

## Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi

*Investigation of the effects of surface roughness on friction behavior in hydrodynamic radial plain bearings*

Hasan BAŞ<sup>\*1,a</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 21.10.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 09.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 25.06.2022

### Öz

Hidrodinamik kaymalı yataklarda, sürtünme katsayısı, yağ film kalınlığı, basınç dağılımı, yağ debisi, vb gibi parametreler yatak tasarımı ve optimum enerji verimliliği açısından oldukça önemli tasarım kriterleridir. Bu çalışmada, hidrodinamik kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, yatak malzemesi aynı olan üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yatak zarfı kullanılarak farklı yüklerde ve sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün, özellikle sınır ve karışık sürtünme bölgesinde sıvı sürtünme bölgesinden daha fazla etkin olduğu belirlenmiştir. Artan yüzey pürüzlülüğü ile birlikte yağ filmi oluşum kabiliyeti azalırken, aşınma ve yataktaki güç kaybının arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hidrodinamik yağlama, Radyal kaymalı yatak, Triboloji, Yüzey pürüzlülüğü.

### Abstract

*In hydrodynamic plain bearings, parameters such as friction coefficient, oil film thickness, pressure distribution, oil flow, etc. are very important design criteria in terms of bearing design and optimum energy efficiency. In this study, in order to investigate the effects of surface roughness on bearing performance in hydrodynamic plain bearings, experiments were carried out at different loads and temperatures using two bearing envelopes with the same bearing material and with different surface roughness. As a result of the experiments, it was determined that the surface roughness was more effective especially in the boundary and mixed friction region than in the fluid friction region. It was determined that while the oil film formation ability decreased with increasing surface roughness, wear and power loss in the bearing increased.*

**Keywords:** Hydrodynamic lubrication, Radial plain bearing, Tribology, Surface roughness.

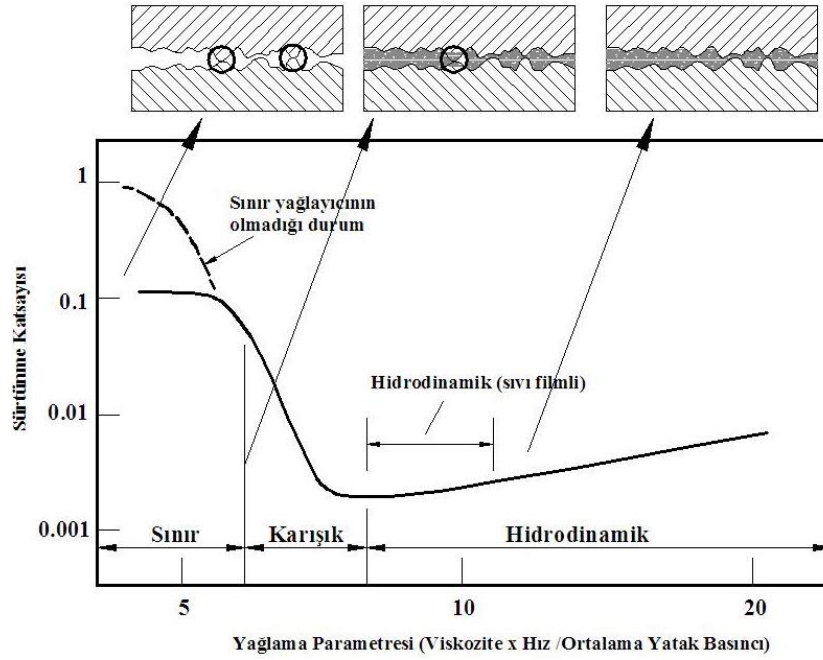
\*a Hasan BAŞ; bas@ktu.edu.tr, Tel: (0462) 377 29 43, orcid.org/0000-0002-5653-3813

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Mekanik sistemlerdeki güç kayıplarının azaltılmasında kaymalı yatakların fonksiyonu oldukça fazladır. Endüstride, özellikle enerji santrallerinde kullanılan hidrodinamik radyal kaymalı yatakların uzun ömürlü olması ve minimum güç kaybına sahip olması enerji verimliliği açısından zaruridir. Eş çalışan yüzey çiftlerinde uygun yağ kullanımı güç kaybını azaltmaktadır. Ayrıca, yüzey pürüzlüğünü minimum seviyede tutmak sürtünme kaybını azaltırken, gereğinden fazla düşürmek ise üretim maliyetini artırmaktadır. Kararlı bir kaymalı yatağın çalışma koşullarında, yüzeyler arasında yeterli yüzey pürüzlülüğü sağlandıktan sonra, çalışma süresince de yüzeyler arasındaki pürüz değerleri kararlı kalmalı yani artmamalıdır. Bu nedenle, kaymalı yataklarda, yatağı devreye alırken metal-metal teması çalışma durumu zorunlu olmaktadır. Çalışma süresince kullanılan kaymalı yatakların uzun ömürlü olabilmesinde,

sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde mümkün mertebe düşük yüzey pürüzlüğüne sahip yüzey çifti etkili olmaktadır, (Baş, 2021a). Bunun yanı sıra, sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde çalışan yatakların uzun ömürlü olabilmesinde diğer bir alternatif ise yüzey çiftlerinin tribolojik özelliklerini iyileştirmede katkılı yağların kullanılmasıdır, (Baş, 2021b; Baş, 2022; Baş & Karabacak, 2022; Baş vd., 2022). Hidrodinamik etkili kaymalı yataklarda “Stribeck Eğrisi” olarak adlandırılan (Alford, 1911; Cuvalci & Baş, 2004; Chong & De la Cruz, 2014; Chong, & Hamdan, 2019; Delprete & Razavykia, 2018; Lu, 2006; Lu vd., 2006; Mang, 2014; Mathias, 2010; Sanchez, 2011; Westerfield, 2016) ve Şekil 1’de görülen grafik yardımıyla (Salman, 2011) çalışma esnasında oluşan sürtünme katsayısı, yatakta kullanılan yağlayıcının viskozitesi, yatak tarafından taşınan dış yükün sisteme uyguladığı zorlanma ve yüzeylerin kayma hızları arasındaki izafi hız farkı anlamlı olarak görülebilmektedir. Bu da makinalarda veya sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.



**Şekil 1.** Hidrodinamik kaymalı yataklarda Stribeck diyagramı

**Figure 1.** Stribeck diagram for hydrodynamic plain bearings

Şekil 1’de görüldüğü gibi, sürtünme katsayısı düşey eksende olup, yatay eksen ise milin dönme hızı (devir sayısı) veya  $\eta n/P$  boyutsuz ifade yer almaktadır. Burada  $n$  kayma hızını,  $\eta$  yağlayıcı akışkanın dinamik viskozitesini ve  $P$  ise yatak yükünün yataktaki izdüşümü alanına yani birim yatak yüzeyine bölünmesiyle oluşan yatak basıncını temsil etmektedir.  $\eta n/P$  değerinde yer alan devir sayısı minimum bir değere düşüncüye kadar azaltıldığında, sürtünme katsayısı da

düşmekte iken, belli bir değerden sonra sürtünme katsayısı artışa geçmektedir. Sürtünme katsayısını minimum değere yaklaştıran bu devreye geçiş devir sayısı denir. Genel bir yatak için bu minimum  $\eta n/P$  değeri yaklaşık 0,001 - 0,002 aralığında olduğunda ideal hidrodinamik yağlama şartının sağlandığı ifade edilebilmektedir. Bu durum hareketli yüzeylerde metal teması başlangıcına işaret etmektedir ve sonrasında sürtünme katsayısı artmaktadır. Temasın artması ile sürtünme

katsayısındaki artış devam edeceğinden bu bölgeye karışık yağlama bölgesi denir. Bu bölge için tipik sürtünme katsayısı değerinin ise yaklaşık 0,02-0,10 arasında olabileceği değerlendirilmektedir. Akabinde yağ film çok ince olduğunda, sürtünme katsayısı metal-metal temasıyla artar ve bu artışta yağlayıcının viskozitesi ve milin dönme hızı baskın olmayıp, bu artış 0,25 gibi değere erişebilir. Bu bölge ise kaymalı yatakta sınır yağlama şartları olarak isimlendirilir. (Sanchez, 2011). Bu yağlama bölgeleri, çalışma şartlarındaki kaymalı yataklarda metal-metal temasının olup olmadığı hakkında bilgi vermesi ve yatak performans değerlendirmesinde kolaylık sağlaması açısından önemlidir.

Hidrodinamik etkili bir kaymalı yatak devreye alınırken, henüz yağ teşekkülünün oluşmadığı sınır sürtünme bölgesinden oldukça kısa sürede sıvı çalışma bölgesine geçerek bu bölgede kararlı çalışmaya devam etmek, yine yatak ömrü üzerindeki en önemli hususlardan biridir. Güç kaybını en alt seviyede muhafaza edebilmek için ise, aynı şekilde sıvı çalışma bölgesine minimum sürede geçiş sağlandıktan sonra, geçiş devir sayısı diye adlandırılan ve yağ filmi oluşumuna tekabül eden devir sayısı değerinin yaklaşık 3 katı olan devirlerde çalışmak en uygun olmakta ve optimum çalışma devri olarak kabul edilmektedir. Daha yüksek devirlerde çalışmak minimum film kalınlığı açısından fevkalâde emniyetli iken, artan hızla birlikte yatakta kullanılan yağın viskoz etkisi nedeniyle sürtünme ısısı artmakta, bu da yatakta ısı kaybı olarak ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak ısınan yağın viskozitesi azalacağından, bir önceki çalışma şartlarında muhafaza edilebilen minimum yağ film kalınlığı bu durumda azalarak, yatak ile mil arasındaki metal-metal temasına ve yatak yüzeylerine ait pürüz değerlerinin daha da yükselmesine yol açmaktadır.

Çalışma süresince kullanılan kaymalı yatakların uzun ömürlü olabilmesinde, Şekil 1'de (Salman, 2011) görülen sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde mümkün mertebe düşük yüzey pürüzlüğüne sahip yatak malzemesinin seçimi önem arz etmektedir. Adhezyon aşınmasının minimize edilmesinde beyaz maden ya da çinko-alüminyum esaslı yatak kullanımı oldukça yaygındır. Bununla birlikte, karışık sürtünme bölgesinde çalışılması sonucu yatak yüzey pürüzlülüğünün artış göstermesi minimum yağ film teşekkülünü daha da zorlaştırmaktadır. Yapılan çalışmalar pürüzlüğün azalmasıyla birlikte yataktaki yük taşıma kapasitesinin arttığını ortaya koymaktadır, (Burwell vd., 1941). Yüzey pürüzlülüğünün yatak performansına etkilerinin literatürde birçok yaklaşım modellerine ait nümerik ve analitik çalışmalar oldukça mevcut

iken (Bhaskar vd., 2013; Eric vd., 1999; Saraç, 2022; Bhuvaneshwari vd., 2014), gerçek şartlarda yüzey pürüzlülüğünün deneysel çalışmaları ise sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada özellikle sınır ve karışık sürtünme bölgesinde yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak ele alınmıştır.

Yapılan deneylerde farklı yatak ve mil yüzeyine ait pürüz profillerinin sürtünme üzerindeki etkileri farklı yük değerlerinde detaylıca incelenmiştir. Özellikle yağ filmi oluşumunun gerçekleştiği devir sayılarında yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

Yapılan çalışmada, yüzey pürüzlüğü etkisinin yatak performansı üzerinde etkilerini incelemek için üç farklı pürüzlüğe sahip üç yatak zarfı kullanılmıştır. Yatakta baz yağ olarak Shell Tellus 10 motor yağı kullanılmıştır. Yatakta oluşan sınır, karışık ve sıvı film bölgelerindeki sürtünme değerleri grafiklerle detaylı olarak verilmiştir. Film oluşumunu beslemek için 50 cm<sup>3</sup>/dk akış hızında yağın yatak ile mil arasına iletimi sağlanmıştır. Sistem üzerinde, üç yüzey arasında yağ filmi oluşumunun var olup olmadığını gösteren direnç ölçüm devresi gerçekleştirilerek, deneyler esnasında karışık sürtünme bölgesinden sıvı sürtünme bölgesine geçişin, yani metal-metal temasının olmamasını sağlayan devir sayılarının tespiti yapılmıştır. Yatakta kullanılan test yağının viskozite değerleri, viskozite-sıcaklık katalog değerlerinden alınmış olup (Türekim, 2022), Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yatakta kullanılan yağın fiziksel özellikleri

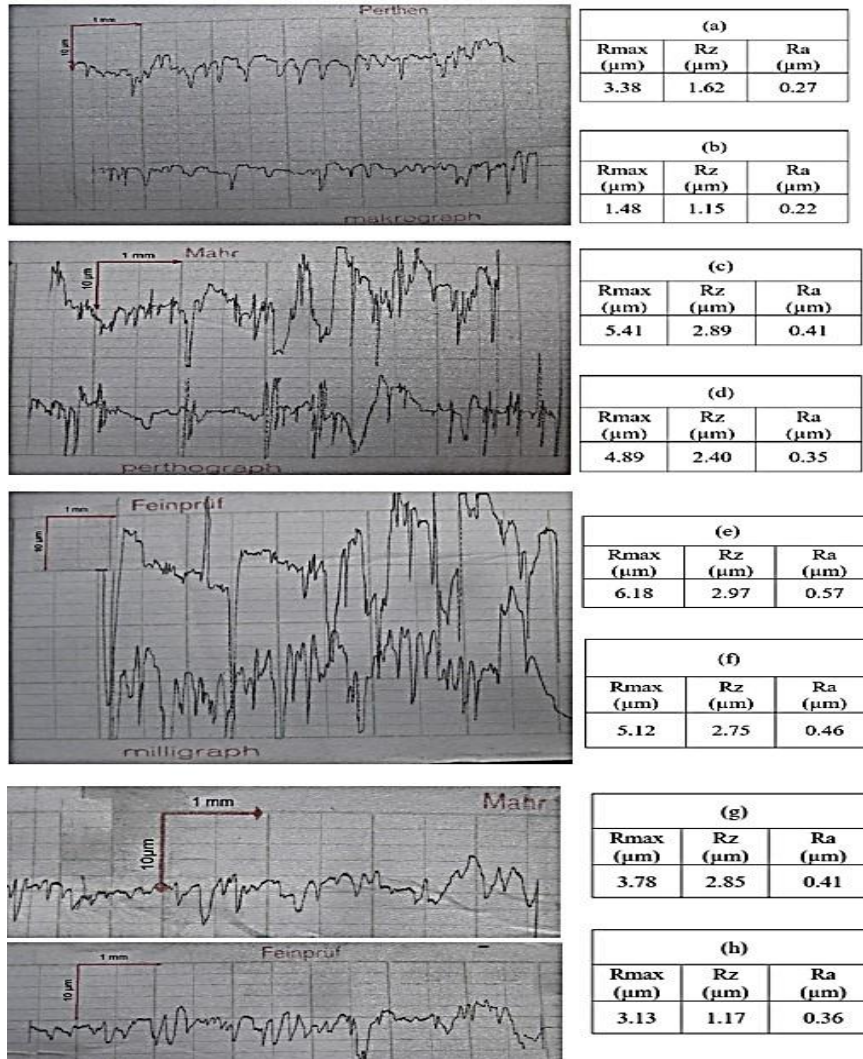
**Table 1.** Physical properties of the oil used in the bearing

<b>Shell Tellus C 10</b>	
ISO Viskozite Değeri ISO 3448	10
ISO Yağ Tipi	HL
Viskozite	40 C
	@ 0 °C
Viskozite İndeksi (II* 34)	70
Yoğunluk @ 15 °C kg/l (IP 160)	0.877
Akma Noktası °C (11* 15)	-30
[Parlama Noktası °C (PMCC) (IP 34)	166
Nötr. Sayısı, mg KOII/g (IP 139)	0.03
Sudan Ayrılabilme Özelliği Dakika 50 °C	20
Köpürme Özelliği/Kararlılık	
Sızdırmazlık elemanları ile uyuşabilme	14

Yatak sıcaklığına karşılık gelen dinamik viskozite  $0.02 \text{ Ns/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Deneyler  $20\text{-}25^\circ\text{C}$  aralığında ve  $253\text{N}$  ile  $553\text{N}$  yatak yükü ( $1.22$  ve  $2.66 \text{ MPa}$  yatak basıncı) değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Mil ve farklı pürüzlülük değerlerindeki üç adet ZA-27 alaşımli yatak zarflarının yüzey pürüzlülükleri, yüzey pürüzlülük test cihazı olan DIN 4768 Mahr-Germany Perthen Perthometer kullanılarak ölçülmüş, ortalama pürüz değerleri  $R_a$ , ortalama pürüz derinliği  $R_z$  ve maksimum pürüz yüksekliği  $R_{\text{max}}$  değerleri profil görünümleriyle birlikte Şekil 2’de verilmiştir. Test cihazıyla tarama uzunluğu  $4.8 \text{ mm}$  ve tarama hızı  $0.5 \text{ mm/s}$  izleme hızında

yüzeylerin profilleri kaydedilerek karbonlu kâğıda yazdırılmıştır. Farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip 1, 2 ve 3 nolu yatak zarfları ile milin çalışmadan önce ve sonra olmak üzere  $R_a$  ortalama yüzey pürüz değerlerinin sıra ile;  $0.27\text{-}0.22$ ,  $0.41\text{-}0.35$ ,  $0.57\text{-}0.46$  ve  $0.41\text{-}0.36 \mu\text{m}$  olduğu görülmektedir, Şekil 2. Şekil 2’den de görüldüğü gibi yüzeylerin deneylerden önce ve sonraki pürüzlülük değerlerinde azalma yönünde ortalama  $0.05 \mu\text{m}$  kadar bir fark görülmüştür. Bu farklılık, yağlı ortamda çalışan yüzey çiftlerinin, malzeme farklılığı sebebiyle adhezyon aşınmasından ziyade yatakların abrazyon aşınmasına maruz kaldığına işaret etmektedir (Baş, 2021a).



**Şekil 2.** Deneylerde kullanılan mil ve yatak zarflarının yüzey pürüzlülükleri profilleri; 1 nolu yatak zarfının, (a) deneyden önce, (b) deneyden sonra; 2 nolu yatak zarfının, (c) deneyden önce, (d) deneyden sonra; 3 nolu yatak zarfının, (e) deneyden önce, (f) deneyden sonra; Yatak milinin, (g) deneyden önce, (h) deneyden sonraki yüzey pürüzlülükleri  
**Figure 2.** Surface roughness profiles of shaft and bearings used in the experiments; Bearing 1, (a) before the test, (b) after the test; Bearing 2, (c) before the test, (d) after the test; Bearing 3, (e) before the test, (f) after the test; Surface roughness of the bearing shaft (g) before the test, (h) after the test

## 2.1. Yatağın kimyasal analizi

### 2.1. Chemical analysis of the bearing

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar içerisinde ZA-27 alaşımı diğer ticari alaşımlardan daha üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilemesi nedeniyle yatak uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir (Cuvalci & Baş, 2004). Bu çalışmada farklı yüzey pürüzlülük değerlerinde üç adet ZA-27 yatağı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de testlerde kullanılan ZA-27 alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

**Tablo 2.** ZA-27 alaşımının kimyasal bileşimi  
**Table 2.** Chemical composition of ZA-27 alloy

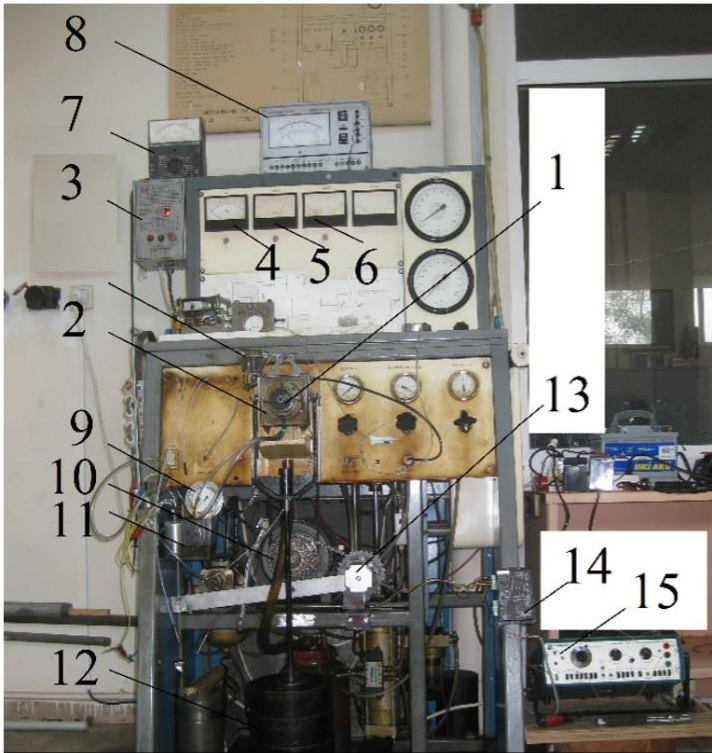
Alaşım	Kimyasal bileşim (% Ağırlık)			
	Zn	Al	Cu	Mg
ZA-27	70.8	27.2	2.01	0.02

Hidrodinamik etkili kaymalı yatak setinde kullanılan alaşımlı yatak zarfı genişliği 18 mm, maksimum çalışma basıncı 2.66 MPa değerindedir. Mil ve yatağın çapları sırasıyla 50.760 mm ve 50.850 mm olup, yatak boşluğu 45 µm’dir.

## 2.2. Deneysel düzeneği

### 2.2. The experimental setup

Deneysel düzeneğine ait görünüm Şekil 3’te verilmiştir. Düzenekte pnömatik silindirin hidrolik silindiri tahrik etmesiyle çalışan basınçlı yağlama sistemi, kaymalı yatak ve hidrolik yastığın yağ beslemesini sağlamaktadır. Yağ basınçlarını kontrol eden iki adet vana sistemde mevcuttur. Yatağın çalışma hızını 0-1100 rpm (0-2.88 m/s) aralığında kontrol edebilen DC hız kontrol ünitesi mevcuttur. Çok düşük devirlerdeki sınır sürtünme bölgesinde testlerin daha kararlı yapılabilmesini sağlamak amacıyla, tek yönlü dişli kavrama ve adım motoru (2.7 A, 30V) ve 2H504 iki fazlı step motor sürücüsü sisteme ilave edilmiştir. Step sinyalinin temini için de 0-1 kHz frekansında dalga jeneratörü sisteme dâhil edilmiştir. Moment ölçümüne ait göstergeye ilave olarak, sınır sürtünmeli çalışma bölgesinde ölçüm sınırlarının üzerinde seyreden sürtünme momenti değerlerinin okunmasını sağlayan multimetre sisteme bağlanmıştır. Düşük devirlerin hassas ölçülmesi ve okunması için sisteme devir ölçüm sistemi ilave edilerek hassas devir okuma ekranı ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, testler süresince yatakta oluşan metal-metal temasını gösteren elektronik ölçüm devresi ile göstergeden görülebilmesi mümkün olabilmektedir.



1. Mil
2. Yatak
3. DC Hız Kontrol Ünitesi
4. Devir Sayıcı
5. Moment Ekranı
6. Metal-Metal Teması Ekranı
7. Hassas Devir Ekranı
8. Hassas Moment Ekranı
9. Yatak Yağ Basınç Ekranı
10. Tek yönlü Dişli Kavrama
11. Test Yağı Haznesi
12. Yatak Yüğü
13. Adım Motoru
14. Adım Motor Kontrol Kartı
15. Dalga Jeneratörü (Hassas Hız Kontrol)

**Şekil 3.** Kaymalı yatak deneysel düzeneği

**Figure 3.** Plain bearing test setup

### 2.3. Sürtünme momentinin ölçümü

#### 2.3. Measurement of friction torque

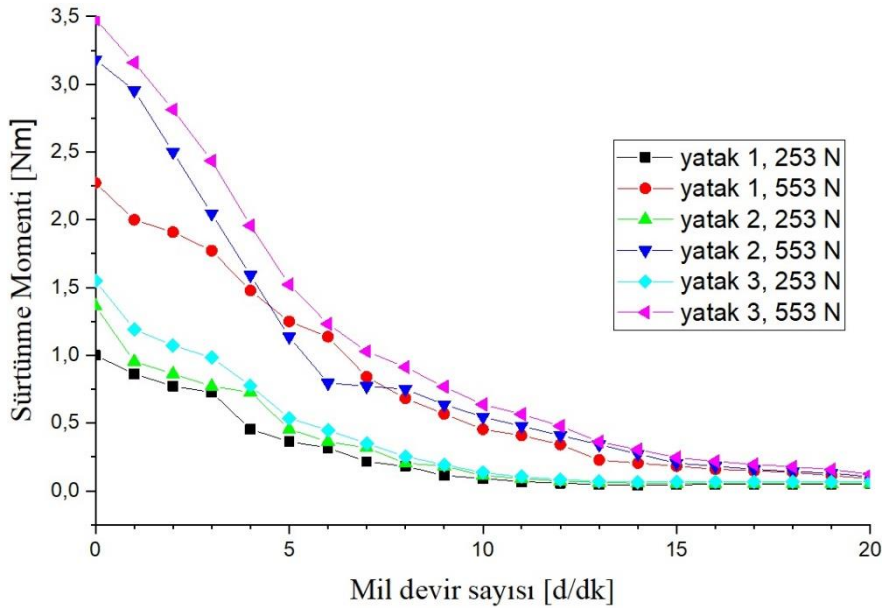
Bir kaymalı yatak sıvı film bölgesinde çalıştığında mil ile yatak arasında metal-metal teması ortadan kalkar. Sürtünme momenti yalnızca yağın viskoz kuvvetlerine bağlıdır. Yatağın yarıçapı  $R$ , genişliği  $L$ , açılma hızı  $\omega$ , radyal boşluk  $c$ , kullanılan yağın viskozitesi  $\eta$  ile tanımlanırsa sürtünme kuvveti;  $F = 2\pi RL\eta \frac{\omega R}{c}$  ve birimi [N]'dir. Sürtünme katsayısı;  $\mu = \frac{Ms}{\omega R}$  şeklindedir. Sürtünme momenti ise;  $Ms = FR = 2\pi R^2 L\eta \frac{\omega R}{c}$  olup, birimi [Nm]'dir. Yapılan yatak deneylerinde mil sabit olup yatak hareketlidir. Yükleme ağırlıklar vasıtasıyla yatak üzerinden yapılmaktadır. Yük, yatağın dönmesinden bağımsız kalabilmesi için yatak üzerine hidrostatik yastık yerleştirilmiştir. Böylece yük yatağa uygulanmakta, fakat milin sürtünmesiyle dönmek isteyen yatağın dönmeye engel teşkil etmemektedir. Sürtünme momenti, yataktaki serbest dönmeyi dengeleyen giriş üzerine

wheatson köprü devresi kurularak ölçülmüştür. Devre ile elde edilen sinyal değerleri kalibre edilerek sürtünme momenti ölçülmüştür. Deneyler başlamadan önce yataklar 153 N yatak yükünde ve 500 d/dk da 10 dk çalıştırılarak rodaj evresi tamamlanmıştır. Daha sonra, 253N ve 553 N yatak yüklerinde üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yatak zarfı (1, 2, ve 3 no'lu yataklar) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Hidrostatik yatak ve kaymalı yatak yağ basınçları 1.2 ve 0.1 MPa değerlerinde sınırlandırılmıştır.

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

Yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünün yataкта oluşan sürtünme momenti üzerindeki etkilerini belirlemek için farklı pürüz değerindeki 1 ve 2 ve 3 no'lu yataklar kullanılmıştır. Yatakların yüzey pürüzlülüklerine ait değerler Şekil 2'de her bir yatağın deneyden önce ve sonraki değerleri pürüz profilleriyle birlikte verilmiştir.

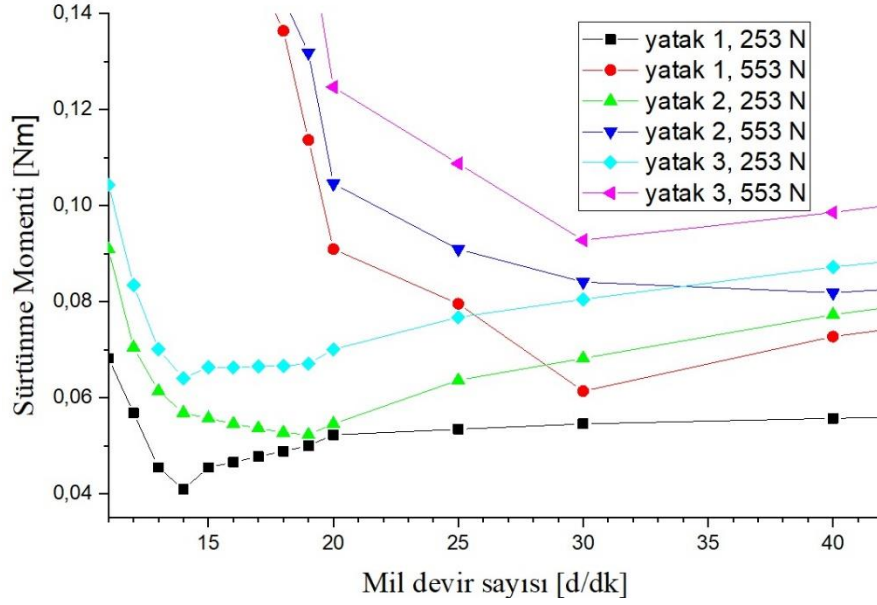


**Şekil 4.** Sınır sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme momenti değişimi

**Figure 4.** Variation of friction moment for different surface roughness and bearing load tests in the boundary friction region

Pürüz değeri en yüksek olan 3 no'lu yatak deneylerinde, pürüz değeri daha düşük olan 1 ve 2 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme momenti değerleri elde edilmiştir, Şekil 4. Benzer şekilde, 2 no'lu yatak deneylerinde de pürüz değeri düşük olan 1 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme momenti değerleri ölçülmüştür. Bu farklılıklar, sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde daha da belirgin olmaktadır. Örneğin, sınır sürtünme bölgesinde 253N ve 553N

yatak yükünde 1. 2. ve 3.ncü yatak deneylerindeki sürtünme momentinde sıra ile ortalama 1.26, 1.83 ve 1.9 Nm'lik bir artış gözlenmiştir. Artan yatak yükü ile birlikte yataкта oluşan sürtünme momenti değerlerinin daha da arttığı görülmektedir. Neticede, metal-metal teması olan çalışma koşullarında yüzey pürüzlülüğü etkisinin sürtünme momenti üzerinde baskın olduğu tespit edilmiştir. Sıvı film bölgesinde yüzey pürüzlülüğü etkisinin ise fazla olmadığı belirlenmiştir.

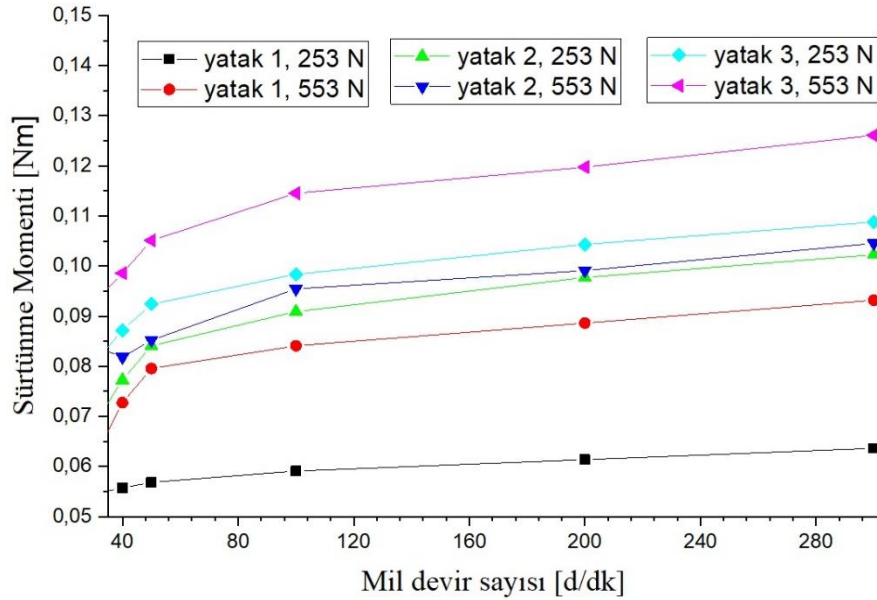


**Şekil 5.** Karışık sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme momenti değişimi

**Figure 5.** Variation of friction moment for different surface roughness and bearing load tests in the mixed friction region

253 N'lık yatak yükünde 1 ve 2 ve 3 nolu yatak testlerinde geçiş devir sayısı birbirlerine çok yakın olmakla birlikte 14-19 d/dk aralığında değişirken, 553N yatak yükünde bu fark artmakta ve yaklaşık 30-40 d/dk aralığında olduğu görülmektedir, Şekil 5. Geçiş devir sayılarında yani metal-metal temasının ortadan kalkmaya yüz tuttuğu, yağ film

teşekkülünün başladığı durumlarda yatakta oluşan moment değişimindeki bu fark, düşük yükte (253N) yaklaşık 0.022 Nm iken, büyük yükte (553N) 0.035 Nm'dir. Deneylerden görülmektedir ki farklı yüzey pürüzlü yataklarda yükün artmasıyla birlikte yatakta oluşan sürtünme momentlerindeki fark aralığı da artmaktadır.



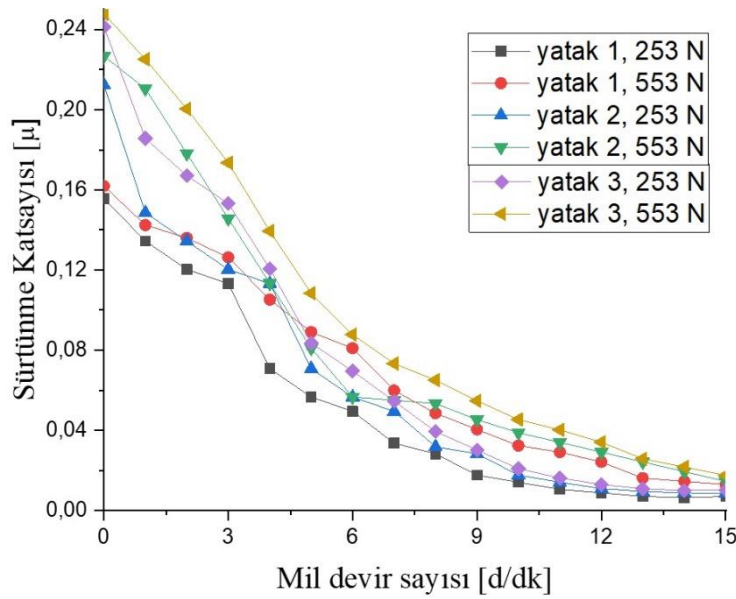
**Şekil 6.** Sıvı sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme momenti değişimi

**Figure 6.** Variation of friction moment for different surface roughness and bearing load tests in the fluid friction region

Kaymalı yataklarda ideal çalışma devri olarak geçiş devrinin üç katı civarında olduğu dikkate alındığında, yaklaşık 60 d/dk'dan sonra yağ film teşekkülünün emniyetli bir şekilde oluştuğu ifade edilebilir. Bu durumda sıvı sürtünme bölgesinden rahatlıkla söz edilebilmekle birlikte, metal-metal temasının tamamen ortadan kalktığı, yağ film teşekkülünün tam manasıyla oluştuğu hususu, mil-yatak arasında kontak olup olmadığını gösteren ölçüm devresiyle birlikte doğrulanmış ve deneylerde gözlenmiştir. Sıvı film oluşumuyla birlikte, farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yatakta oluşan moment değişimindeki değer farklılığı düşük yükte (253N) yaklaşık 0.022 Nm iken, büyük yükte (553N) 0.035 Nm olarak ölçülmüştür. Şekil 6'da görüldüğü gibi, gittikçe artan farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip 1, 2 ve 3 nolu yatak deneylerinde, yükün artmasıyla birlikte yatakta oluşan sürtünme momentlerindeki minimum ve maksimum değer farkları sırayla 0.024, 0.03 ve 0.085 Nm olarak ölçülmüştür. Buradan da görülmektedir ki, yatak deneylerinde yüzey

pürüzlülüğündeki artışın, sınır sürtünme bölgesindeki sürtünme momenti artışı üzerinde daha fazla etkili olduğu belirlenmiştir. Sıvı sürtünme bölgesindeki sürtünme momenti artış farkları ise çok az olmaktadır. Bu bölgede artan devir sayısı ile birlikte sürtünme momentinin artış göstermesi, yüzey pürüzlerinden ziyade yağ molekülleri arasındaki viskoz sürtünmeler sebebiyle meydana gelmektedir.

Kaymalı yataktaki sürtünme katsayısını belirlemek için, ilk olarak yataktaki çevresel sürtünme kuvveti değerleri ölçülmüş, daha sonra bu sürtünme kuvvetinin yatak yüküne oranı alınarak yatakta oluşan sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Farklı yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri sınır sürtünme bölgesi için Şekil 7'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün yatakta oluşan sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini belirlemek için farklı pürüz değerindeki 1 ve 2 ve 3 no'lu yataklar kullanılmıştır.



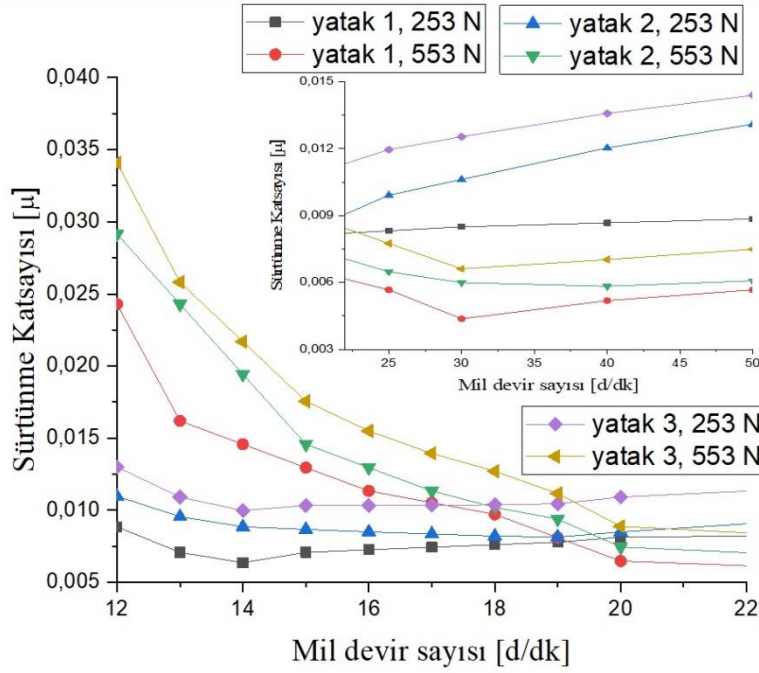
**Şekil 7.** Sınır sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü yatak yükü testlerinde sürtünme katsayısı ile yatak hızının değişimi

**Figure 7.** The variation of bearing speed and friction coefficient at different surface roughness and bearing load tests in the boundary friction region

Şekil 7'de verilen grafikte de görüldüğü gibi, pürüz değeri en yüksek olan 3 no'lu yatak deneylerinde, pürüz değeri daha düşük olan 1 ve 2 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. 2 no'lu yatak deneyleri de, pürüz değeri düşük olan 1 no'lu yatak deneylerine nazaran daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri göstermiştir. Bu farklılıklar, sınır ve karışık sürtünme bölgelerinde daha da belirgin olmaktadır. Örneğin, sınır sürtünme

bölgesinde 253N ve 553N yatak yükünde 1 2 ve 3 nolu yatak deneylerindeki sürtünme katsayılarında sıra ile ortalama 0.00619, 0.0143 ve 0.00651 kadar bir artış gözlenmiştir. Artan yatak yükü ile birlikte yatakta oluşan sınır sürtünme bölgesindeki sürtünme katsayısı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Netice itibarıyla metal-metal teması olan çalışma koşullarında yüzey pürüzlülüğü artışının sürtünme katsayısını da artırdığı tespit edilmiştir.



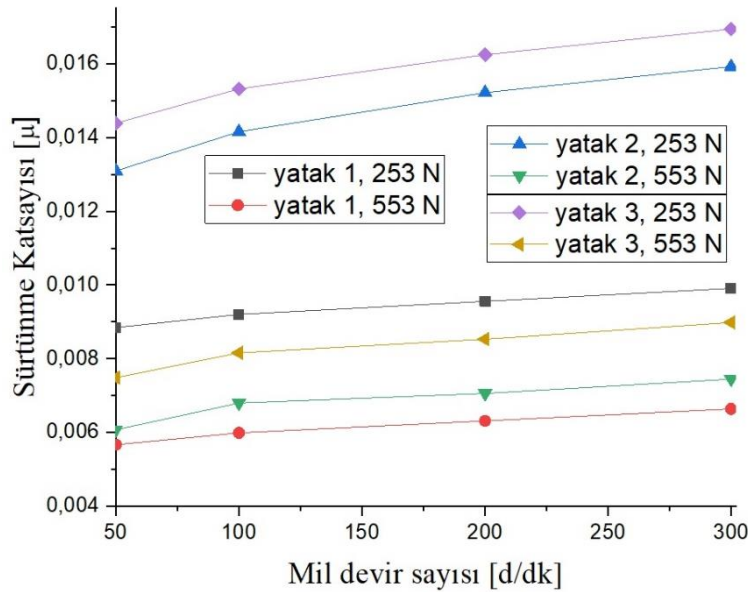


**Şekil 8.** Karışık sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme katsayısı ile yatak hızının değişimi

**Figure 8.** The variation of bearing speed and friction coefficient at different surface roughness and bearing load tests in the mixed friction region

Şekil 8'de ise, sıvı film bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü etkisinin sürtünme katsayısı üzerinde daha az etkiye sahip olduğu görülmektedir. Örneğin 253 N'luk yatak yükünde 1 ve 2 ve 3 nolu yatak testlerinde geçiş devir sayısı 14-19 d/dk aralığında değişirken, 553 N'da devir artmakta ve yaklaşık 30-40 d/dk aralığında olduğu görülmektedir, Şekil 8. Geçiş devir sayılarında yani

yağ film oluşumunun başladığı durumlarda yatakta oluşan sürtünme katsayısı değişimindeki bu fark düşük yükte (253N) yaklaşık 0.0307 değerinde iken, büyük yükte (553N) 0.00415 değerindedir. Deneylerden görülmektedir ki farklı yüzey pürüzlü yataklarda yükün artmasıyla birlikte yatakta oluşan sürtünme katsayılarındaki fark aralığı da artmaktadır.



**Şekil 9.** Sıvı sürtünme bölgesindeki farklı yüzey pürüzlülüğü ve yatak yükü testlerinde sürtünme katsayısı ile yatak hızının değişimi

**Figure 9.** The variation of bearing speed and friction coefficient at different surface roughness and bearing load tests in the fluid friction region

Kaymalı yataklarda sıvı sürtünme bölgesinde yani metal-metal temasının tamamen ortadan kalktığı, yağ film teşekkülünün tam manasıyla oluştuğu durumda (yaklaşık 50 d/dk için) farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yataklarda oluşan sürtünme katsayısı değişimindeki fark, düşük yükte (253N) 0.015 iken, büyük yükte (553N) 0.0013 değerlerindedir. Şekil 9'daki grafikte görüldüğü gibi, yapılan deneylerden de görülmektedir ki gittikçe artan farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip olan 1, 2 ve 3 nolu yatak testlerinde, yüzey pürüzlülüğündeki artışın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi sıvı sürtünme bölgesinde az iken, karışık ve sınır sürtünme bölgesinde daha fazla olmaktadır.

Yapılan deneylerde, yatakların yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olarak, artan yatak yükü ile birlikte hidrodinamik kaymalı yatakta oluşan sürtünme momentinin de arttığı, sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmüştür. (Çakır, 2014; Koç, 2012). Azalmanın sebebi, yatak yükündeki artışın, yatakta oluşan sürtünme kuvvetine kıyasla değer olarak daha fazla olması, ya da yükün artmasıyla yüzeyler arasındaki yağ filminin incilmesi sonucu yağın iç sürtünmesinin azalmasından kaynaklanmış olabilir.

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Hidrodinamik etkili statik yüklü radyal kaymalı yatakta, yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkilerini belirlemek için, malzeme ve geometrik boyutları aynı olan farklı pürüzlülük değerlerindeki üç adet yatak zarfı kullanılarak, iki farklı yükte deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Artan yatak yükü ile birlikte hidrodinamik kaymalı yatakta oluşan sürtünme momentinin de arttığı, sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmüştür.

2. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça yatakta oluşan sürtünme momenti ve sürtünme katsayısı da artış göstermektedir. Bu artış miktarı, sıvı sürtünme bölgesinde az iken, sınır sürtünme bölgesinde daha fazladır.

3. Eş çalışan mil ve yatak yüzeylerindeki yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte geçiş devir sayısının da arttığı gözlenmiştir.

4. Artan geçiş devir sayısı yağ filmi oluşumunu geciktirdiğinden, yatağın her çalışma başlangıcında metal-metal temas sürecinin

artmasına, dolayısıyla yatak ömrünün azalmasına ve performansının düşmesine sebep olmaktadır.

5. Deney süresince yüzeylerin pürüzlülük değerlerinde çok az bir azalma olmuştur. Bu da yağlı ortamda çalışan yüzey çiftlerinde farklı mil ve yatak malzemesi nedeniyle adhezyon aşınmasından ziyade abrazyon aşınmasına işaret etmektedir.

#### Etik beyanı

##### Declaration of ethical code

Yazar bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt eder.

#### Çıkar çatışması beyanı

##### Conflicts of interest

Yazar bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### Kaynaklar

##### References

- Alford, L. P. (1911). Bearings and their lubrication. *The American Machinist*, Print book, New York.
- Baş, H. (2021a). Investigation of effects of surface roughness on performance of cam mechanisms. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(1), 67-73. <https://doi.org/10.18245/ijaet.843229>.
- Baş, H. (2021b). Investigation of effects of boron additives on performance of cam mechanisms. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(1), 60-66. <https://doi.org/10.18245/ijaet.843193>
- Baş, H., & Karabacak, Y.E. (2022). Investigation of tribological properties of TiO<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> particles as vegetable oil additives and their effects on gearbox performance. *Journal of Bio Tribo Corrosion* 8, 66. <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00664-2>
- Baş, H. (2022). Tribological properties of MoS<sub>2</sub> particles as lubricant additive on the performance of statically loaded radial journal bearings. *Turkish Journal of Engineering*, 7(1), 42-48. <https://doi.org/10.31127/tuje.1016153>
- Baş, H., Özen O., & Beşirbeyoğlu M. (2022). Tribological properties of MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> particles as grease additives on the performance

- of block-on-ring surface contact. *Tribology International*, 168, 107433. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107433>
- Bhaskar, S.U., Manzoor H. M., & Yousuf A. M. (2013). Stability analysis on plain journal bearing with effect of surface roughness. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4, 3. <http://www.ijser.org>
- Bhuvaneshwari, R. H., Benchalli, S. S., Ramakrishna P., & Sapare N. S. (2014). The effect of couple stress and surface roughness on journal bearing using cavitation boundary conditions with respective load. *European Journal of Applied Engineering and Scientific Research*, 3(4), 22-26, <http://scholarsresearchlibrary.com/archive.html>.
- Burwell, J. T., Kaye, J., Nymegen, D. W., & Morgan, D. A. (1941). Effects of surface finish on journal bearing performance. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 8, A49-A58, <https://asmedigitalcollection.asme.org/article-pdf>
- Chong, W. W. F., & De la Cruz, M. (2014). Elastoplastic contact of rough surfaces: a line contact model for boundary regime of lubrication. *Meccanica*, 49, 1177-119, <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9861-1>
- Chong, W. F., & Hamdan S.H. (2019). Modelling transitions in regimes of lubrication for rough surface contact. *Tribology of Powertrain Systems*, 7(9), 77, <https://doi.org/10.3390/lubricants7090077>
- Cuvalci, H., & Baş, H. (2004). Investigation of the tribological properties of silicon containing zinc-aluminum based journal bearings. *Tribology International*, 37(6), 433-440, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2003.10.006>
- Çakır, E. (2014). *Demiryolları buraj makineleri agregası ünitesinde kullanılan kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Delprete, C., & Razavykia A. (2018). Piston dynamics, lubrication and tribological performance evaluation: A review: *P I Mechanical Engineering, International Journal of Research* 1-17, <https://doi.org/10.1177/1468087418787610>
- Eric W. S., & Daniel H. B. (1999). The effect of journal surface finish on journal bearing load capacity – A radiometric method, *SAE Transactions* 108, 3: Journal of Engines, 429-436, <https://www.jstor.org/stable/44743382>
- Koç E., & Yıldızlı K. (2012). Hidrodinamik radyal kaymalı yatak performans deneyi. [http://mak.muhendislik.omu.edu.tr/tr/belgeler/deneysel-foyleri/Radyal\\_yatak\\_denyi.pdf](http://mak.muhendislik.omu.edu.tr/tr/belgeler/deneysel-foyleri/Radyal_yatak_denyi.pdf)
- Lu, X. (2006). *Tribological Aspects of Journal Bearings Focusing on the Stribeck Curve* [Doctoral Dissertations, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College].
- Lu, X., Khonsary, M.M., & Gelinck, E.R.M. (2006). The stribeck curve: Experimental results and theoretical prediction. *Journal of Tribology*, 128(4), 789-794, <https://doi.org/10.1115/1.2345406>
- Mang, T. (2014). *Encyclopedia of lubricants and lubrication*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2>
- Mathias, W., & Rolf, W. (2010). The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens. *Wear*, 268(11-12), 1542-1546.
- Salman, Ö. (2011). *Yağlama yağı için bitkisel yağların ve esterlerinin tribolojik özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Sanchez, C. J. (2011). *Tribological characterization of carbon based solid lubricants*. [M.Sc Thesis, Texas A&M University].
- Saraç, İ. (2022). Investigation of the effects of surface roughness on stress distribution and moment carrying capacity at shrink-fitted joints. *Material Science & Engineering Technology*, 53(1), 1-127 <https://doi.org/10.1002/mawe.202100136>
- Sun, J., Zhu, X., Zhang, L., Wang X., Wang, C., Wang, H., & Zhao X. (2014). Effect of surface roughness, viscosity-pressure relationship and elastic deformation on lubrication performance of misaligned journal bearings. *Industrial Lubrication and Tribology*, 66(3), 337-345. <https://doi.org/10.1108/ilt-12-2011-0110>
- Türekim-Endüstriyel Yağlar. (2022, Haziran 18). <http://www.turekim.com/shell5.html>
- Westerfield, Z., Liu, Y., Kim, D., & Tian, T. (2016). A Study of the friction of oil control rings using the floating liner engine. *SAE International Journal of Engines*, 9(3), 1807-1824, <https://doi.org/10.4271/2016-01-1048>