)	25,75	2,5
Sentetik Yağ	Yüksek (145 N-1500 dev/dk)	23,63	2,63
Bitkisel Yağ	Düşük (95 N-500 dev/dk)	7,38	2,33
Bitkisel Yağ	Orta (120 N-1000 dev/dk)	23,69	2,55
Bitkisel Yağ	Yüksek (145 N-1500 dev/dk)	27,19	2,75

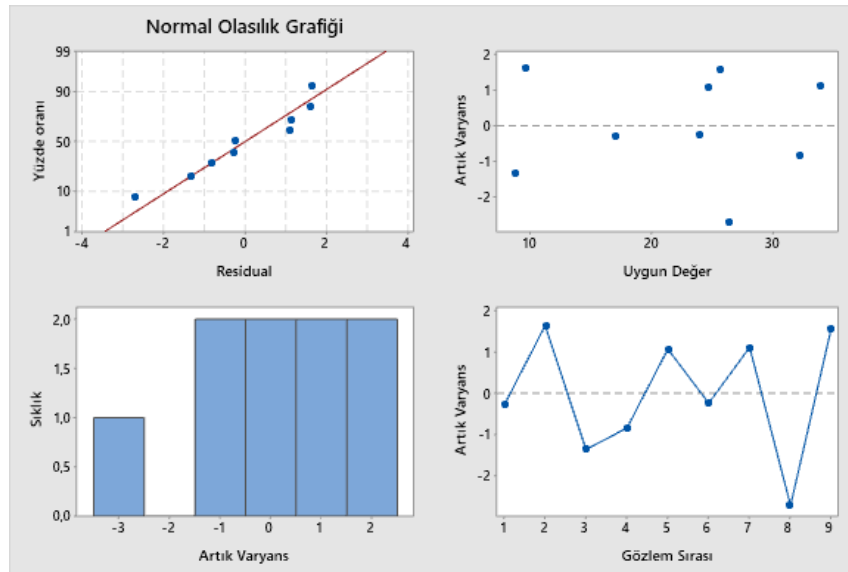
5.1.1. Sıcaklık değişimi analizi

Çalışmada sıcaklık değişim sonuçlarının anlamlılığını ve parametrelerin etki oranlarını gösteren ANOVA test sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre güç seviyesi sıcaklık değişimi üzerinde %78,25 oranıyla en fazla etkiye sahiptir. Yağlayıcı çeşidi ise sıcaklık değişiminde %19,07 değerinde bir etkiye sahiptir. Deney tasarımına dâhil edilemeyen diğer etmenler ise %2,67 hata oranı ile belirtilmiştir. P değerleri incelendiğinde yük ve hız parametreleri için $p=0,001 < 0,05$, yağlayıcı için $p=0,015 < 0,05$ olduğu görülmüştür. P değerlerinin 0,05 değerinden küçük olması deney parametrelerinin sıcaklık değişimi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucunu vermektedir.

Çizelge 5.2. Sıcaklık değişimi için ANOVA Tablosu

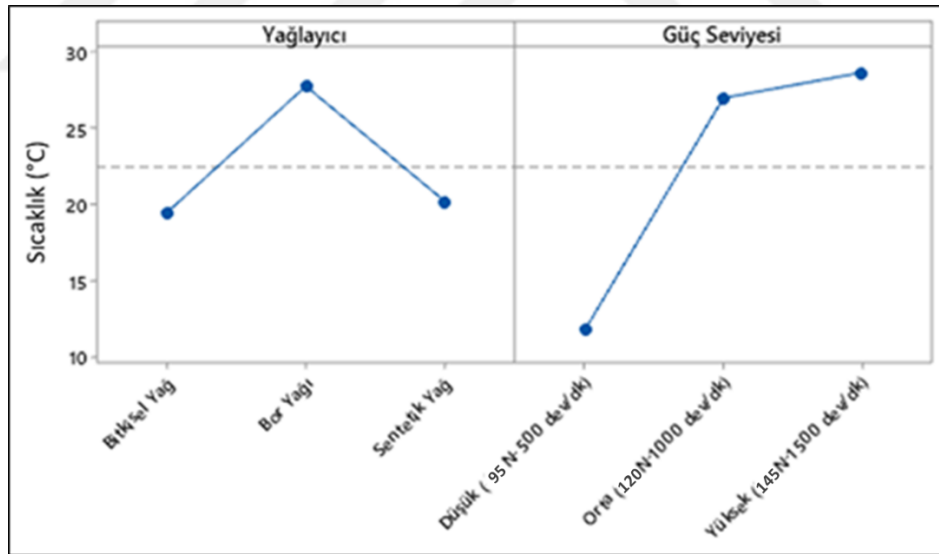
	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı, (SS)	Kareler ortalaması, (MS)	F Oranı	P	Etki oranı (%)
Güç Seviyesi	2	517,45	258,724	58,52	0,001	78,25
Yağlayıcı	2	126,14	63,069	14,27	0,015	19,07
Hata	4	17,68	4,421			2,67
Toplam	8	661,27				100
Anlamlılık	R-sq = % 97,33			R-sq (adj)= % 94,65		

Yapılan deneylerde giriş parametrelerinin anlamlılığı için R-sq (adj) değeri analiz edilmiş ve % 94,65 değerine ulaşılmıştır. R-sq değerinin %70'ten büyük olması giriş parametrelerinin sıcaklık değişimini açıklama kabiliyetinin iyi olduğunu göstermektedir. (Ersöz F., Ersöz T., 2017) Bunun yanında güvenilirliğin artırılması için Şekil 5.5'te verilen normal dağılım grafikleri elde edilmiştir. Normal olasılık grafiğinde verilerin doğru etrafında toplandığı görülmektedir. %94,65 oranındaki R-Sq (adj) değerine göre histogram grafiğinin normal dağılım eğrisi şeklinde olması gerekmektedir. Fakat verilerin az sayıda olmasından dolayı yakın bir grafik elde edilmiştir. Daha fazla veri ile istenilen normal dağılım grafiği oluşturulacağı söylenebilir. Artık değer grafiğindeki saçılma bakıldığında R-Sq(adj) değeriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.5. Sıcaklık değişimi için normal dağılım grafikleri

Çalışmadaki parametrelerin kıyaslanması ve en uygun şartların belirlenmesi için Şekil 5.6'da verilen faktör analiz grafiği dikkate alınmıştır. Bu grafiğe göre minimum sıcaklık değerleri düşük güç şartları (95 N yük ve 500 dev/dk) ve bitkisel yağ ile sağlanmaktadır. Maksimum sıcaklık değerleri ise yüksek güç şartları (145 N yük ve 1500 dev/dk) ve bor yağı ortamında oluşmuştur. Yağlayıcıların performans sıralaması bitkisel yağ, sentetik yağ ve bor yağı şeklinde olmuştur. Şekil 5.6'ya göre bitkisel ve sentetik yağ yakın performans göstermiş, bor yağına kıyasla sıcaklığı azaltma açısından yüksek performans oluşturmuşlardır. Bu durum bitkisel ve sentetik yağın düşük viskozite değerleri ile açıklanabilir. Viskoziteleri bor yağına kıyasla düşük olduğu için, yataklama bölgesinde mil ve yatağa ait pürüzlülük bölgelerine yüksek performansta nüfuz edebilmişler ve sürtünmeyi minimize etmişlerdir. Ayrıca çalışma süresince de nüfuziyet kabiliyetlerini koruyarak yağlamanın devamlılığını sağlamışlardır. Bor yağı ise bütün güç koşullarında, geçen süreye bağlı olarak artan sıcaklıkta ısı iletim performansını kaybetmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak, ısı artışı ile bor yağındaki minerallerin aşınma ortamı elementleri ile etkileşime geçerek kimyasal yapılarının bozulduğu iddia edilebilir.



Şekil 5.6. Sıcaklık değerlerinin giriş parametrelerine göre değişimi

5.1.2. Yüzey pürüzlülüğü analizi

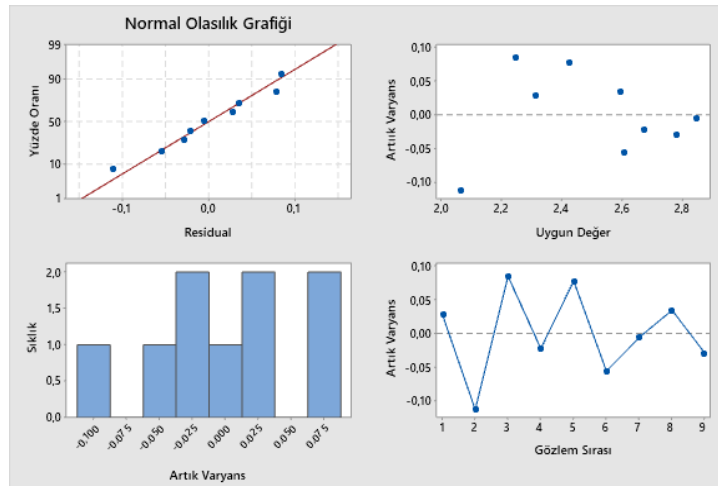
Deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü için yapılan ANOVA testlerinden elde edilen veriler Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre güç parametresi % 76,98 oranıyla yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkiye sahiptir. Bunun yanında yağlayıcı çeşidi yüzey

pürüzlülüğü üzerinde % 17,43 oranında etkiye sahiptir. Diğer etmenlerden kaynaklı hata oranı %5,57 ile belirtilmiştir. R-sq (adj) değerine bakıldığında %88,84 değeri görülmüştür. Bu değer %70'ten büyük olması giriş parametrelerini yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı kılmaktadır.(Ersöz F., Ersöz T., 2017) P değerlerine bakıldığında güç parametresi için $p = 0,005 < 0,05$, yağlayıcı için $p = 0,059 < 0,05$ sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.3. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA Tablosu

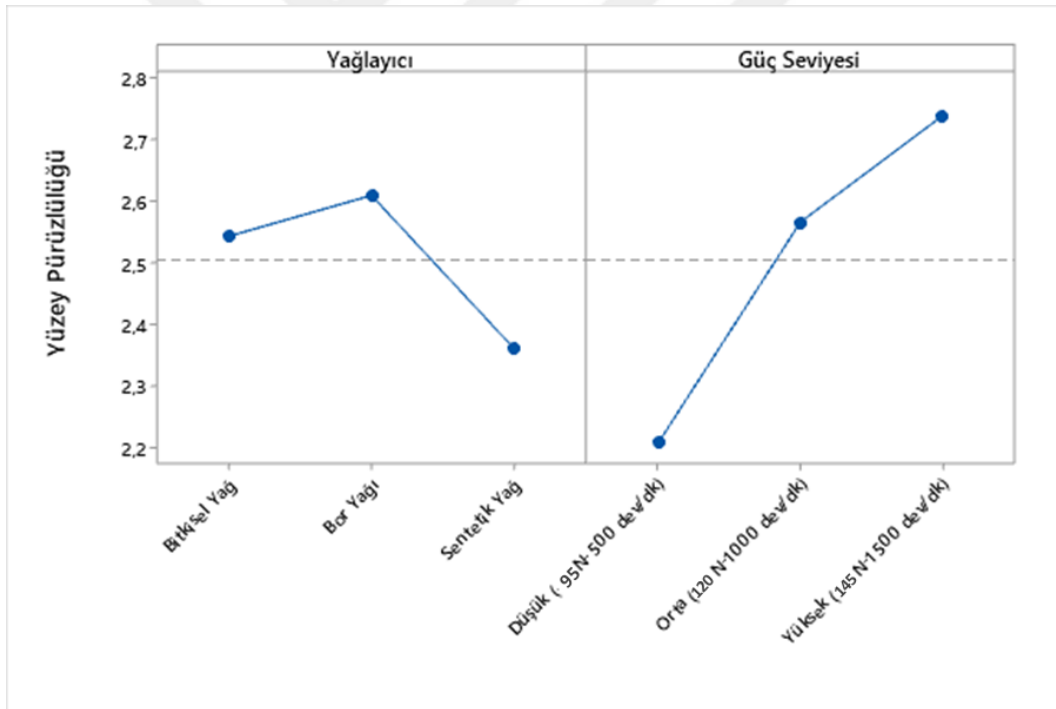
	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı, (SS)	Kareler ortalaması, (MS)	F Oranı	P	Etki oranı (%)
Güç Seviyesi	2	0,44409	0,222044	27,60	0,005	76,98
Yağlayıcı	2	0,10056	0,050278	6,25	0,0059	17,43
Hata	4	0,03218	0,008044			5,57
Toplam	8	0,57682				100
Anlamlılık	<i>R-sq = % 94,42</i>			<i>R-sq (adj)= % 88,84</i>		

Şekil 5.7’de verilen grafikte histogram grafiği normal dağılım eğrisine tam olarak uymazken, normal olasılık grafiğinde verilerin doğru üzerinde toplandığı görülmüştür. Bu yüzden daha fazla veri elde edildiği takdirde histogram grafiğinin normal dağılım grafiğine uygun şekilde elde edilebileceği söylenebilir.



Şekil 5.7. Yüzey pürüzlülüğü için normal dağılım grafikleri

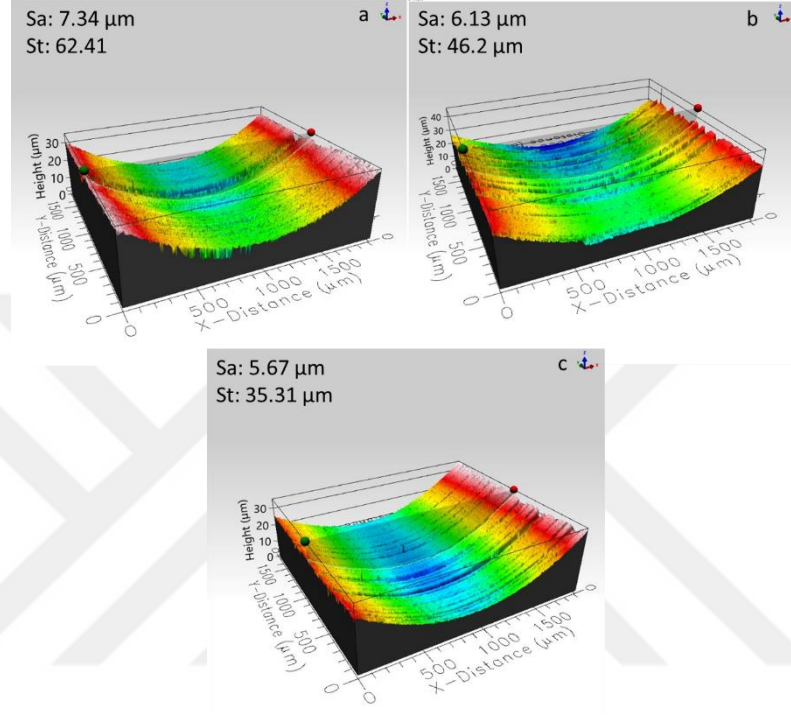
Yüzey pürüzlülük değerlerinin kıyaslanması ve en uygun şartların belirlenmesi için Şekil 5.8’de verilen faktör analiz grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre en iyi yüzey pürüzlülük değeri düşük güç şartları (95 N yük ve 500 dev/dk) ve sentetik yağ ile sağlanmaktadır. En kötü yüzey pürüzlülük değeri ise yüksek güç şartları (145 N yük ve 1500 dev/dk) ve bor yağı ortamında oluşmuştur. Yağlayıcıların performans sıralaması sentetik yağ, bitkisel yağ ve bor yağı şeklinde olmuştur. En iyi pürüzlülük değerine sentetik yağ ortamında ulaşılması sentetik yağın moleküler yapısının daha düzenli olması ile açıklanabilir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri başlangıçta 0,2 - 0,5 Ra aralığında ölçülmüştür. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülükleri 1,95 – 2,75 Ra aralığında ölçülmüştür. Bu sonuçlar literatürde belirtildiği gibi numunelerin çalışmaya başladıkları ilk anlarda aşındığını göstermektedir. (Tunay,2007) Yüzey pürüzlülük değerlerinin (Ra) 5’in üzerine çıkmaması ile deneylerin kuru sürtünme bölgesinde olmadığı açıklanabilir.



Şekil 5.8. Yüzey pürüzlülüğü için taguchi analizi

Şekil 5.9’da Ra değerine göre belirlenen en iyi, en kötü ve ortalama koşullarda oluşan yüzeylere ait üç boyutlu topografya görüntüleri verilmiştir. Sentetik yağlayıcının kullanıldığı koşullarda (Şekil 5.9c) topografyaya bağlı renk dağılımının diğer koşullara kıyasla daha düzenli olduğu, bitkisel ve bor yağı koşullarında renk karışım bölgelerinin olduğu görülmüştür. Renk dağılımının heterojenliği adhesif aşınma bölgelerinin varlığını göstermektedir. Bu bölgelerde

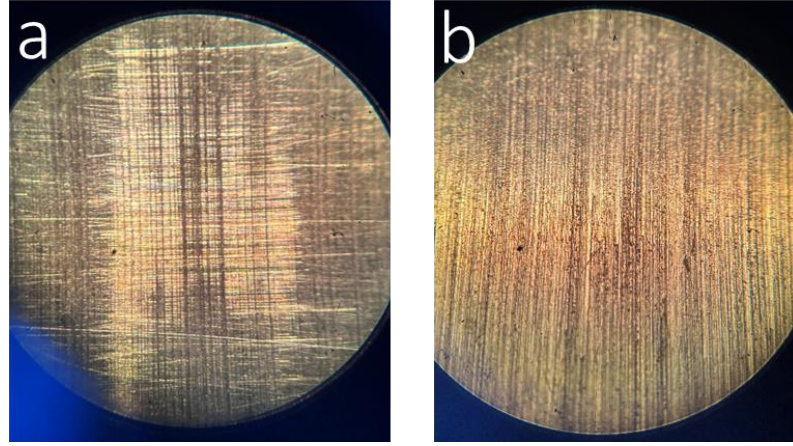
oluşan mikro kaynaklara bağlı olarak malzeme kümelenmeleri, tabakalaşmalar veya delaminasyon bölgeleri oluşmakta ve topografya görüntülerinde renk dağılımları bozulmaktadır. Ayrıca mikro kaynaklar zamanla kopmaya maruz kalarak yataklama bölgesinde üç cisimli aşınmaya da sebebiyet vermektedir.



Şekil 5.9. 3d topografya görüntüleri

a) En kötü yüzey durumu b) Orta seviyedeki yüzey durumu c) En iyi yüzey durumu

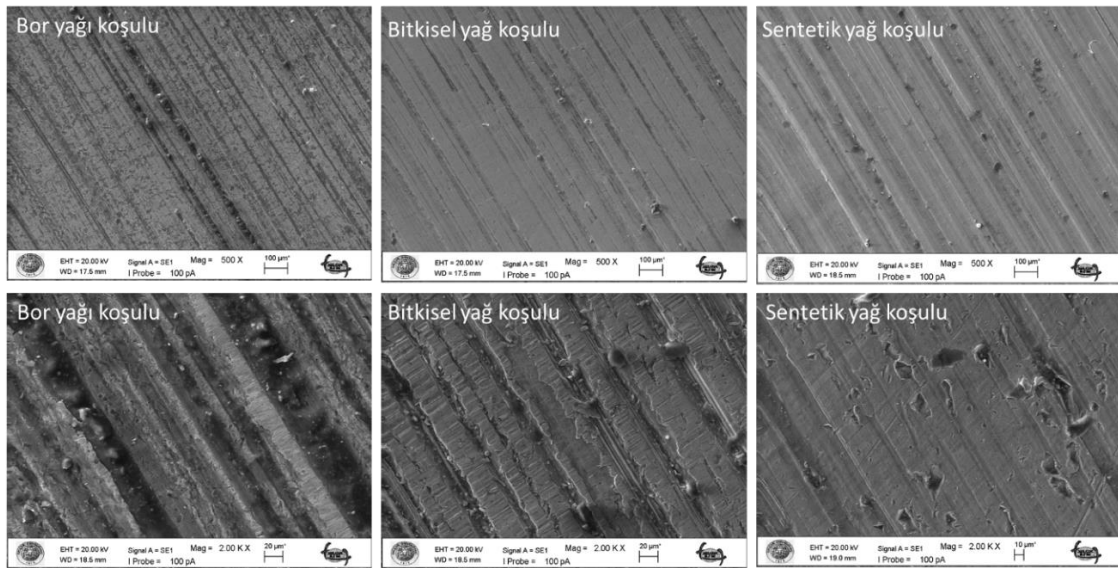
Şekil 5.10'da en yüksek yüzey pürüzlülüğü görülen yüksek güç şartlarında (145N yük ve 1500 dev/dk) bor yağı ile çalışmış ve düşük güç şartlarında (95N yük ve 500 dev/dk) sentetik yağ ile çalışmış numune yüzeylerinin görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.10 (a)'da verilen görüntünün Şekil 5.10 (b)'ye kıyasla daha fazla ve daha derin aşınma çizgileri içerdiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.10(a)'da yüzeyin farklı renk tonlarına sahip olduğu yani farklı aşınma mekanizmalarının yüzey üzerinde aktif olduğu görülmektedir. Şekil 5.10(b)'de ise sadece abrasif aşınma kaynaklı olarak tek bir renk tonunun oluştuğu söylenebilir.



Şekil 5.10.

- a) Yüksek güç (145 N – 1500 dev/dk) şartlarında bor yağı ile çalışmış numune görüntüsü
b) Düşük güç (95 N – 500 dev/dk) şartlarında sentetik yağ ile çalışmış numune görüntüsü

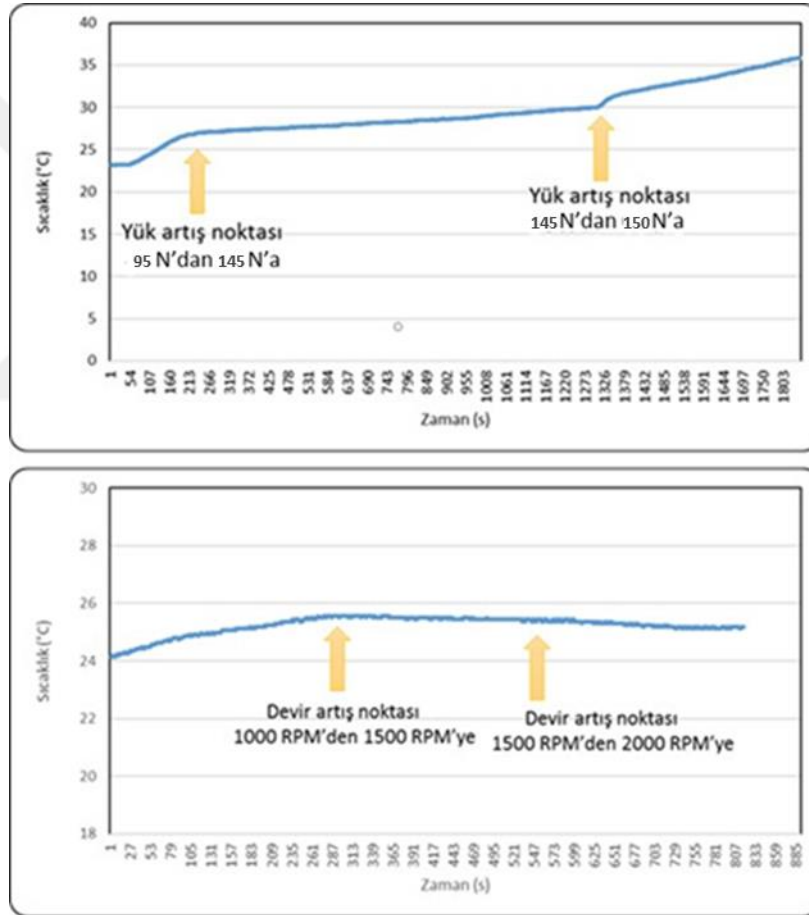
Şekil 5.11’de verilen SEM görüntülerinde sentetik yağın kullanıldığı koşullarda yüzeylerde minimum deformasyon oluşumu meydana geldiği, bor yağının kullanıldığı koşullarda ise derin ve çok sayıda aşınma çizgisinin olduğu görülmektedir. Bitkisel yağ, sentetik yağa kıyasla daha düşük, fakat bor yağına kıyasla daha yüksek tribolojik performans göstererek yüzeyi korumuştur. Sentetik yağlayıcının kullanıldığı koşullarda kararlı bir abrazif aşınma meydana gelirken, bor yağının kullanıldığı durumda kararsız bir abrazif aşınmanın olduğu görülmektedir. Bu durum yağ filmlerinin kararlılığı ile açıklanabilir. Sentetik yağ tabakası yırtılma dayanımı açısından bor yağına kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Sentetik yağ içeriğini oluşturan hidro-karbonlar, bor malzemesine kıyasla çelik yüzeyle daha az etkileşime girerek film kararlılığı sağlamıştır.



Şekil 5.11. SEM görüntüleri

5.1.3. Yük ve Devir Değişiminin Etkisinin İncelenmesi

Farklı yük ve devir değerlerinde yatak sıcaklığı değişimine ilişkin elde edilen grafikler Şekil 5.12’de verilmiştir. Bitkisel yağın kullanıldığı deneylere göre, yük değeri arttıkça yatak sıcaklığı da lineer olarak artmış, fakat hızın artışına bağlı olarak anlamlı bir değişim meydana gelmemiştir. Yük arttıkça yağ moleküllerinin taşıyacağı yük de artmış ve moleküller arası artan sürtünme katsayısına bağlı olarak yatak sıcaklığı artış göstermiştir. Hız artışında ise sıcaklık belirli bir değere kadar artmış ($\sim\%8$) sonrasında ise sabit kalmıştır. Sıcaklık artış değeri yük etkisiyle açıklanabilecek bir durumdur. Bu sebeple hıza bağlı bir değişimin oluşmadığı belirlenmiştir.



Şekil 5.12. Yük ve devir değişimine göre sıcaklık değişimi grafikleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Çalışma kapsamında CuZn40Pb2 pirinç malzemenin farklı güç seviyelerinde (95 N yük ve 500 dev/dk, 120 N yük ve 1000 dev/dk, 145 N yük ve 1500 dev/dk) ve farklı yağlayıcılar (bor yağı, bitkisel yağ ve sentetik yağ) kullanıldığında göstereceği tribolojik performansları kaymalı yatak düzeneğinde incelenmiştir. Öncelikle farklı güç ve yağlayıcı koşullarında yapılan deneyler boyunca meydana gelen sıcaklık değişim grafikleri incelenmiştir. Daha sonra her bir numunenin aşınma yüzeylerinde oluşan yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Güç ve yağlayıcı parametrelerinin sıcaklık değişimi ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına etkisi ANOVA ile incelenmiştir. Ayrıca morfolojik analiz için yüzeylerin 3d topografya görüntüleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Sıcaklık değişimleri incelendiğinde en iyi sonuçlara 1. koşul şartlarında (95 N yük ve 500 dev/dk) bitkisel yağ kullanılarak ulaşılmıştır. Sıcaklık değişimine yağlayıcı çeşidinin etki oranı %19,07 olarak belirlenmiştir. Yağlayıcıların ısı iletim performansları bitkisel yağ, sentetik yağ ve bor yağı olarak sıralanmaktadır. Buradan bitkisel yağlayıcının ısı iletim kapasitesinin diğer yağlara kıyasla en yüksek olduğu söylenebilir. Sıcaklık değişimine yükleme koşullarının etkisi %78,25 olarak belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde en iyi sonuçlara 1. koşul şartlarında (95 N yük ve 500 dev/dk) sentetik yağ ile ulaşılmıştır. Buradan sentetik yağın taşıyabildiği yükün daha fazla olduğu ve iyi bir yağ filmi oluşturarak yüzey aşınmalarını daha iyi engelleyebildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Yağlayıcıların aşınmaya karşı gösterdikleri performans sıralaması sentetik yağ, bitkisel yağ ve bor yağı şeklindedir.

Aşınma ve sıcaklık değişimine yük ve hızın etkilerinin incelenmesi için aynı tür yağlayıcı kullanılarak ilave deneyler yapılmıştır. İlk olarak devir sabit tutulmuş ve hız 3 kademe olarak artırılmıştır. Deney sonucunda hız artışının önemli bir etkisi görülmemiştir. İkinci olarak yapılan deneyde hız sabit tutulmuş ve yük 3 kademe olarak artırılmıştır. Burada her yük artışında sıcaklık önemli seviyede arttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak aşınma üzerinde hız parametresinden ziyade yük parametresinin etkili olduğu görülmüştür.

6.2 Öneriler

Bu tezden yola çıkarak katkı maddeleri eklenerek oluşturulan yağlayıcılar ile üretim yöntemi farklı olan numuneler ya da farklı tür malzemeler kullanılarak faydalı sonuçlar elde edilebilir. Kullanılan yükler artırılabilir ve yüklerin artış oranları genişletilebilir. Deneylere başlamadan önce yağ haznesi genişletilebilirse kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Adatepe, H. ve Bıyıklıoğlu A., 2009, Dinamik yüklü radyal kaymalı yataklarda yağ giriş sıcaklığının yatak performansına etkisi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(4), 1-10.
- Adatepe, H., Cengil M ve Güneş B., 2012, Statik Yük Altındaki Kaymalı Yataklarda Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1), 25-34.
- Akkurt M., 1990, *Makine Elemanları*, Cilt I, Birsen Yayınevi, 439s. İstanbul.
- Artun, Y., 2022, Kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-55.
- Babalık F.C., Çavdar K., 2021, Makine elemanlar ve konstrüksiyon örnekleri, 10, Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 407-493
- Bağcı M., 2005, CuZn10 Pirinç malzemede kayma hızının aşınmaya etkisi, *Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*, 1-110
- Baş, H., 2022, Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 877-887.
- Cürgül, İ., 2005. *Makina Elemanları Ve Çözümlü Problemleri*. Birsen Yayınevi, 450s. İstanbul.
- Davim, J.P., 2000, An experimental study of the tribological behaviour of the brass/steel pair, *Journal of materials processing technology*, 100(1-3), 273-277.
- Ersöz F., Ersöz F., 2017, *Uygulamalı İstatistiksel Yöntemler*, 1, Ankara (2017)
- Farfan-Cabrera, L.I., Erdemir, A., Cao-Romero-Gallegos, J.A., Alam, I. ve Lee, S., 2023, Electrification effects on dry and lubricated sliding wear of bearing steel interfaces, *Wear*, 516-517.
- Feyzullahoğlu, E. ve Şakiroğlu N., 2010, The wear of aluminium-based journal bearing materials under lubrication, *Materials & Design*, 31(5), 2532-2539.
- Feyzullahoğlu, E., Ertürk, A.T., ve Güven, E.A., 2013, Influence of forging and heat treatment on wear properties of Al-Si and Al-Pb bearing alloys in oil lubricated conditions, *Transactions of nonferrous metals society of china*, 23(12), 3575-3583

- Gao, F., Liu, R. ve Wu, X.J., 2011, Tribaloy alloy reinforced tin-bronze composite coating for journal bearing applications, *Thin Solid Films*, 519(15), 4809-4817.
- Gebretsadik, D.W., Hardell, J., ve Prakash B., 2015, Friction and wear characteristics of different Pb-free bearing materials in mixed and boundary lubrication regimes, *Wear*, 340-341, 63-72.
- Jia, J. H., Chen, J. M., v H., Wang, x J. B., and Zhou, H., 2004, Friction and wear Properties of bronze-graphite composite under water lubrication, *Tribology International*, 5(37) 423–429.
- Juvinall, R.C., ve Marshek, K.M., 2012, Fundamentals of Machine Component Design, 5, 546-587
- Koç E., 2004, Makine elemanları, 2, Nobel yayın evi, Adana, 2004
- Koç E., 2013, Makine elemanları, 2, Akademisyen kitap portalı 201-212
- Kopeliovich, D., 2023, https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear 10.10.2023
- Korkmaz, Ş., 2019, Nano gümüş katkılı kolloidal süspansiyonların tribolojik performanslarının araştırılması, Yüksek lisans tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-70.
- Li, H., Yin, Z. ve Wang, Y., 2020, A study on the wear behavior of tin-based journal bearing under different working conditions, *Industrial lubrication and tribology*, 72(3), 359-368.
- Rodichev, A., Novikov, A., Gorin, A. ve Tokmakova, M., 2021, Analysis of the wear resistance of a hard anti-friction coating, applied to a plain bearing, under the conditions of boundary friction, *Transportation research procedia*, 57, 573-580.
- Salman, Ö., 2011, Yağlama yağı için bitkisel yağların ve esterlerinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-269.
- Tevruz, T., 1998, Tribological behaviours of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) dry journal bearings, *Wear*, 221(1), 61-68.

- Tunay. R. F., 2007, Farklı sıcaklıkta üretilen T/M yatakların dinamik yük altında aşınmasının araştırılması ve yapay sinir ağları ile modellenmesi, Doktora tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-231.
- Ünlü, B. S., ve Atik, E., 2010, Evaluation of effect of alloy elements in copper based CuSn10 and CuZn30 bearings on tribological and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 489(1), 262–268.
- Ünlü, B.S., Köksal, S., Atik, E., Meriç, C., 2005, CuSn10 Yatak malzemesinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 41-45.
- Varol, R., 2001, Wear properties of Cu and Fe based P/M bearing materials, *J eng*, 3, 81-90
- Wang, L. Ve Sheng, X., 2020, Friction and wear performance of sliding bearing seat of reactor pressure vessel, *Wear*, 444-445.
- Yılmaz, S.S., Ünlü. B.S., ve Varol, R., 2010, Effect of boronizing and shot peening in ferrous based FeCu–Graphite powder metallurgy material on wear, microstructure and mechanical properties, *Materials & Design*, 31(9), 4469-4501.

EKLER

EK-1 Mil-delik tolerans tablosu

TOLERANS TABLOSU

BAZI (Seçilmiş) Veriler Mikron Değeri

DIŞ ÇAP TOLERANS (Şaft)

Sembol	3 den 6 doğru	6 den 10 doğru	10 den 18 doğru	18 den 30 doğru	30 den 50 doğru	50 den 80 doğru
d9	- 30 - 60	- 40 - 76	- 50 - 93	- 65 - 117	- 80 - 142	- 100 - 174
e7	- 20 - 32	- 25 - 40	- 32 - 50	- 40 - 61	- 50 - 75	- 60 - 90
e8	- 20 - 38	- 25 - 47	- 32 - 59	- 40 - 73	- 50 - 89	- 60 - 106
f7	- 10 - 22	- 13 - 28	- 16 - 34	- 20 - 41	- 25 - 50	- 30 - 60
f8	- 10 - 28	- 13 - 35	- 16 - 43	- 20 - 53	- 25 - 64	- 30 - 76
h3	0 - 1.5	0 - 2.5	0 - 3	0 - 4	0 - 4	0 - 5
h4	0 - 4	0 - 4	0 - 5	0 - 6	0 - 7	0 - 8
h5	0 - 5	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13
h6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 16	0 - 19
h7	0 - 12	0 - 15	0 - 18	0 - 21	0 - 25	0 - 30
h8	0 - 18	0 - 22	0 - 27	0 - 33	0 - 39	0 - 46
h9	0 - 30	0 - 36	0 - 43	0 - 52	0 - 62	0 - 74
h11	0 - 75	0 - 90	0 - 110	0 - 130	0 - 160	0 - 190
q5	- 4 - 9	- 5 - 11	- 6 - 14	- 7 - 16	- 9 - 21	- 10 - 23
q6	- 4 - 12	- 5 - 14	- 6 - 17	- 7 - 20	- 9 - 25	- 10 - 29
j6	+ 6 - 2	+ 7 - 7	+ 8 - 3	+ 9 - 4	+ 11 - 5	+ 12 - 7
js5	+ 2.5 + 4	+ 3 + 4.5	+ 4 + 5.5	+ 4.5 + 6.5	+ 5.5 + 8	+ 6.5 + 9.5
js6						
k6	+ 9 + 1	+ 10 + 1	+ 12 + 1	+ 15 + 2	+ 18 + 2	+ 21 + 2
m5	+ 9 + 4	+ 12 + 6	+ 15 + 7	+ 17 + 8	+ 20 + 9	+ 24 + 11
m6	+ 12 + 14	+ 15 + 6	+ 18 + 7	+ 21 + 8	+ 25 + 9	+ 30 + 11
n5	+ 13 + 8	+ 16 + 10	+ 20 + 12	+ 24 + 15	+ 28 + 17	+ 33 + 20
n6	+ 16 + 8	+ 19 + 10	+ 23 + 12	+ 28 + 15	+ 33 + 17	+ 39 + 20

(0.001mm) DIN ISO 286 BÖLÜM / II

BAZI (Seçilmiş) Veriler Mikron Değeri

İÇ ÇAP TOLERANS (Delik)

Sembol	3 den 6 doğru	6 den 10 doğru	10 den 18 doğru	18 den 30 doğru	30 den 50 doğru	50 den 80 doğru
E8	+ 28 + 14	+ 38 + 20	+ 47 + 25	+ 59 + 32	+ 73 + 40	+ 89 + 50
F7	+ 16 + 6	+ 22 + 10	+ 28 + 13	+ 34 + 16	+ 41 + 20	+ 50 + 25
G6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 14 + 5	+ 17 + 6	+ 20 + 7	+ 25 + 9
G7	+ 12 + 2	+ 16 + 4	+ 20 + 5	+ 24 + 6	+ 28 + 7	+ 34 + 9
H4	+ 3 0	+ 4 0	+ 4 0	+ 5 0	+ 6 0	+ 7 0
H5	+ 4 0	+ 5 0	+ 6 0	+ 8 0	+ 9 0	+ 11 0
H6	+ 6 0	+ 8 0	+ 9 0	+ 11 0	+ 13 0	+ 16 0
H7	+ 10 0	+ 12 0	+ 15 0	+ 18 0	+ 21 0	+ 25 0
H8	+ 14 0	+ 18 0	+ 22 0	+ 27 0	+ 33 0	+ 39 0
H9	+ 25 0	+ 30 0	+ 36 0	+ 43 0	+ 52 0	+ 62 0
H10	+ 40 0	+ 48 0	+ 58 0	+ 70 0	+ 84 0	+ 100 0
H11	+ 60 0	+ 75 0	+ 90 0	+ 106 0	+ 130 0	+ 160 0
H12	+ 100 0	+ 120 0	+ 150 0	+ 180 0	+ 210 0	+ 250 0
J6	+ 2 - 4	+ 5 - 3	+ 5 - 4	+ 6 - 5	+ 8 - 5	+ 10 - 6
JS5	+ 2 - 2	+ 2.5 - 2.5	+ 3 - 3	+ 4 - 4	+ 4.5 - 4.5	+ 5.5 - 5.5
K6	0 - 6	+ 2 - 6	+ 2 - 7	+ 2 - 9	+ 2 - 11	+ 3 - 13
K7	0 - 10	+ 3 - 9	+ 5 - 10	+ 6 - 12	+ 6 - 15	+ 7 - 18
K8	0 - 14	+ 5 - 13	+ 6 - 16	+ 8 - 19	+ 10 - 23	+ 12 - 27
M6	- 2 - 8	- 1 - 9	- 3 - 12	- 4 - 15	- 4 - 17	- 4 - 20
M7	- 2 - 62	0 - 12	0 - 15	0 - 18	0 - 21	0 - 25
N7	- 4 - 14	- 4 - 16	- 4 - 19	- 5 - 23	- 7 - 28	- 8 - 33
P7	- 6 - 16	- 8 - 20	- 9 - 24	- 11 - 29	- 14 - 35	- 17 - 42

