



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİTKİSEL VE MADENSEL YAĞLAYICILAR
ETKİSİNDE HİDRODİNAMİK KAYMALI
YATAK UYGULAMALARINDA STRİBECK
EĞRİSİNİN OLUŞUMU**

Mustafa SALUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2025
KONYA

Her Hakkı Saklıdır
TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa Salur tarafından hazırlanan “Bitkisel ve Madensel Yağlayıcılar Etkisinde Hidrodinamik Kaymalı Yatak Uygulamalarında Stribeck Eğrisinin Oluşumu” adlı tez çalışması 09/01/2025 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

Dr. Öğr. Üyesi Musa DEMİRCİ
(KTO Karatay Üniversitesi)

Danışman

Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
(Konya Teknik Üniversitesi)

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ
(Konya Teknik 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.

Mustafa SALUR

Tarih:09.01.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİTKİSEL VE MADENSEL YAĞLAYICILAR ETKİSİNDE HİDRODİNAMİK KAYMALI YATAK UYGULAMALARINDA STRİBECK EĞRİSİNİN OLUŞUMU

Mustafa SALUR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

2024, 70 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
Dr. Öğr. Üyesi Musa DEMİRCİ
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ**

Bu çalışma, kaymalı yatakların tasarımında kritik öneme sahip olan Stribeck Eğrisini deneysel olarak inceleyerek, farklı yağlayıcılar ve malzemelerle sürtünme katsayısı, hız ve yük ilişkilerini detaylı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan yağlayıcılar, geleneksel madensel yağların (5W30 ve 15 w 40) yanı sıra, bitkisel yağların (soya, aspir, ay çekirdeği, zeytin ve mısır yağı) performansını değerlendirmek amacıyla karışımlar halinde test edilmiştir.

Deneyler, Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan PA Hilton Journal Friction Apparatus HFN 5 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve RG-5 ile CuSn12 bronz yatak malzemeleri üzerinde sürtünme katsayısı ile hız-yük değişkenleri arasındaki ilişkiler Stribeck Eğrisi doğrultusunda analiz edilmiştir. Çalışmada, farklı hız (90, 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1020, 1200, 1350 ve 1500 dev/dk) ve yük (0, 20, 40 ve 60 N) aralıklarında sürtünme katsayıları ölçülmüş, yağlama koşulları detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve yağlama türlerinin enerji verimliliğine olan etkileri sorgulanmıştır.

Elde edilen bulgular, bitkisel yağların endüstriyel uygulamalarda alternatif bir yağlayıcı olarak kullanılabileceğini ve karışımların sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin madensel yağlarla kıyaslandığında belirli avantajlar sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, enerji verimliliği ve performans optimizasyonu açısından kaymalı yatak tasarımlarına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bitkisel yağlama, Hidrodinamik kaymalı yatak, Hidrodinamik yağlama, Kaymalı yatak

ABSTRACT

MS THESIS

FORMATION OF THE STRIBECK CURVE IN HYDRODYNAMIC JOURNAL BEARING APPLICATIONS UNDER THE INFLUENCE OF VEGETABLE AND MINERAL LUBRICANTS

Mustafa SALUR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

2024, 70 Pages

**Jury
Prof.Dr. Mehmet BAGCI
Asst.Prof.Dr. Musa DEMIRCI
Asst.Prof.Dr. Yusuf YILMAZ**

This study aims to experimentally examine the Stribeck Curve, which is critically important in the design of journal bearings, by analyzing in detail the relationships between the coefficient of friction, speed, and load using different lubricants and materials. The lubricants used in the study include conventional mineral oils (5W-30 and 15W-40) as well as vegetable oils (soybean, safflower, sunflower, olive, and corn oils), which were tested in blended forms to evaluate their performance.

The experiments were conducted using the PA Hilton Journal Friction Apparatus HFN 5 available at Konya Technical University. The relationships between the coefficient of friction and speed-load variables were analyzed on RG-5 and CuSn12 bronze bearing materials in accordance with the Stribeck Curve. Friction coefficients were measured at various speeds (90, 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1020, 1200, 1350, and 1500 rpm) and loads (0, 20, 40, and 60 N). The lubrication conditions were thoroughly evaluated, and the effects of lubrication types on energy efficiency were investigated.

The findings showed that vegetable oils could be used as alternative lubricants in industrial applications, and the effects of blends on the coefficient of friction provided certain advantages when compared to mineral oils. Consequently, this study makes a significant contribution to the design of journal bearings in terms of energy efficiency and performance optimization.

Keywords: Hydrodynamic journal bearing, Hydrodynamic lubrication, journal bearing, Vegetable lubrication

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olan kaymalı yatakların tasarımında temel bir öneme sahip olan Stribeck eğrisi deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Farklı yağlayıcılar ve malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen tekrarlı deneylerle, kaymalı yataklara ait sürtünme katsayısının hız ve yük ile olan ilişkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, kaymalı yatakların performans özelliklerinin anlaşılmasına ve optimize edilmesine yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır.

Deneyler, Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde yer alan ve bu tür araştırmalarda sıkça kullanılan PA Hilton Journal Friction Apparatus HFN 5 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan farklı yağlayıcı türleri ve malzeme kombinasyonları, kaymalı yatakların çeşitli endüstriyel uygulamalardaki performansını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirme fırsatı sunmuştur.

Bu kapsamlı çalışma, kaymalı yatakların tasarımında ve seçiminde mühendislik açısından kritik bir referans oluşturacak önemli veriler sağlamıştır. Ayrıca, malzeme ve yağlayıcı türlerinin etkilerinin daha iyi anlaşılmasını mümkün kılarak, daha verimli ve dayanıklı sistemler geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Bu çalışmada beni yönlendiren danışmanım Prof. Dr. Mehmet BAĞCI 'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa SALUR
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Stribeck Eğrisi.....	7
1.1.1.Sınır yağlama bölgesi.....	9
1.1.2.Karışık yağlama bölgesi.....	9
1.1.3.Hidrodinamik yağlama bölgesi.....	9
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
2.1. Deneysel Tertibat.....	10
2.2.Deneysel Parametreler	15
2.3. Stribeck Eğrisinin Elde Edilmesi	16
3. DENEY SONUÇLARI	17
3.1. Stribeck Eğrilerinin Elde Edilmesi	17
3.2. Stribeck Eğrilerinin Kıyaslanması	25
3.3. Sürtünme Katsayısı- Hız Grafikleri	30
3.3.1. RG-5 yatak malzemesinde yağların kıyaslanması	30
3.3.2. CuSn12 yatak malzemesinde yağların kıyaslanması	36
3.3.3. Yatak malzemelerinin kıyaslanması	41
3.4. Sürtünme Katsayısı – Yük Grafikleri	47
3.4.1. RG-5 yatak malzemesinde farklı yağlayıcılarda yük değişim grafikleri	47
3.4.2. CuSn12 yatak malzemesinde farklı yağlayıcılarda yük değişim grafikleri ..	53
3.5.Yağ Karışımlarının Sürtünme Katsayısı – Hız Grafikleri	58
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
4.1. Stribeck Eğrileri ve Performans Değerlendirmesi	65
4.1.1. RG-5 malzemesi	65
4.1.2. CuSn12 malzemesi	65
4.2. Yağ Türleri Arasındaki Farklılıklar	65
4.2.1.Madeni yağlar (5W30, 15W40).....	65
4.2.2. Bitkisel yağlar	65
4.3. Malzeme ve Yağ Türü Kıyaslamaları	66
4.4. Yağ Karışımları.....	66
4.5 Hız ve Yük Analizi	67
4.5.1. Hız değişimine göre performans.....	67

4.5.2. Yük değişimine göre performans.....	67
4.6. Öneriler	68
4.6.1. Malzeme ve yağ seçimi.....	68
4.6.2. Yağ karışımları	68
KAYNAKLAR	69



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f: sürtünme katsayısı

μ : vizkozite (Pa.s)

N: devir

P: yatak basıncı (Pa)

r: yarıçap (mm)

c: radyal boşluk (mm)

L: yatak boyu (mm)

F: yatağa etkiyen yük (N)

h_o : minimum film kalınlığı (mm)

e: eksantrisite (mm)

F_i : askıya asılan yük (N)

F_n : yatak burcuna etkiyen yük (N)

F_d : denge koluna asılan yük (N)

M_s : sürtünme momenti (N.mm)

Kısaltmalar

PETP : Polietilen Tereftalat

PLA: Polilaktik Asit

UHMWPE :Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen

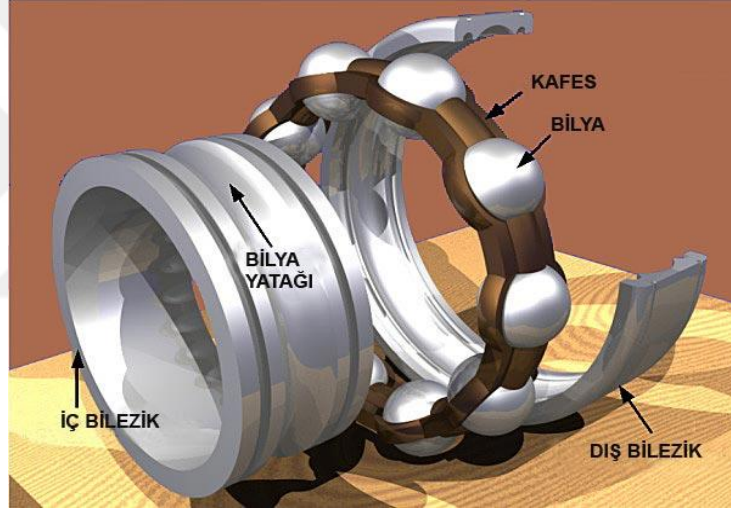
PTFE: Politetrafloroetilen

PEEK: Polietereterketon

CFD: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

1. GİRİŞ

Dönel veya doğrusal hareket altında kuvvet aktaran tabla, aks, mil vb. elemanlar üzerine etkiyen radyal ve eksenel yüklerin taşınmasında görev alan temel elemanlar yataklardır. Millerin hareketinin bir yerden farklı bir yere aktarılması için dişli çark, zincir, kavrama ve kayış-kasnak mekanizmaları kullanılır. Yataklar ise millerin bu görevi yapabilmesi için destek görevi üstlenmekle birlikte endüstriyel kullanıma yönelik sürtünme etkisinde enerji kaybının minimizasyonu amacıyla da işlevsel yapıya sahiptirler. Yataklar, kullanılacakları sistemlerdeki çalışma şartlarının farklı olmasından dolayı farklı yetenekte çözüm sunmakta olup yuvarlanma teması yani rulmanlı (Şekil 1.1) ve kaymalı yatak (Şekil 1.2) olmak üzere iki ana başlıkta değerlendirilmektedir. (Budynas ve Nisbett, 2015)



Şekil 1.1. Rulmalı yatak



Şekil 1.2. Kaymalı yatak

Kaymalı yatak tasarımında etkin rol oynayan parametrelerden ilki yatak malzemesi olup yatakların üretileceği malzeme, izafi hareket esnasında oluşan sürtünme sonucunda aşınma ve ısınmaya sebep olmaktadır. Bu sebeple yatak malzemelerinin basma ve yorulma mukavemetlerinin yüksek olması, aşınma ve korozyona karşı yüksek dayanımına sahip olması beklenmekte ve bu kapsamda alternatif çözümler aranmaktadır. Bir diğer temel etken olan çalışma hızı, millerde arttıkça yataklara gelen yüklerin artmasıyla birlikte aşınma etkisinde yatak ömrünü kısaltacaktır. Kaymalı yatakların optimum şartlarının sağlanabilmesine yönelik parametrelerden bir diğeri de yağlayıcılarıdır. Yağlama işlemi hareketli iki yüzey arasındaki sürtünmeyi düşürmek için kullanılan bir yöntem olup yağlama işlemi ile iki yüzey arasında bir yağ filmi oluşturulur. Yağlayıcının türü, viskozitesi, yağ filmi kalınlığı ve yağ sıcaklığı yatak performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla yağlama işlemi kaymalı yatak üretiminde çok büyük önem taşımaktadır. (Babalık, 2018)

Bu temel parametrelere ilave olarak çevre şartları ve işletme değişkenlikleri de sorgulandığında geçmişten günümüze bu alanda çözüm odaklı birçok çalışma yapılmış ve literatüre katkı sağlanmıştır. Kaymalı yatakların etkin kullanımı üzerine çalışmalar incelendiğinde örnekler çoğaltılabilmektedir.

Erol Feyzullahoğlu ve Zehra Şafak (2006) yaptıkları çalışmada Ertacetal (POM – Delrin),Ertalyte (PETP),Ertalon 6PLA (Cast Polyamide) ve Devateks yatak malzemelerini PA Hilton HFN5 isimli kaymalı test cihazında kuru sürtünmeli olarak farklı kuvvetlerde ve hızlarda deneyleri yapmışlardır. Bu malzemelere ait sürtünme katsayısı sürtünme torku sıcaklık ve ağırlık kayıpları bulunmuştur. Sonuç olarak, test edilen tüm malzemeler arasında en iyi sürtünme torku ve sürtünme katsayısı değerlerine Devateks sahip oldu. Malzemenin aşınma değerlerini incelediğimizde en düşük aşınma oranına PETP sahiptir. Bu malzemelerin tribolojik özellikleri göz önüne alındığında, plastik esaslı kaymalı yatak tasarlanırken, çalışma koşullarına bağlı olarak tercih edilecek en iyi malzeme Devateks veya Ertalyte (PETP) olabilir. (Feyzullahoglu ve Şafak, 2006).

Aysun Sarı, Özlem Salman Nteziyaremye (2016) yaptıkları çalışmada Kestamid, Kestamid/HS, Kestoil, Kestlub, Ulpolen 1000 (UHMWPE) gibi polimerlerinin üzerinde kuru sürtünmeli ortamda farklı hız ve kuvvetlerde deneyleri yapmışlardır. Malzemelere ait sürtünme kuvveti ile katsayılarını ve yüzey pürüzlülüklerini bulmuşlardır. Sonuç

olarak Kestoil yatak malzemesinin sürtünme katsayısı çalışma şartlarının tamamında diğer malzemelere göre daha düşük çıkmıştır. (Sarı ve Salman Nteziyaremye, 2016)

Bekir Sadık Ünlü ve arkadaşları (2003) yaptıkları çalışmada bronzdan (CuSn10) ürettikleri kaymalı yatağı farklı kuvvetler ve farklı hızlarda hem kuru sürtünmeli ortamda hem de hidrodinamik yağlamalı durumlarda incelemişlerdir. Bu yatağa ait farklı durumlardaki sıcaklık sürtünme katsayısı ve ağırlık kayıplarını buldular. (Ünlü ve diğ., 2003)

Gültekin Karadere (2000) yaptığı çalışmada sinterlenmiş bronzdan üretilen bir kaymalı yatak üzerinde Mobil SAE 20 W-50 yağı ile farklı hızlarda deney yapmıştır. Deneyler hem hidrodinamik hem de hidrostatik yağlama prensibine göre gerçekleştirilmiştir. (Karadere, 2001)

Bekir Sadık Ünlü ve Enver Atik (2008) yaptıkları çalışmada CuSn10 bronz ve CuZn30 pirincinden üretilen iki farklı yatağı SAE 90 yağ ile hidrodinamik yağlama prensibine göre yağlayarak deneyleri gerçekleştirdiler. Deneylerde bu iki malzemeye ait sürtünme katsayıları sıcaklık ve ağırlık kayıpları bulundu. Malzemelerin aşınma oranları belirlendi. Sonuç olarak Aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri CuSn10, CuZn30 ve saf Sn'de azalırken, diğer saf Cu ve saf Zn yataklarında bu değerler artmıştır. En yüksek sürtünme katsayıları CuSn10 ve saf Cu yataklarında meydana gelirken, en düşük sürtünme katsayıları saf Sn ve saf Zn, yataklarında meydana geldi. En yüksek mekanik özellikler CuSn10 ve CuZn30 yatak malzemelerinde, en düşük mekanik özellikler ise saf Sn ve saf Zn yatak malzemelerinde meydana gelmiştir. (Ünlü ve Atik, 2008)

Gengyuan Gao ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada PTFE, karbon fiber ve PEEK yatakların su ile yağlaması durumunu incelemiştir. Çalışmada yatakların hem CFD analizi hem de farklı koşul ve kuvvetlerde deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada su ile hidrodinamik yağlama yapılan yataklar için uygun çapı bulmayı amaçlamıştır. Çalışma sonucunda sürtünme katsayısı ve su filmi kalınlığı bulunmuştur. (Gao ve diğ.,2014)

Daniel Miler ve Stanko Škec (2019) yaptıkları çalışmada NORDEN Marine 605 kompozit malzemeden üretilen yatağı PTFE ile yağlamışlar. Farklı kuvvet ve hızlarda yapılan deneyler ile yatak boşluğunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve aşınma üzerindeki

etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak Kuru çalışan numunelerde, boşluk boyutu arttıkça sürtünme katsayısı azalırken, PTFE ile yağlanmış numunelerde yerel minimum bulunmalıdır. Sürtünme katsayısı ile yatak sıcaklığı arasındaki doğrusal ilişki bulunmuştur. (Miler ve diğ.,2019)

Güler Öncü, Ertuğrul Durak (2021) yaptıkları çalışmada AA7075 alüminyum alaşımından üretilen kaymalı yatağın hidrodinamik yağlama analizini yapmışlardır. Çalışma da sonlu elemanlar analizi ile deneyler birlikte yapılmıştır. Çalışma sonucunda mil hızı ile basıncın orantılı olarak küçüldüğü, açıklık değeri ile basınç değerinin ters orantılı olduğu, eksantrisine basıncın orantılı olarak büyüdüğü, vizkosite değerleri ile basıncın orantılı olarak büyüdüğüne ulaşılmıştır. (Öncü ve Durak, 2021)

Hasan Baş (2022) yaptığı çalışmada, hidrodinamik kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün yatak performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, yatak malzemesi aynı olan üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yatak zarfı kullanarak farklı yüklerde ve sıcaklıklarda deneyler yapmıştır. 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. (Baş, 2022)

Hakan Adatepe ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada, statik yük altındaki bir radyal kaymalı yatakta (Chrysler biyel kolu yatağının) sürtünme katsayısı değişimi, teorik ve deneysel olarak belirlemiştir. Çalışmanın teorik kısmında; yatak yükünün, yatak boşluğunun ve yağ viskozitesi değişiminin sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Deneysel kısımda ise; sürtünme momentine yatak parametrelerinin etkisi TM 290 hidrodinamik radyal kaymalı yatak deney setinden ölçülmüştür. Ölçülen sürtünme momentinden, sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Sonuç olarak teorik ve deneysel olarak belirlenen sürtünme katsayıları karşılaştırılmıştır. (Adatepe ve diğ. 2012)

Kumar Sunil ve arkadaşlarının (2020) yaptıkları çalışmada yağlayıcı özelliklerinin yatakların statik ve dinamik performansına etkisi incelenmiştir. Mikropolar yağlayıcı, iyonik sıvı yağlayıcılar, boşluk yağlayıcılar gibi farklı yağlayıcı çeşitlerinin hidrostatik, hidrodinamik ve hibrit kaymalı yatakların performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. (Kumar ve diğ. 2020)

Hamdullah Çuvalcı ve Hasan Baş (2004) yaptıkları çalışmada kaymalı yataklar üzerinde farklı hız ve kuvvetlerde deneyler yapmışlardır. Deneylerde yataklara ait sürtünme katsayısı bulunmuştur. (Çuvalcı ve Bas ,2004)

Subramanian, Baskar ve Sriram, G.. (2012) yaptıkları çalışmada çeşitli yükleme koşulları ve çeşitli çalışma parametreleri için farklı yağlayıcılar altında hidrodinamik kaymalı yatak üzerindeki basınç dağılımını analiz ettiler. Yatakları, 300 N ve 450 N gibi çeşitli yük koşulları ve 1500 dev/dk ve 1750 dev/dk gibi hız aralıklarında 20W40 altında test ettiler. Kolza yağı ve soya fasulyesi yağı gibi bitkisel yağlar ile de aynı çalışma koşulları altında test ettiler. (Subramanian ve Sriram, G.. 2012)

Abdurrahim Dal ve Mustafa Kılıç (2020) yaptıkları çalışmada Nano parçacık takviyeli yağlayıcı kullanımının hidrostatik yatakların yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini teorik olarak incelenmiş. Nano parçacık takviyeli yağlayıcı kullanımının hidrostatik yatakların yük taşıma kapasitesini arttırdığını ve yüksek hacimsel oranlar için nano parçacık boyutunun performansa etkisinin daha baskın olduğunu bulmuşlardır.(Dal ve Kılıç, 2020)

Farfan-Cabrera ve arkadaşları (2023) yaptıkları çalışmada çalışmada, AISI 52100 rulman çeliğinin temas yüzeylerinden DC akım deşarjlarının etkileri, yenilikçi bir iki elektrot hücre tabanlı mikro-aşınma test cihazı kullanılarak elektrikli kuru ve sınırlandırılmış yağlama koşulları altında incelemiştir. Referans olarak bir mineral bazlı yağ, bir dişli yağı ve farklı dielektrik dayanımlarına sahip bir otomatik şanzıman yağı, elektrikli olmayan ve DC elektrikli (1.5 A) koşullar altında test etmişlerdir. (Farfan-Cabrera ve diğ. , 2023)

Hao Xu ve arkadaşları (2002) yaptıkları çalışmada yüksek performanslı bir dişli pompada kullanılan yatakların pompa hızı, yatak boşluğu ve yağlayıcı sıcaklığına verdiği tepkileri araştırmışlardır. (Xu ve diğ. , 2002)

Wang, Lanwen ve Sheng, Xuanyu. (2019) yaptıkları çalışmada SA508 çeliği ile üç farklı grafit türü arasındaki sürtünme performansı, ticari bir ileri-geri kayma sürtünme ve aşınma test cihazı kullanılarak araştırmıştır. Malzemelerin sürtünme katsayısının farklı sıcaklık ve yük altındaki değişimi analiz edilmiş ve bu grafit malzemelerinin deniz

nükleer enerji santralinde uygulanabilirliğine karar vermek için aşınma mekanizması incelemiştir. (Wang ve Sheng , 2019)

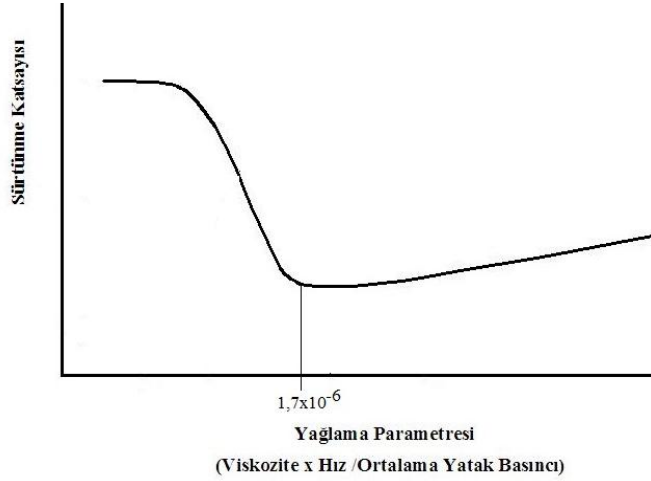
Selim Sarper Yılmaz ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada, FeCu-grafit esaslı kompozitlerden toz metalurjisi yöntemiyle metal parçalar üretmiştir. Üretilen numunelere yalnızca borlama veya borlama ve bilyalı dövme işlemi uygulamıştır. Bu parçaların yorulma özellikleri, döner eğilme yorulma test cihazı ile yapılan yorulma testiyle incelemiştir. (Yılmaz ve diğ. , 2010)

Daniel W. ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada, çeşitli bileşime sahip bi-metal ve çok katmanlı Pb içermeyen yatak malzemelerinin tribolojik performansını araştırmak için bir blok-halka test düzeneği kullanmıştır. Referans malzeme olarak Pb içeren yatak malzemesi de incelemiştir. Bu yatak malzemelerinin sürtünme ve aşınma özellikleri incelemiş ve yağlama koşulları altındaki aşınma mekanizmaları analiz etmiştir. (Daniel W ve diğ. , 2015)

Bu çalışma kapsamında ise motorlar, krank milleri, takım tezgâhları, taşıma, iletme ve kaldırma makineleri, kara ve demiryolu taşıtları, değirmen makineleri gibi endüstride birçok kullanım alanı bulunan kaymalı yatak uygulamalarının sürtünme ve yağlayıcı özelliklerinin belirlenerek enerji verimliliğin artırılması kapsamında optimum çözüme odaklanılmıştır. Kaymalı yatakların tasarımında (madensel yağlar ile soya, aspir, ay çekirdeği, zeytin ve mısır gibi bitkisel yağlar), yatak malzemesi (RG-5 ve CuSn12), yatak hızı (90, 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1020, 1200, 1350, 1500 dev/dk) ve yük (0, 20, 40 ve 60 N) gibi temel değişkenler üzerinde deneyler yapıldı. Bu parametreler üzerinden sağlanan verilerle yatakların performansına bağlı sürtünme katsayısı belirlendi ve stribek eğrileri oluşturuldu. Ardından Rg- 5 yatak malzemesinde 5W30 ile soya ve CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ile aspir yağları %90-%10, %80-%20 ve %70-%30 oranlarda karıştırılarak yağ karışımlarının performansa etkisi sorgulandı.

1.1. Stribeck Eğrisi

Şekil 1.3’de detaylandırılan Stribeck eğrisi, kaymalı yatakların tasarımında ve performansının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir karşılaştırma verisi sunmaktadır.



Şekil 1.3. Stribeck eğrisi

Bu eğri, yatak tasarımı sürecinde kullanılır ve yatağın çalışma hızı ve yükü gibi faktörler dikkate alınarak, optimal performansın sağlanması için yatak geometrisi ve malzemesi belirlenmesinde önemli yere sahiptir. Yatağın çalışma koşullarına bağlı olarak, optimum çalışma hızını belirlemek ve sürtünme kaybını minimize etmek için bu eğri kullanılabilir. Eğriyi analiz ederek, belirli hızlarda ve yükler altında optimum sürtünme katsayılarını belirlemek mümkündür. Bu da enerji tüketimini azaltabilir. Stribeck eğrisi, kaymalı yatakların enerji verimliliğini artırmak için de kullanılabilir. Dolayısıyla doğru yatak tasarımı ve performansının sağlanması, endüstride üretim maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olabilir. Optimum performans ve enerji verimliliği, işletmelerin rekabetçiliğini artırabilir. Bu tez çalışmasında elde edilecek deney sonuçlarıyla bu eğrinin tanımının özellikle ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu eğrinin elde edilmesi için farklı hız parametrelerinde deneyler önceliklendirilecektir. Sonuç olarak, kaymalı yataklarda Stribeck eğrisi, endüstride yatak tasarımı, performans optimizasyonu, enerji verimliliği, bakım yönetimi ve üretim maliyetlerinin azaltılması gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. Bu eğri, mühendislerin ve endüstri

uzmanlarının kaymalı yatakların performansını değerlendirmesi ve iyileştirmesi için değerli bir araçtır. (Budynas ve Nisbett, 2015)

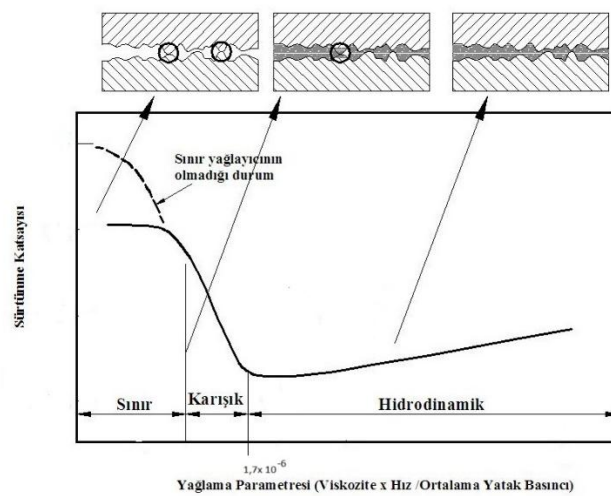
Bu eğrideki 1.7×10^{-6} noktası kritik öneme sahip veriyi belirlemekle birlikte bu noktanın sağı kararlı yağlama bölgesini sol tarafı ise kararsız yağlama bölgesini gösterir. Grafiğin sağ tarafında yani kararlı bölgede Petroff denklemi (1) geçerli olup (f: sürtünme katsayısı; μ : vizkozite; N: devir; P: yatak basıncı; r: yarıçap; c: radyal boşluk) bilgilerini kapsamaktadır.

$$f = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\mu \cdot N}{P} \cdot \frac{r}{c} \quad (1)$$

Bu denklemdeki (P: yatak basıncı) ise (2) numaralı denklem ile ifade edilebilmektedir. Bu denklemde de (r: yarıçap; L: yatak boyu; F: yatağa etkiyen yük) ifadelerini karşılamaktadır. Radyal boşluk ise eksantrisite ve minimum film kalınlığının toplamı ile (3) numaralı eşitlik vasıtasıyla belirlenebilmektedir. Formül içeriği (h_0 : minimum film kalınlığı; e: eksantrisite) verilerini temsil etmektedir. (McKee ve McKee, 1932)

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{2rL} \quad (2)$$

$$c = h_0 + e \quad (3)$$



Şekil 1.4. Stribeck eğrisi bölgeleri

Stribeck eğrisi sınır yağlama bölgesi, karışık yağlama bölgesi ve hidrodinamik yağlama bölgesi olmak üzere üç bölgeden oluşur. (Şekil 1.4)

1.1.1.Sınır yağlama bölgesi

Bu bölge, yatak yüzeyleri arasında tam bir yağ filmi oluşmadığında ortaya çıkar. Metal yüzeyler birbirine temas eder ve yüzey pürüzleri arasında fiziksel sürtünme meydana gelir. Yağlayıcı viskozitesinin düşük olduğu durumlarda veya mil hızı çok düşük olduğunda görülür. Sürtünme, genellikle yüzeylerin malzeme özellikleri ve kullanılan yağlayıcının katkı maddeleri (örneğin, aşınma önleyici katkıları) tarafından belirlenir. Makinenin ilk çalıştırılması sırasında ve yüksek temas basıncı ve düşük hız koşullarında görülür. (Stachowiak ve Batchelor, 2014) (Hamrock ve diğ. 2004) (Baş, 2022) (Adatepe ve diğ. 2012)

1.1.2.Karışık yağlama bölgesi

Sürtünme hem yüzeyler arasındaki doğrudan temas hem de yağ filmi tarafından taşınan yükün kombinasyonu ile belirlenir. Yüzey pürüzleri arasındaki temas azalır, ancak tamamen ortadan kalkmaz. Sürtünme katsayısı bu bölgede hızla azalır. Yağlayıcının viskozitesinin ve yatak yüzey pürüzlülüğünün etkisi büyüktür. Düşükten orta seviyeye hız geçişlerinde ve yüklerin ani değiştiği durumlarda (örneğin, titreşimli yükler) görülür. (Stachowiak ve Batchelor, 2014) (Hamrock ve diğ. 2004) (Baş, 2022) (Adatepe ve diğ. 2012)

1.1.3.Hidrodinamik yağlama bölgesi

Yeterli hız ve yağlayıcı viskozitesinin etkisiyle metal yüzeyler tamamen ayrılır. Yağ filmi yükü taşır ve yüzeyler arasındaki tüm fiziksel temas ortadan kalkar. Sürtünme katsayısı, sadece yağlayıcı viskozitesine ve mil hızına bağlıdır. Bu bölge, yatakların en verimli çalıştığı bölgedir. Sabit hızda çalışan makineler ve yüksek viskoziteli yağların tercih edildiği uygulamalarda görülür. (Stachowiak ve Batchelor, 2014) (Hamrock ve diğ. 2004) (Baş, 2022) (Adatepe ve diğ. 2012)

2. MATERYAL VE YÖNTEM

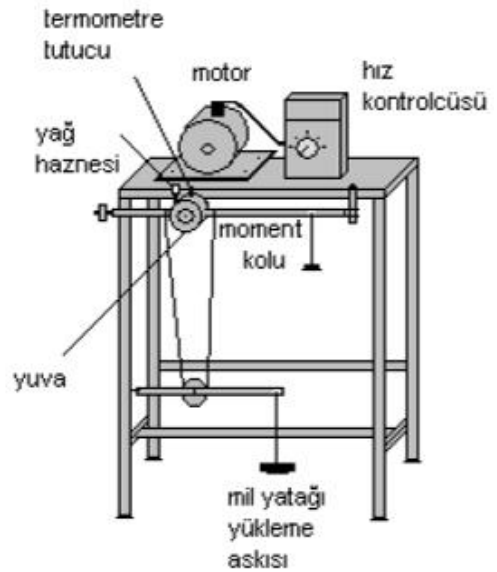
2.1. Deneysel Tertibat

Bu çalışmada yapılması planlanan deneylerin Şekil 2.1’de fotoğraf ve şematik görseli paylaşılan ve bölümümüz atölyesinde bulunan PA Hilton Journal Friction Apparatus HFN 5 isimli kaymalı yatak test cihazında yapılması planlanmaktadır. Ayrıca ilgili deney düzeneğine ait Şekil 2.2’de bileşen odaklı açıklama yapılarak hangi makine parçalarından oluşturulduğu bilgisi paylaşılmıştır.

Bu test cihazında düz bir masa üzerine bir motor ve hız kontrolcüsü yerleştirilmiştir. Masanın alt kısmında ise iki rulmanın taşıdığı mil bulunur. Bu milin ucunda yatak burcunu taşıyan ve bir moment kolunun bağlı olduğu yuva mevcuttur. Moment kolunu dengelemek için de bir yük, kolun sol tarafına asılmıştır. Moment kolu üzerinde mil ekseninden 300 mm uzakta ise yük askısı bulunmaktadır. Kayış kullanılarak motordaki hareket mile aktarılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.1. PA Hilton Journal Friction Apparatus HFN 5 kaymalı yatak test cihazı; a) Fotoğraf, b) Şematik

Yuvada bulunan çıkarılabilir metal halka, gerektiğinde mil yatağı burçlarının değiştirilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca yuvanın üzerinde mil yatağındaki burcun yağlanmasını sağlayan bir yağ haznesi barındırmaktadır. Yuvaya düşey yük uygulamak için metal teller ve 4:1 oranında çalışan kaldıraç sistemi kullanılmaktadır. Bu kaldıraç sisteminin destek noktası masanın ayaklarından birine bağlıdır. Bu sistem yuvaya kendi ağırlığından dolayı 55 N yük uygulamaktadır.

Yatak yükü, tel kablo çevrimiyle ve 4/1 oranında kol sistemi ile uygulanır. Aparatın kendi ağırlığı minimum olup gövdeye 55 N'luk bir yük uygular. Yatak burcuna gelen yük etkisi (4) numaralı denklem ile hesaplanabilir. Denklem içeriğinde ise (F_i : askıya asılan yük; F_n : yatak burcuna etkiyen yük) verileri tanımlanmaktadır.

$$F_n = 4.F_i + 55 \quad (4)$$



Şekil 2.2. Deney tertibatı elemanlarına ait detaylar; Yatak burcu (1), Elektronik takometre (2), Hız kontrol sistemiyle hızı değiştirilebilir elektrik motoru (3), Moment kolu (4), Denge ağırlıkları askısı (5), Yük kolu ve askısı (6), 40 mm çaplı çelik mıyılı (7) ve içine termokupl ucu yerleştirilen vida (8).

Deney cihazındaki dengeleme kolu burçtan 300 mm uzakta bulunan denge askısına yük asılarak dengelenir. Bu askıdaki yük ile sürtünme momenti ve ardından da sürtünme katsayısı bulunabilir. Sürtünme momenti (5) numaralı, sürtünme katsayısı ise (6) numaralı denklem ile bulunabilmektedir. İlgili denklemlerde ise (F_d : denge koluna asılan yük bilgisini, M_s : sürtünme momentini; r : burç yarıçapını) temsil etmektedir.

$$M_s = 300.F_d \quad (5)$$

$$f = \frac{M_s}{r.F_n} \quad (6)$$

Kaymalı yatak burçları yüksek basma ve yorulma mukavemeti, düşük aşınma ve yüksek korozyon dayanımına sahip malzemelerden yapılmaktadır. Piyasada bronz yatak burçları daha çok kullanılmaktadır. Bu çalışmada RG-5 (Tablo 2.1) ve CuSn12 (Tablo 2.2) bronzlarının kullanılması öngörülmektedir. Tedarikçiler vasıtasıyla temin edilecek bronz boruların test cihazına uygun ölçülerde işlenmiş olması sağlanacaktır.

Tablo 2.1. RG-5 bronz özellikleri

Kimyasal Kompozisyon

C %	Ni %	P %	Pb %	Sn %	Zn %	Al %	Fe %	S %
Min. 83 Max. 87	Max. 2	Max. 0,1	Min. 4 Max. 6	Max. 0,01	Max. 0,3	Max. 0,1	Max. 0,25	Max. 0,01

Mekanik Özellikleri

Sertlik HB	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama %	Sertlik (HBW)
Sürekli Döküm	250	110	13	65
Santifirüj Döküm	250	110	13	65

Fiziksel Özellikleri

Yoğunluk (kg/dm ³)	Öz Isı (J/(gr.K))	Termal Genleşme (10-6k)	Termal İletkenlik (W/(m.K))	Elektriksel İletkenlik (Ω mm ² /m)
8,8	0,373	18,2	71	8,5

Tablo 2.2. CuSn12 bronz özellikleri

Kimyasal Kompozisyon

Cu %	Ni %	P %	Pb %	Sn %	Zn %	Al %	Fe %	Mn %	S %	Sb %	Si %
Min. 88 Max. 88,5	Max. 2	Max. 0,6	Max. 0,07	Min. 11 Max. 13	Max. 0,5	Max. 0,01	Max. 0,2	Max. 0,02	Max. 0,05	Max. 0,15	Max. 0,01

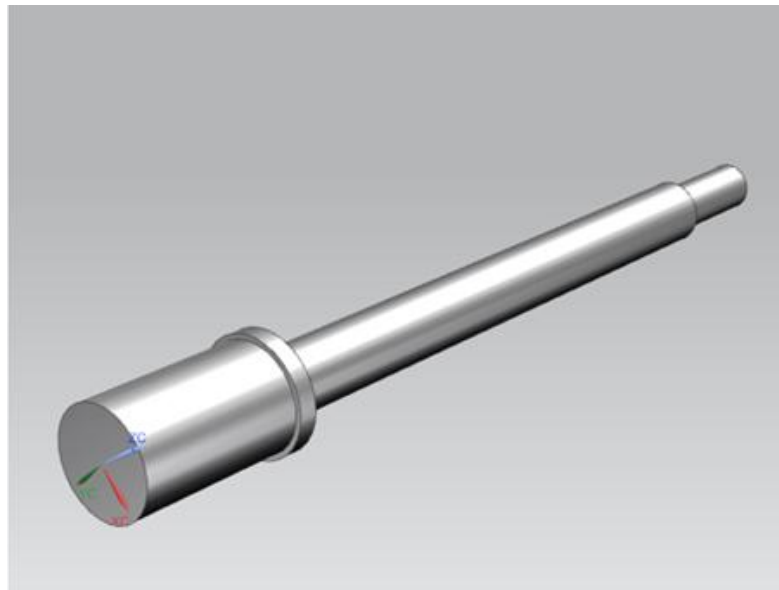
Mekanik Özellikleri

Sertlik HB	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama %	Sertlik (HBW)
Sürekli Döküm	300	150	6	90
Santifirüj Döküm	280	150	5	90

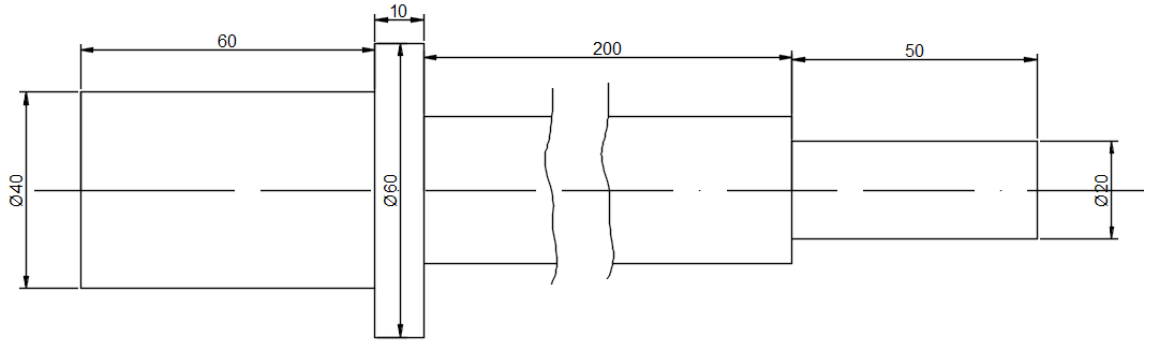
Fiziksel Özellikleri

Yoğunluk (kg/dm ³)	Öz Isı (J/(gr.K))	Termal Genleşme (10-6k)	Termal İletkenlik (W/(m.K))	Elektriksel İletkenlik (Ω mm ² /m)
8,6	0,376	18,5	54	6,2

Deney cihazında kullanılacak olan mil (Şekil 2.3) malzemesi 4140 (42CrMo4) çeliğinden üretilmiş kademeli bir mildir. Burcun çalışacağı bölümün çapı 40 mm olması yanında iki adet yatak ile deney cihazına bağlanmalıdır. Motordan gelen hareket kayış kassak mekanizması ile mile aktarılmaktadır. (Şekil 2.4)



Şekil 2.3. Mil malzemesi 3B görseli.

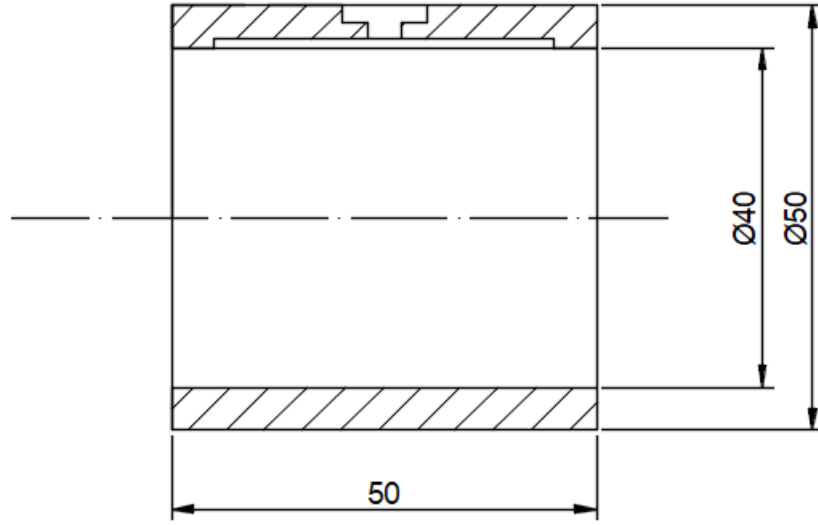


Şekil 2.4. Mil malzemesi 2B görseli.

Burçlar (Şekil 2.5) ise 40 mm iç çapa ve 50 mm dış çapa sahip olması sağlanacaktır. (Şekil 2.6)



Şekil 2.5. Burç malzemesi 3B görseli.



Şekil 2.6. Burç malzemesi 2B görseli.

2.2.Deneysel Parametreler

Tez çalışmasında kullanılacak yağlayıcıların kaymalı yatakların optimum şekilde çalışması için çok büyük önem arz ettiği bilinmekle birlikte bu çalışmada farklı yağların denenmesi amacının yanı sıra bitkisel yağların kaymalı yataklarda yağlayıcı alternatifi oluşturup oluşturamayacağı da özellikle sorgulanmıştır.

Bu çalışma kapsamında ise Eneos marka 5W30 ve 15W40 madensel yağlarının yanında soya, aspir, ay çekirdeği, mısır ve zeytin yağı gibi bitkisel yağlar ve bunlara ek olarak yağların farklı konsantrasyonda (%10, 20 ve 30) karışımlarının özellikle incelenmesi sağlanmıştır. Yağların karıştırılması, maliyeti düşürme amacı güderek yapılmış ve maliyet azalması ile birlikte performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Ayrıca bu yağlayıcıların endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi için gerekli testlerin yapılmasına ve potansiyel olarak daha geniş bir kullanım alanının keşfedilmesine öncülük edecektir.

Deneylerde yük koluna 0, 20, 40 ve 60 N yükleri asılarak bunların yatağa etkisinin belirlenmesinde (1) numaralı denklem ile sırasıyla hesaplanan 55, 135, 215 ve 295 N değerlerine ulaşılmıştır.

Yapılan deneylerde 90, 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1020, 1200, 1350 ve 1500 dev/dk hızları kullanılmıştır. Bu hızların Stribeck eğrisinin elde edilmesine olanak tanımanın yanı sıra endüstride kullanılan çeşitli makinelerin performansının test edilmesi için de bir fırsat sunması üzerine durulmuştur.

Özellikle enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından üstün olan bitkisel yağlayıcılar gibi alternatiflerin de geleneksel yağlayıcılara kıyasla avantajlarını ve performansını değerlendirmek, bu hız parametrelerinin önemli bir parçasını oluşturacaktır.

Her bir durum için testlerde bir saatlik zaman dilimleri sonrasına ait sonuçlar elde edilmiş olup her deney için 10 dakikada bir sıcaklık ölçümü sağlanarak minimum 3 tekrar verisi kullanılmıştır.

2.3. Stribeck Eğrisinin Elde Edilmesi

Stribeck eğrisi kaymalı yatakların tasarımı ve performansının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir grafiktir. Bu eğri, yatakların sürtünme davranışını, yağlama durumu ve hız gibi parametrelere bağlı olarak gösterir. Eğrinin sol tarafı, kuru sürtünme koşullarını temsil eder, yani sistemde henüz yağlayıcı kullanılmadığı durumu temsil eder. Bu noktayı elde etmek için, kuru sürtünme katsayısına ihtiyaç vardır. Bu nokta kuru sürtünme ortamında yapılan deney ile bulunur. Eğrinin devamında, sisteme yavaş yavaş yağlayıcı eklenir ve sürtünme katsayısındaki değişim gözlemlenir. Her bir anda, sürtünme katsayısı ile yağlama parametresi eşleştirilerek Stribeck eğrisi oluşturulur.

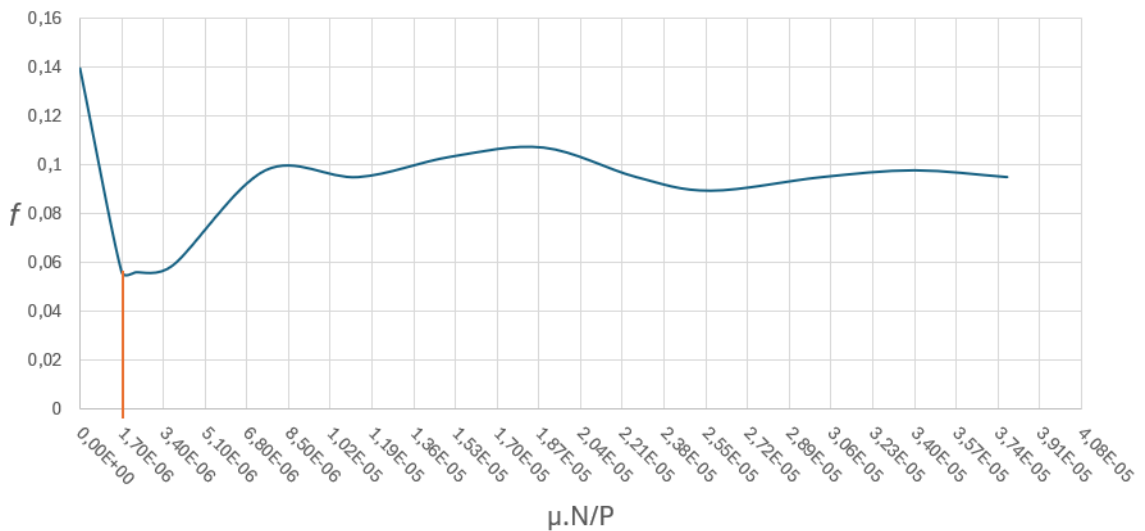
3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Stribeck Eğrilerinin Elde Edilmesi

Öncelikle kuru sürtünme durumundaki sürtünme katsayısı bulunarak eğrinin ilk verisi elde edilir. Ardından yağlayıcı yavaşça eklenir ve yağlayıcılı durumda hız ve yük verisi değiştirilerek farklı yağlama parametrelerindeki sürtünme katsayısı elde edilir. Bu veriler grafiğe dökülerek stribeck eğrisi elde edilmiş olur.

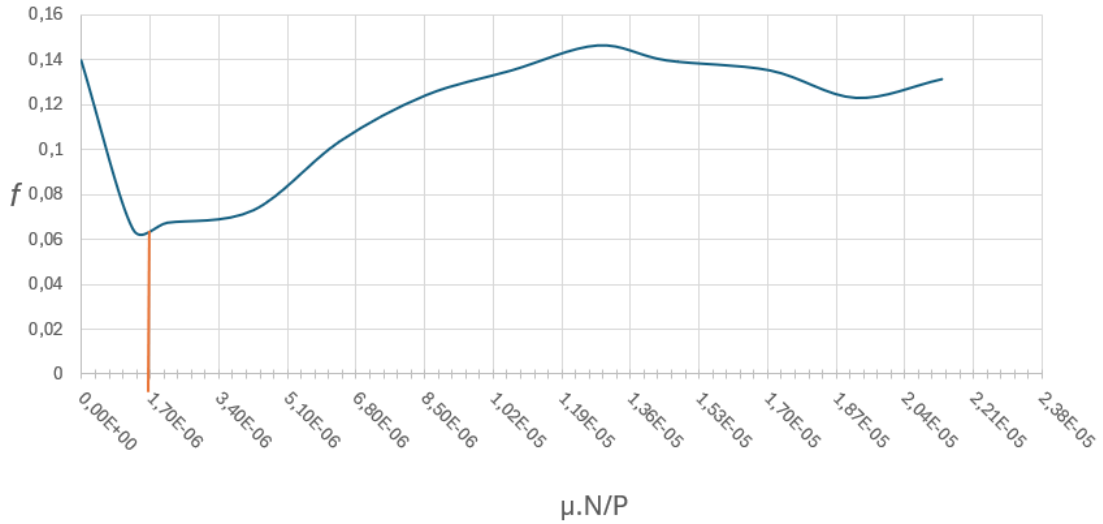
RG-5 malzemedeki stribeck eğrileri Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 da verilmiştir. Deney sonuçları ideal eğriye yakın sonuçlar vermiş olup kritik 1.7×10^{-6} noktası grafik üzerinde işaretlenmiştir.

Rg- 5 malzemede 5W30 yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.1) sınır yağlama bölgesinde sürtünme katsayısı (f) çok yüksektir, çünkü yağ filmi ince olduğundan yüzeyler arasındaki temas fazladır. Grafikte bu bölgede sürtünme katsayısının hızlı bir şekilde azaldığı görülmektedir. Karışık yağlama bölgesinde ise yağ filmi kalınlaşmaya başlar, yüzey temasları azalır ve sürtünme katsayısı düşer. Grafikte bu bölge 2×10^{-6} - 1×10^{-5} aralığında gözlemleniyor. Sürtünme katsayısında hafif artış ve dalgalanma söz konusudur. Bu bölge hidrokinematik yağlama bölgesinde ise yağ filmi tamamen yüzeyler arasını kaplar, yüzeyler doğrudan temas etmez. Grafikte sürtünme katsayısı yüksek $\mu.N/P$ değerlerinde sabitlenmiş ve hafif bir artış eğilimi göstermiştir.



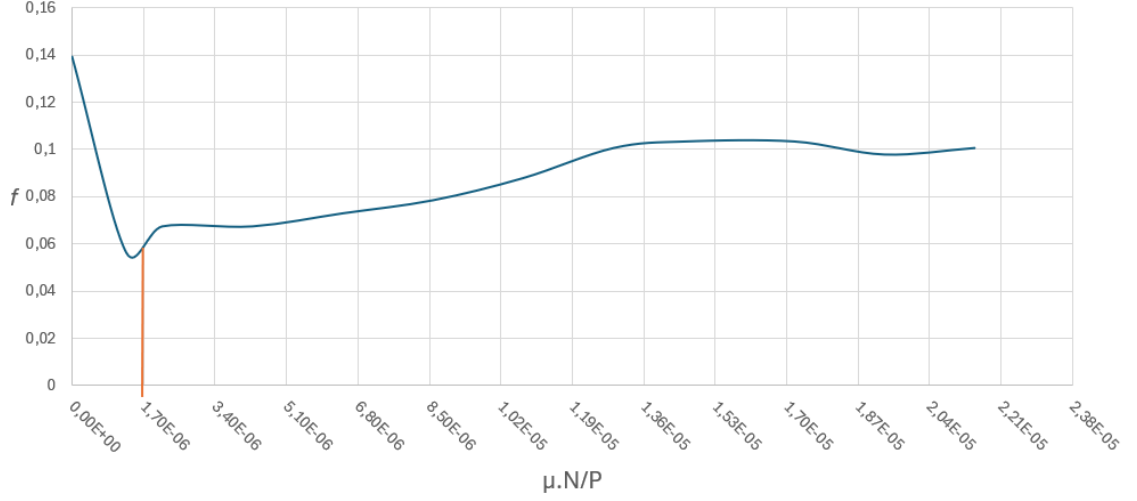
Şekil 3.1. RG-5 malzeme 5W30 yağı için stribeck eğrisi

Rg- 5 malzemede soya yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.2) sınır yağlama bölgesinde soya yağı daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Karışık yağlama bölgesinde soya yağının performansı nispeten artar ancak plato sonrası sürtünme artışı gözlenir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde ise soya yağı başarılı bir şekilde hidrodinamik yağlama rejimini sağlayarak düşük sürtünme katsayısında stabil performans sergiler.



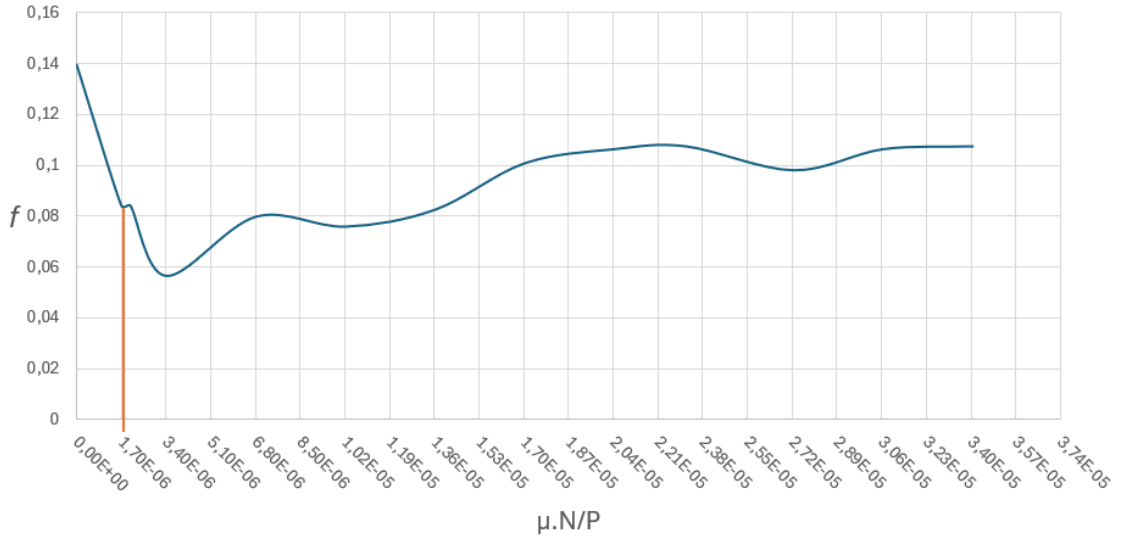
Şekil 3.2. RG-5 malzeme soya yağı için stribeck eğrisi

Rg- 5 malzemede aspir yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.3) sınır yağlama bölgesinde aspir yağı başlangıçta daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ancak hızlı bir iyileşme gösterir. Karışık yağlama bölgesinde aspir yağı, stabil performansı ile yüzey temasını azaltır. Hidrodinamik yağlama bölgesinde aspir yağı, hidrodinamik yağlama rejimini başarıyla sağlar ve düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar.



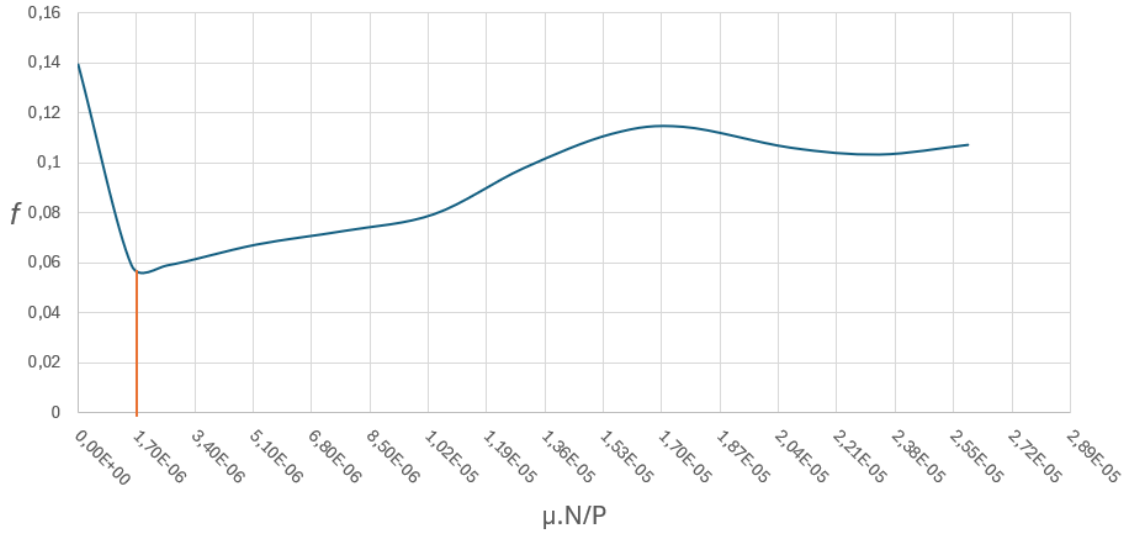
Şekil 3.3. RG-5 malzeme aspir yağı için stribek eğrisi

Rg- 5 malzemede ay çekirdeği yağı için stribek eğrisini incelersek (Şekil 3.4) sınır yağlama bölgesinde ay çekirdeği yağının sınır yağlama performansı zayıftır, ancak sürtünme katsayısında hızlı bir düşüş görülmektedir. Karışık yağlama bölgesinde yağ filmi oluşmaya başlamış, yüzey temasları azalmıştır. Bu bölgede sürtünme katsayısı hafif dalgalanmalar göstermektedir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde yüksek $\mu.N/P$ değerlerinde yağ filmi yüzeyleri tamamen ayırarak düşük sürtünme katsayısını korumuştur.



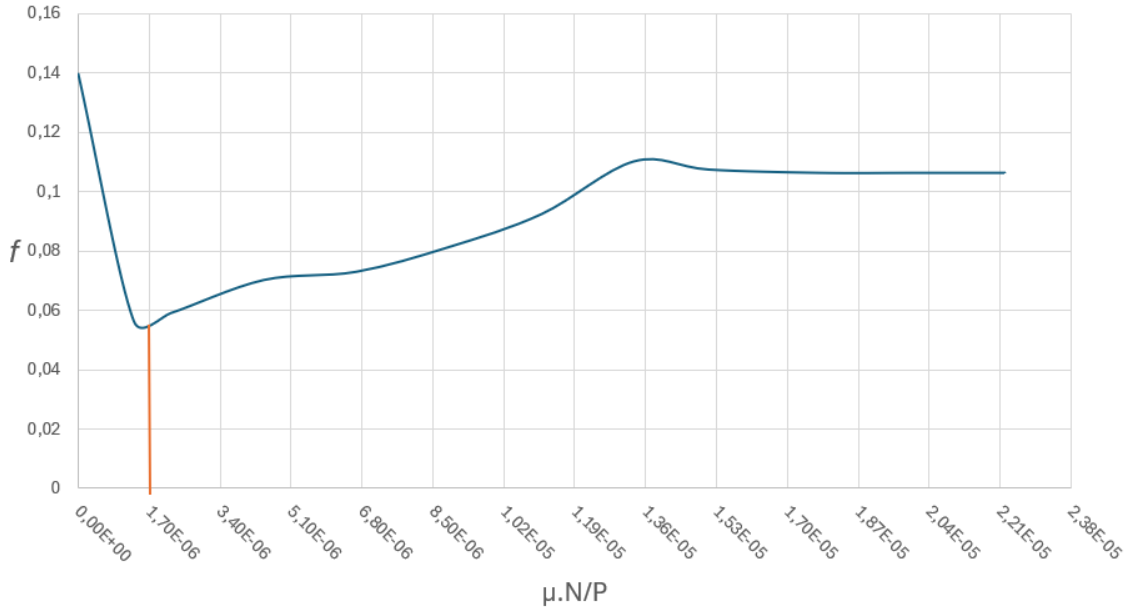
Şekil 3.4. RG-5 malzeme ay çekirdeği yağı için stribek eğrisi

Rg- 5 malzemede zeytin yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.5) sınır yağlama bölgesi zeytin yağı başlangıçta yüzey temasına bağlı olarak yüksek sürtünme katsayısı göstermektedir. Karışık yağlama bölgesinde stabil performans gösterirken hafif bir artış eğilimi gözlenmiştir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde zeytin yağı, yüksek hızlarda yağ filmi oluşturarak düşük sürtünme katsayısını korumuş ve enerji verimliliği sağlamıştır.



Şekil 3.5. RG-5 malzeme zeytin yağı için stribeck eğrisi

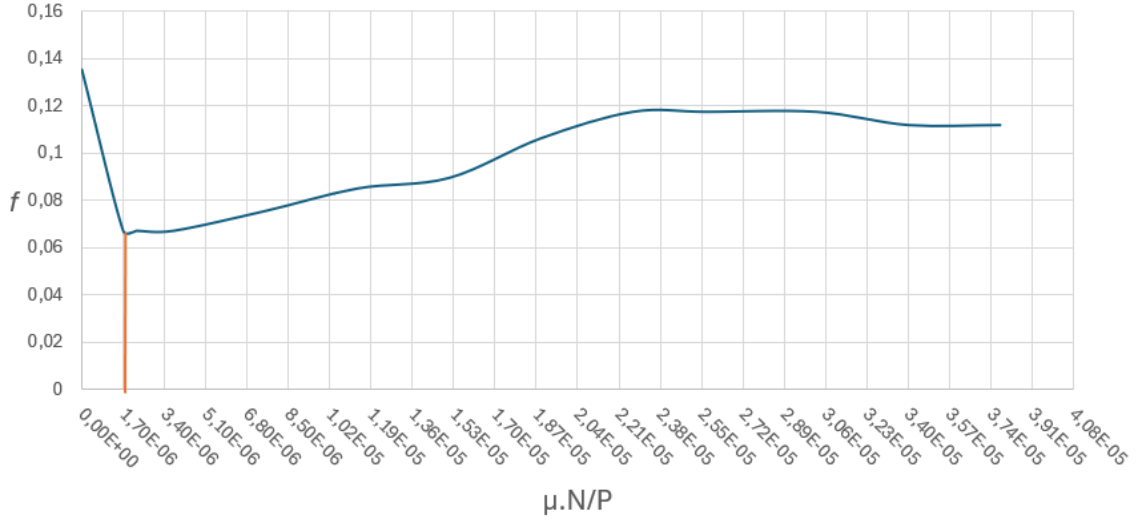
Rg- 5 malzemede mısır yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.6) sınır yağlama bölgesinde mısır yağı başlangıçta yüksek sürtünme gösterir ancak hızla iyileşir. Karışık yağlama bölgesinde stabil performans göstermektedir, ancak hafif artış eğilimi dikkat çekicidir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde mısır yağı, yüksek hızlarda yüzeyleri tamamen ayırarak düşük sürtünme katsayısıyla etkili performans sağlamaktadır.



Şekil 3.6. RG-5 malzeme mısır yağı için stribek eğrisi

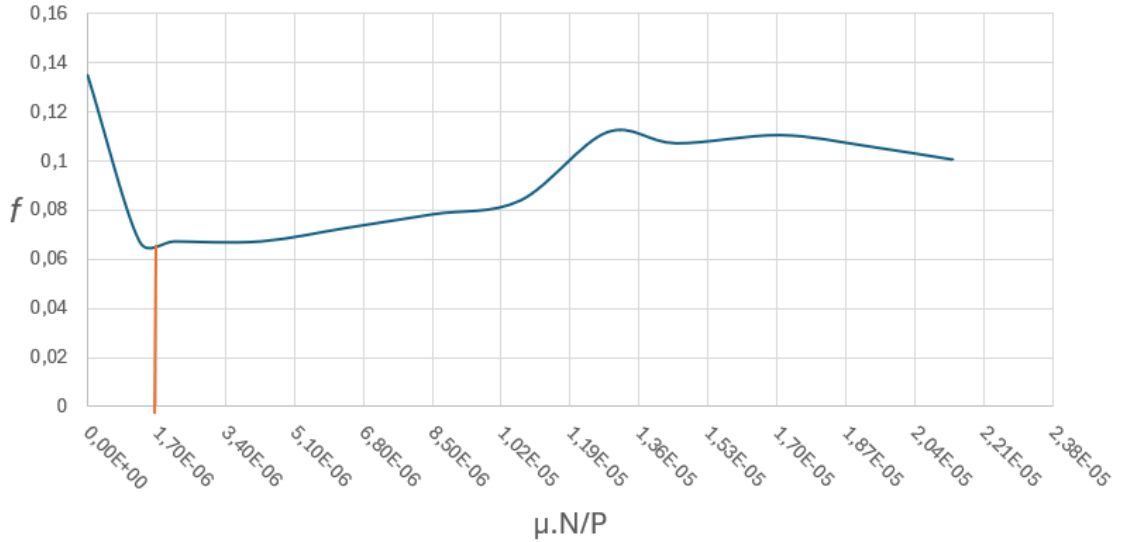
CuSn12 malzemedeki stribek eğrileri Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 de verilmiştir. Deney sonuçları ideal eğriye yakın sonuçlar vermiş olup kritik 1.7×10^{-6} noktası grafik üzerinde işaretlenmiştir.

CuSn12 malzemede 5W30 yağı için stribek eğrisini incelersek (Şekil 3.7) sınır yağlama bölgesinde 5W30 yağı başlangıçta yüksek sürtünme katsayısı sergilemektedir. Karışık yağlama bölgesinde stabil bir performans göstermekte, ancak plato sonrası hafif bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Hidrokinamik yağlama bölgesinde yüksek kayma hızlarında düşük ve stabil sürtünme katsayısıyla başarılı bir performans göstermektedir.



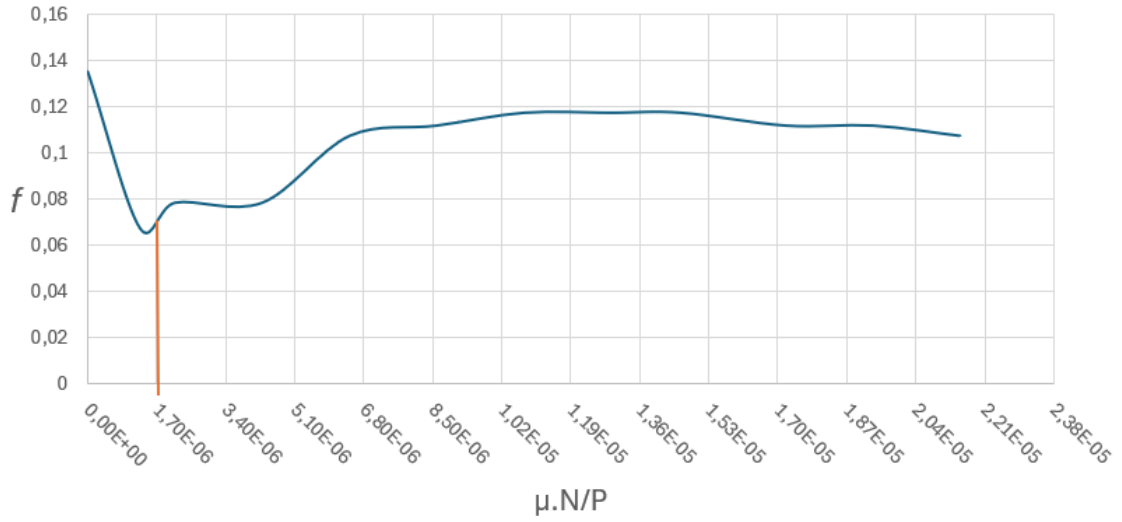
Şekil 3.7. CuSn12 malzeme 5W30 yağı için stribeck eğrisi

CuSn12 malzemede soya yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.8) sınır yağlama bölgesinde soya yağı başlangıçta yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ancak hızla iyileşmektedir. Karışık yağlama bölgesinde stabil performans sunarken hafif bir artış gözlenmiştir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde soya yağı, hidrodinamik yağlama rejiminde düşük sürtünme katsayısı ile enerji verimliliğini sağlamaktadır.



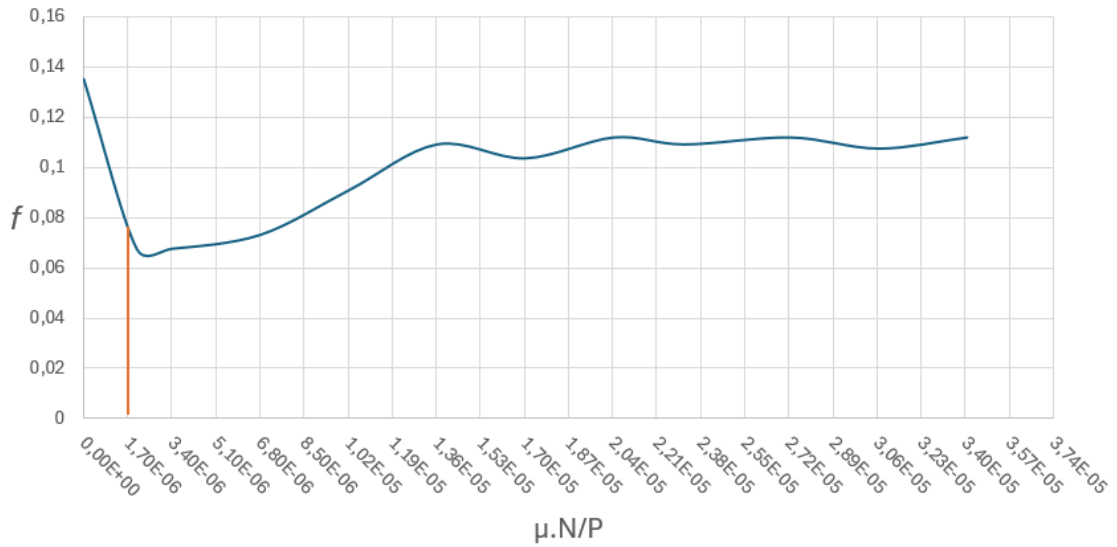
Şekil 3.8. CuSn12 malzeme soya yağı için stribeck eğrisi

CuSn12 malzemede aspir yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.9) sınır yağlama bölgesinde aspir yağı başlangıçta yüksek sürtünme katsayısı göstermekte, ancak hızlı bir düşüşle iyileşmektedir. Karışık yağlama bölgesinde stabil performans gösterirken plato eğilimi sergilemiştir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde yüksek hızlarda yağ filmi yüzeyleri tamamen ayırarak düşük sürtünme katsayısı sunmaktadır.



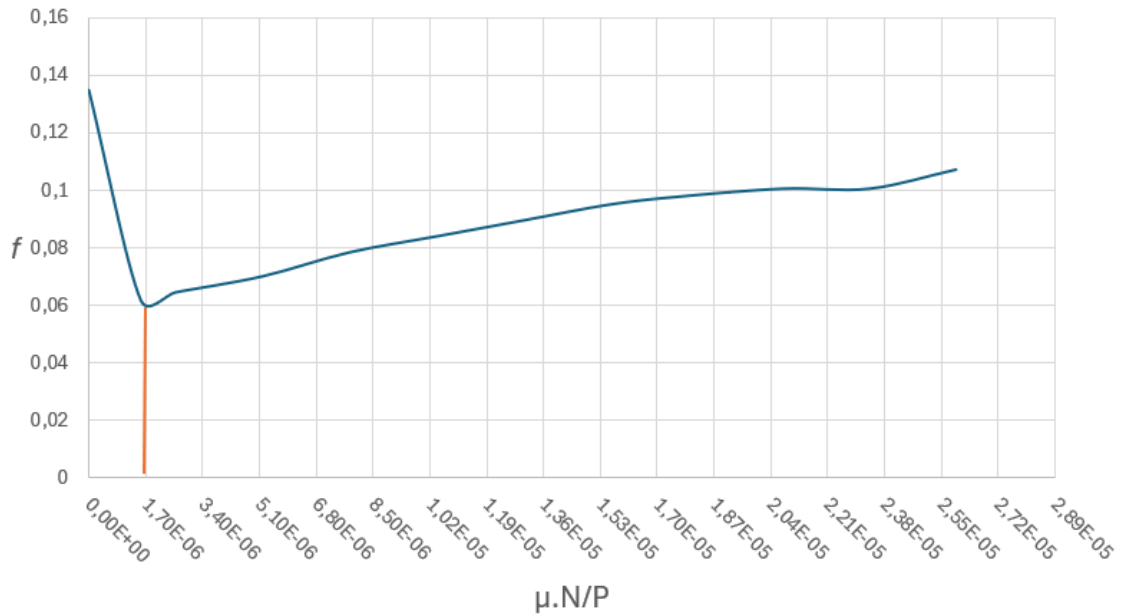
Şekil 3.9. CuSn12 malzeme aspir yağı için stribeck eğrisi

CuSn12 malzemede ay çekirdeği yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.10) sınır yağlama bölgesinde ay çekirdeği yağı başlangıçta yüksek sürtünme gösterse de hızlı bir iyileşme sağlamaktadır. Karışık yağlama bölgesinde stabil performans sunarken hafif dalgalanmalar gözlenmiştir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde yağ filmi yüzeyleri tamamen ayırarak düşük sürtünme katsayısıyla başarılı bir performans göstermektedir.



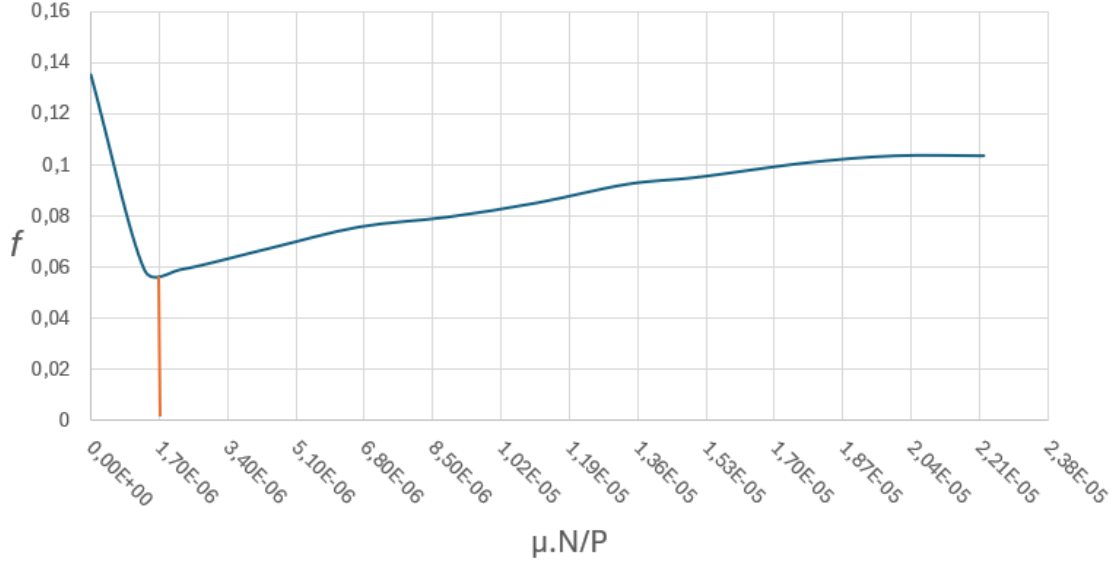
Şekil 3.10. CuSn12 malzeme ay çekirdeği yağı için stribek eğrisi

CuSn12 malzemede zeytin yağı için stribek eğrisini incelersek (Şekil 3.11) sınır yağlama bölgesinde zeytin yağı başlangıçta yüksek sürtünme katsayısı sergilemekte ancak hızlı iyileşme sağlamaktadır. Karışık yağlama bölgesinde stabil performans gösterse de hafif bir artış eğilimi dikkat çekmektedir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde zeytin yağı, yüzeyleri tamamen ayırarak düşük sürtünme katsayısı sağlamaktadır.



Şekil 3.11. CuSn12 malzeme zeytin yağı için stribek eğrisi

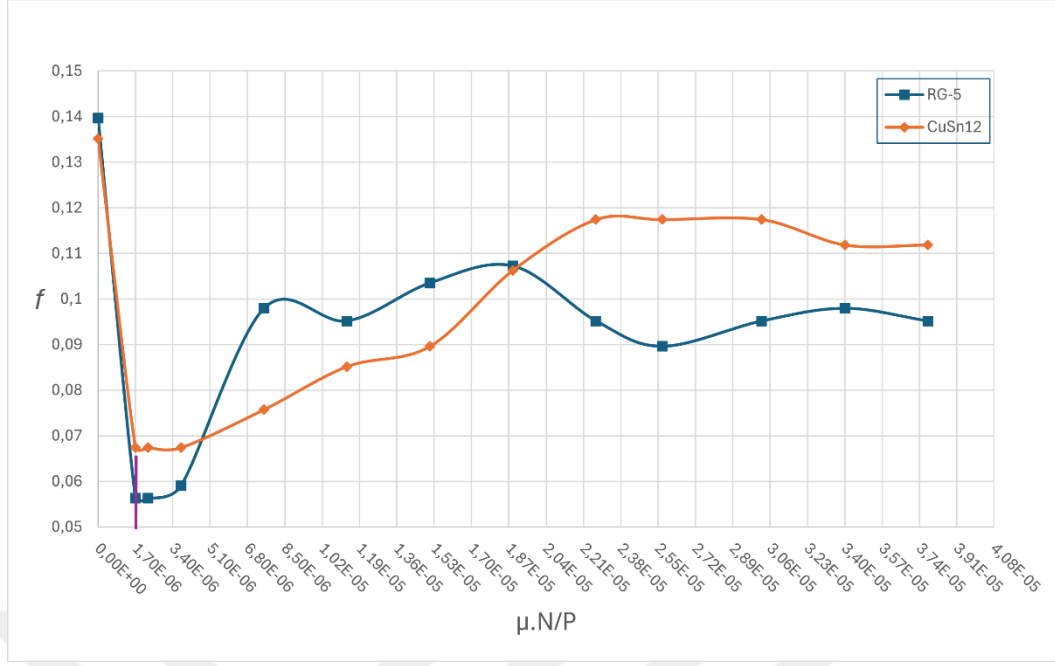
CuSn12 malzemede mısır yağı için stribeck eğrisini incelersek (Şekil 3.12) sınır yağlama bölgesi mısır yağı başlangıçta yüksek sürtünme değerine sahip olsa da hızlı iyileşme göstermektedir. Karışık yağlama bölgesinde stabil performans sergilense de hafif artış eğilimi gözlenmiştir. Hidrokinamik yağlama bölgesinde yağ filmi yüzeyleri tamamen ayırarak düşük sürtünme katsayısıyla etkili performans sağlamaktadır.



Şekil 3.12. CuSn12 malzeme mısır yağı için stribeck eğrisi

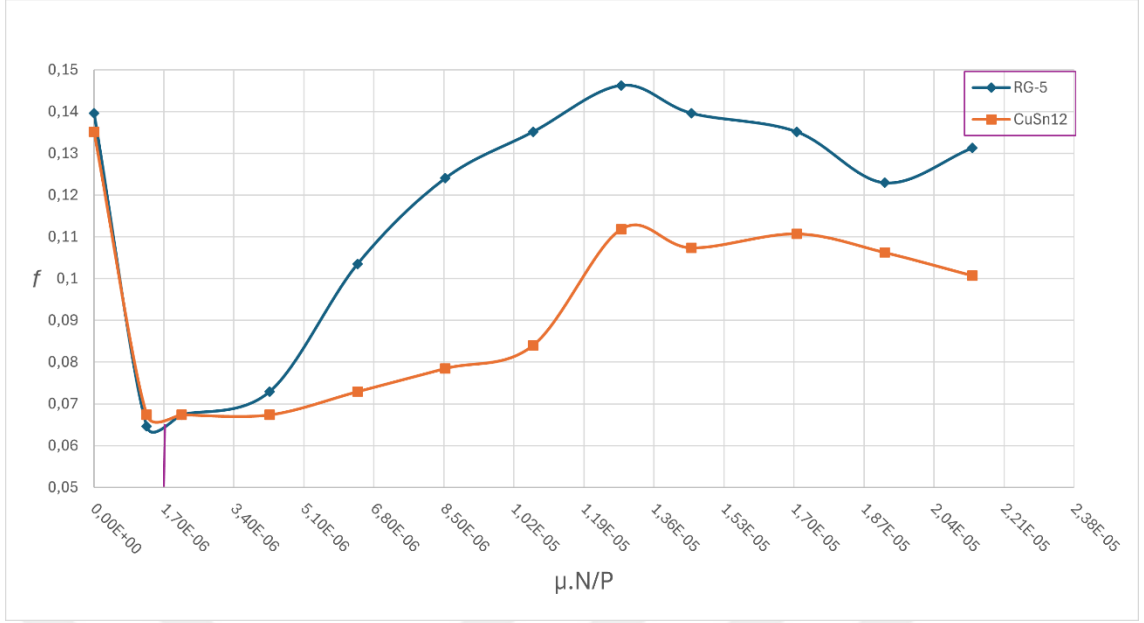
3.2. Stribeck Eğrilerinin Kıyaslanması

Stribeck eğrilerini 5W30 yağ için iki farklı malzemede kıyaslırsak (Şekil 3.13) RG-5 malzemesinde, düşük $(\mu.N)/P$ değerlerinde daha düşük bir sürtünme katsayısı elde ediliyor. Bu RG-5'in sınır yağlama koşullarında daha avantajlı olduğunu gösterir. CuSn12 malzemesi ise karışık yağlama bölümünde sürtünme katsayısında bir artış gösterdi, ancak hidrokinamik yağlama bölgesinde daha sabit bir sürtünme katsayısı elde edildi.



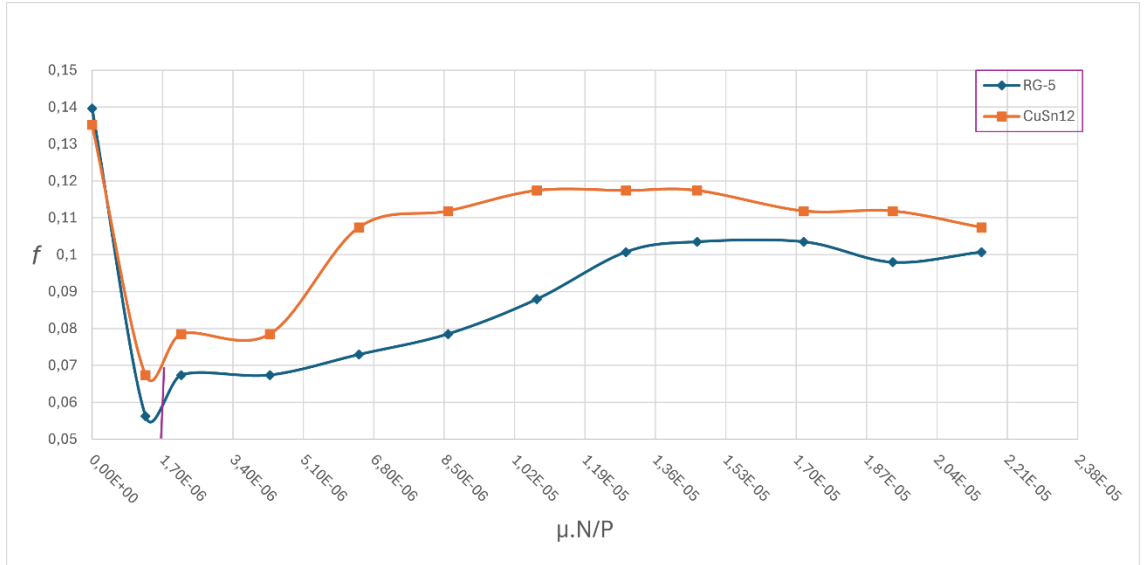
Şekil 3.13. 5W30 yağı için RG-5 ve CuSn12 malzemelerde stribek eğrisi

Eğrileri soya yağı için iki farklı malzemede kıyaslırsak (Şekil 3.14) RG-5 malzemesi sınır yağlama bölgesinde daha düşük bir sürtünme katsayısına sahip. Bu, RG-5'in sınır yağlama bölgesinde soya yağı ile iyi bir uyum sağladığını gösteriyor. CuSn12'nin sürtünme katsayısı başlangıçta RG-5'ten biraz daha yüksek, ancak iki malzeme de sınır yağlama bölgesinde benzerlik gösteriyor. RG-5, karışık yağlama bölgede sürtünme katsayısında artış gösteriyor. Bu, RG-5 ile soya yağı arasında karışık yağlama bölgesinde daha fazla temasın gerçekleştiğini gösterebilir. CuSn12 ise daha düşük bir sürtünme katsayısı ile daha dengeli bir performans sergiliyor. Bu durum, CuSn12'nin soya yağı ile karışık yağlama bölgesinde daha stabil bir davranış gösteriyor. RG-5'in hidrodinamik yağlama bölgesinde ise sürtünme katsayısında dalgalanmalar görülüyor. Bu durum, RG-5'in soya yağı ile yüksek hızlarda tam bir yağ filmi oluşturmakta zorlandığını gösterir. CuSn12'nin bu bölgede daha stabil bir performansa sahiptir. Bu, soya yağının CuSn12 ile daha iyi bir yağlama sağladığını gösterebilir.



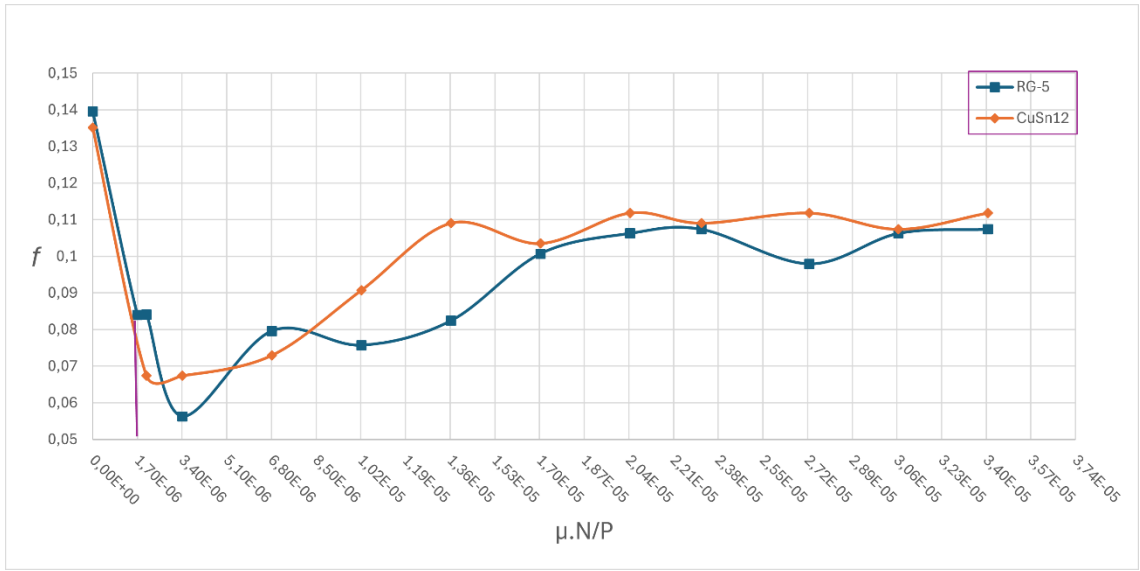
Şekil 3.14. Soya yağı için RG-5 ve CuSn12 malzemelerde stribek eğrisi

Eğrileri aspir yağı için iki farklı malzemede kıyaslırsak (Şekil 3.15) RG-5 malzemesi, sınır yağlama bölgesinde daha düşük sürtünme katsayısı gösteriyor, bu da bu malzemenin daha iyi bir başlangıç performansı sunduğunu gösteriyor. CuSn12 malzemesi ise hidrodinamik bölgeye geçişte daha yüksek sürtünme katsayısına sahip. Bu, RG-5'e kıyasla daha fazla enerji kaybı anlamına gelir. Her iki malzemenin hidrodinamik bölgede benzer sürtünme katsayılarına ulaştığı görülüyor.



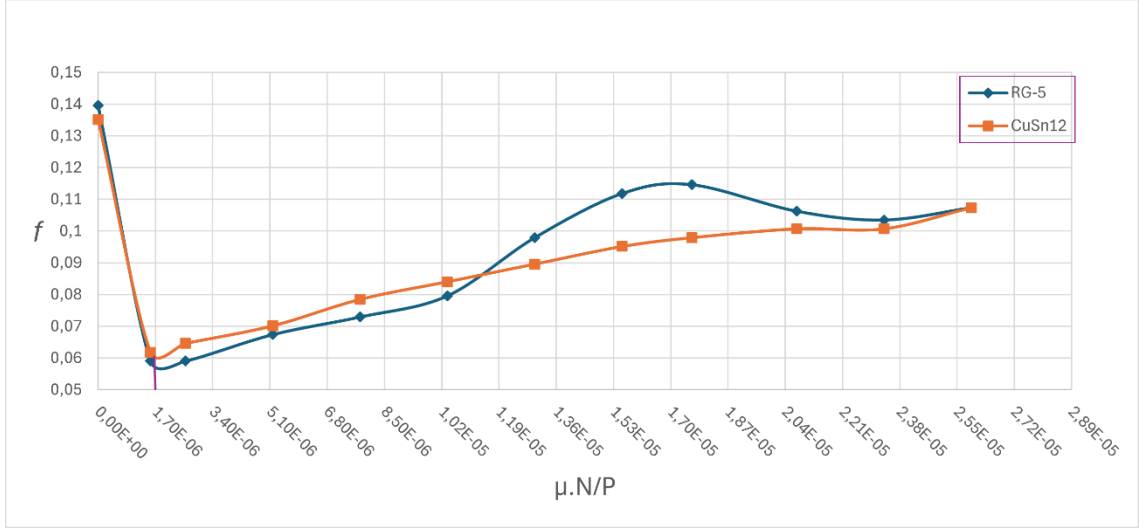
Şekil 3.15. Aspir yağı için RG-5 ve CuSn12 malzemelerde stribek eğrisi

Eğrileri ay çekirdeği yağı için iki farklı malzemede kıyaslırsak (Şekil 3.16) Ayçiçek yağı ile RG-5 malzemesi, sınır yağlama bölgesinde daha düşük bir sürtünme katsayısı gösteriyor. Bu da bu malzemenin ay çiçek yağıyla iyi bir başlama performansı elde ettiğini gösteriyor. CuSn12 malzemesi, karışık yağlama bölgesinde sürtünme katsayısında dalgalanmalar gösteriyor. Hidrodinamik bölgede ise her iki malzemenin sürtünme katsayılarının birbirine yakın olduğu gözlemleniyor.



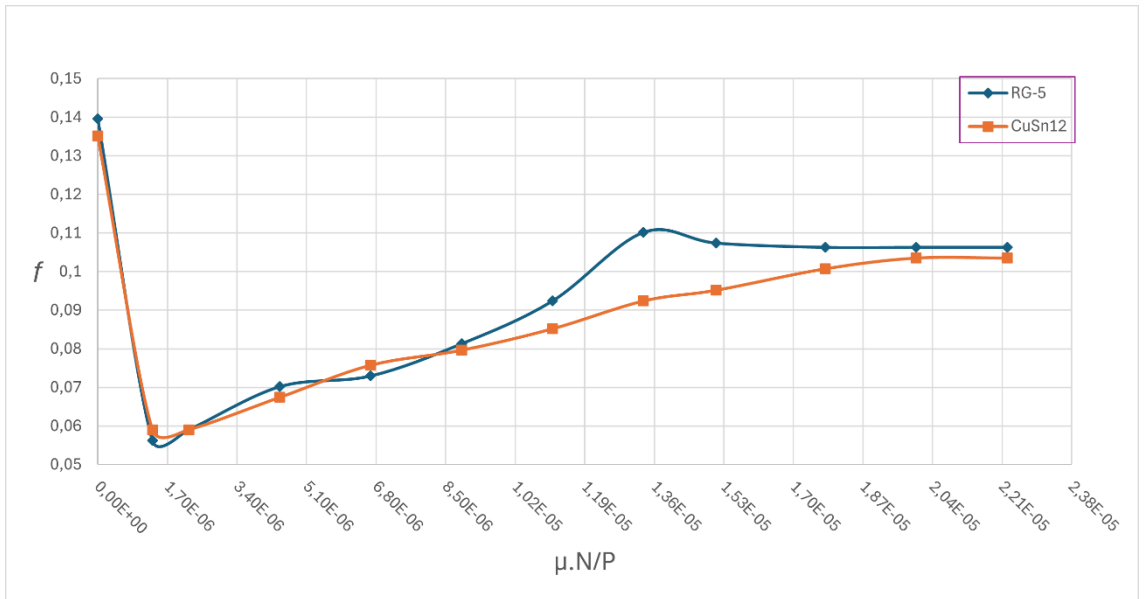
Şekil 3.16. Ay çekirdeği yağı için RG-5 ve CuSn12 malzemelerde stribeck eğrisi

Eğrileri zeytin yağı için iki farklı malzemede kıyaslırsak (Şekil 3.17) RG-5 malzemesi sınır yağlama bölgesinde CuSn12 ile benzer bir başlangıç performansı sergiliyor. Ancak karma yağlama bölgesinde sürtünme katsayısının daha yüksek bir seviyeye çıktığı ve hidrodinamik rejime geçişte daha zorlandığı gözlemleniyor. CuSn12 malzemesi ise karma yağlama bölgesinde daha düşük ve stabil bir sürtünme katsayısı sergiliyor. Bu, zeytinyağının bu malzeme için daha uygun bir yağlama etkisi sağladığını gösteriyor. Hidrodinamik bölgeye geçişi daha pürüzsüz.



Şekil 3.17. Zeytin yağı için RG-5 ve CuSn12 malzemelerde stribek eğrisi

Eğrileri mısır yağı için iki farklı malzemede kıyaslırsak (Şekil 3.18) RG-5 Malzemesi sınır yağlama bölgesinde CuSn12'ye göre biraz daha düşük bir sürtünme katsayısına sahip. Karma yağlama bölgesinde ise sürtünme katsayısında belirgin bir artış ve dalgalanma görülüyor. Bu, mısır yağının RG-5 malzemesi ile tam bir yağ filmi oluşturmada zorlandığını gösterebilir. CuSn12 malzemesi ise daha düşük sürtünme katsayısı ile karma yağlama bölgesinde daha stabil bir performans sergiliyor. Mısır yağının bu malzeme ile uyumlu bir yağlama sağladığı ve hidrodinamik bölgede daha pürüzsüz bir geçiş sağladığı söylenebilir.



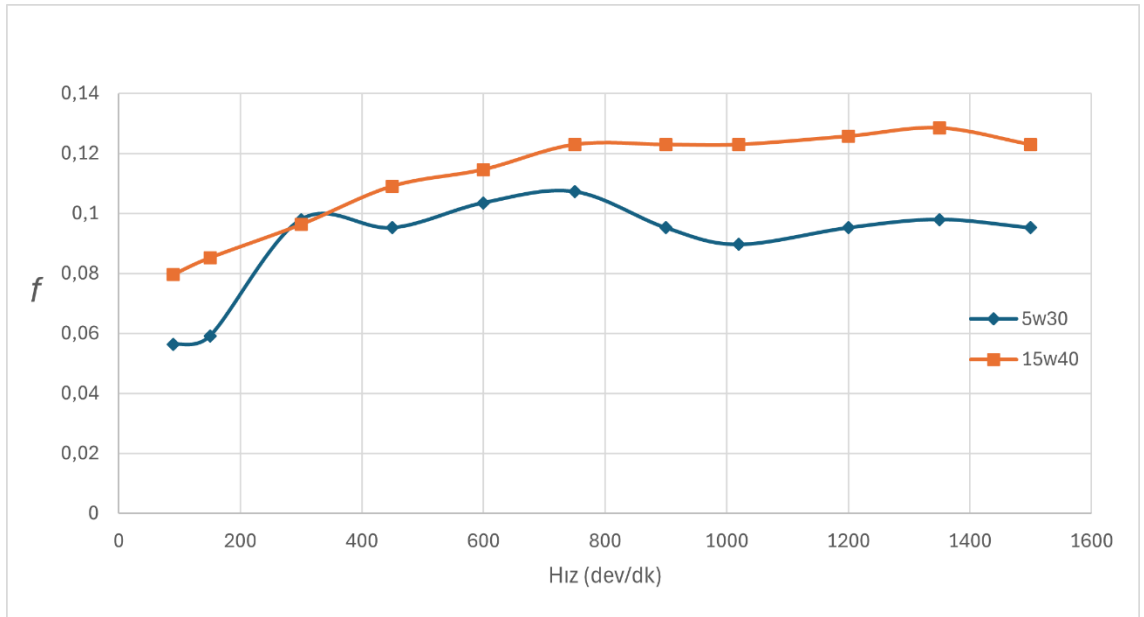
Şekil 3.18. Mısır yağı için RG-5 ve CuSn12 malzemelerde stribek eğrisi

3.3. Sürtünme Katsayısı- Hız Grafikleri

Sürtünme katsayısı hız grafikleri RG-5 ve CuSn 12 yatak malzemesinde farklı yağlayıcılar ile çizilmiş olup birbirleriyle kıyaslanmıştır. Ardından aynı yağlayıcıda iki farklı yatak malzemesine ait sürtünme katsayısı hız grafikleri çizilip birbiriyle kıyaslanmıştır.

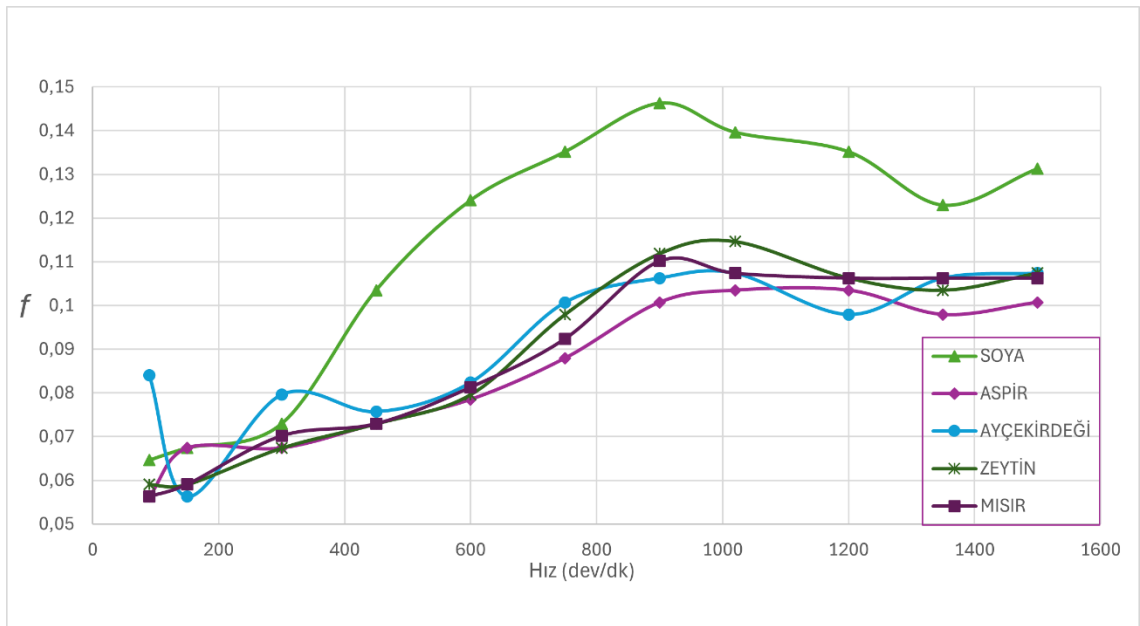
3.3.1. RG-5 yatak malzemesinde yağların kıyaslanması

Öncelikli olarak iki madensel yağ olan 5w40 ve 15w40 yağlarını kıyaslarsak (Şekil 3.19) düşük hızlarda 5W30, düşük viskozitesi sayesinde daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir ve düşük hızlarda daha iyi yağlama sağlar. Orta hızlarda her iki yağın da sürtünme katsayısı artmaktadır, ancak 5W30 daha iyi performans sergiliyor. Yüksek hızlarda ise 5W30, düşük sürtünme katsayısıyla hidrodinamik rejimde daha avantajlı bir performans sunuyor. 15W40 ise daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahiptir. Sonuç olarak 5W30 yağı, düşük ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu için RG-5 malzemesi üzerinde daha iyi bir performans gösteriyor. 15W40 yağı ise daha yüksek viskozitesi nedeniyle düşük hızlarda dezavantajlıdır, ancak bu yağ daha yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda daha etkili olabilir.



Şekil 3.19. RG-5 malzemesinde 5W30 ve 15w40 yağın kıyaslanması

RG-5 yatak malzemesinde bitkisel yağları kıyaslarsak (Şekil 3.20) düşük hızlarda en iyi performansı mısır yağı ve zeytin yağı sergiliyor. Soya yağı bu bölgede dezavantajlı. Orta hızlarda aspir yağı ve ay çiçek yağı avantajlı, soya yağı ise yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle dezavantajlı. Yüksek hızlarda ise tüm yağlar benzer seviyelere yaklaşmış, ancak soya yağı yine biraz daha yüksek sürtünme katsayısına sahip. Genel performansa bakıldığında, aspir yağı ve zeytin yağı düşük ve orta hızlarda iyi yağlayıcı olarak öne çıkıyor. Soya yağı, özellikle düşük ve orta hızlarda yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle dezavantajlı görünüyor.

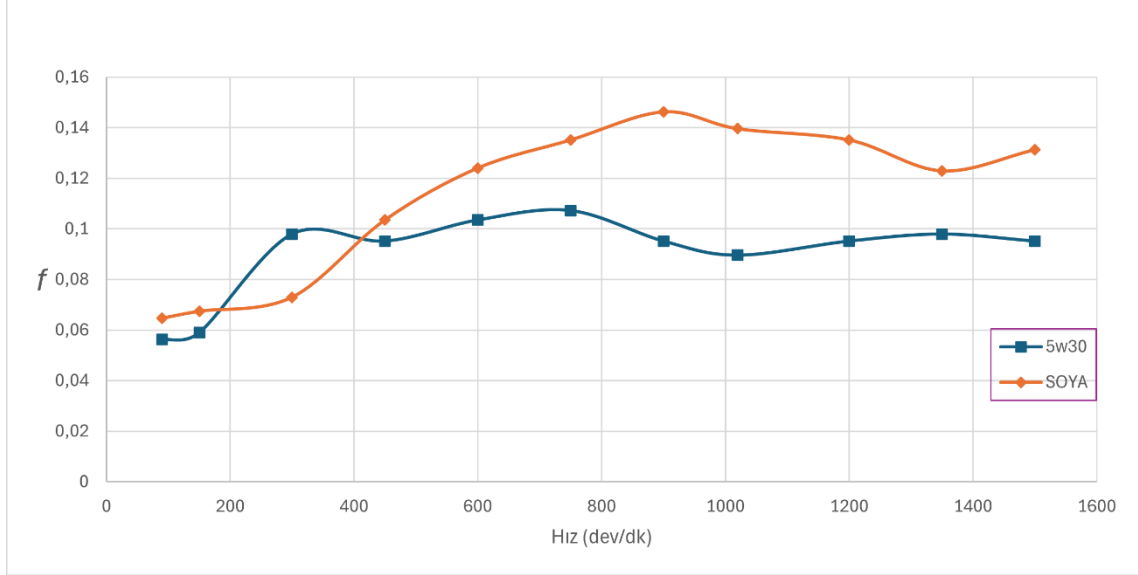


Şekil 3.20. RG-5 malzemesinde bitkisel yağların kıyaslanması

İyi performans gösteren 5W30 madensel yağ ile diğer bitkisel yağların kıyaslanması yapılmıştır.

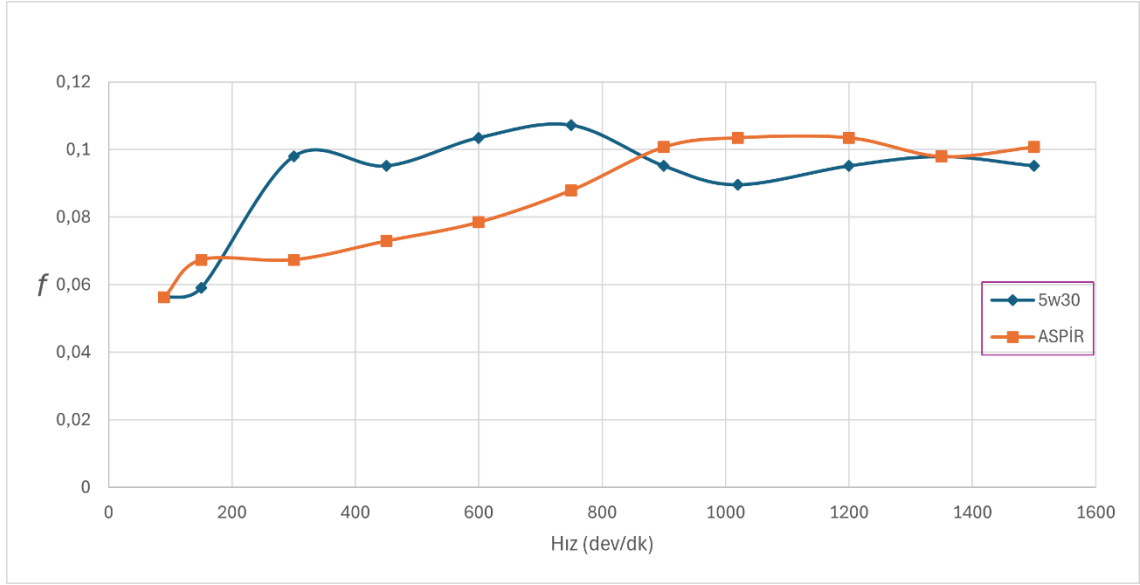
5W30 ile soya yağını kıyaslarsak (Şekil 3.21) Düşük hızlarda 5W30, düşük sürtünme katsayısı ile avantaj sağlarken, soya yağı yüksek sürtünme katsayısı ile dezavantajlıdır. Orta hızlarda soya yağı, zirve yaparak 5W30'a göre çok daha fazla enerji kaybına neden oluyor. Yüksek hızlarda 5W30, hidrodinamik rejimde daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. Soya yağı ise daha az etkili bir yağlama ile dezavantajlıdır. 5W30 yağı hem düşük hem de yüksek hızlarda daha düşük sürtünme

katsayısı ile daha iyi bir yağlama performansı sergiler. RG-5 malzemesiyle kullanılan uygulamalarda, 5W30 gibi düşük viskoziteli motor yağları tercih edilmelidir.



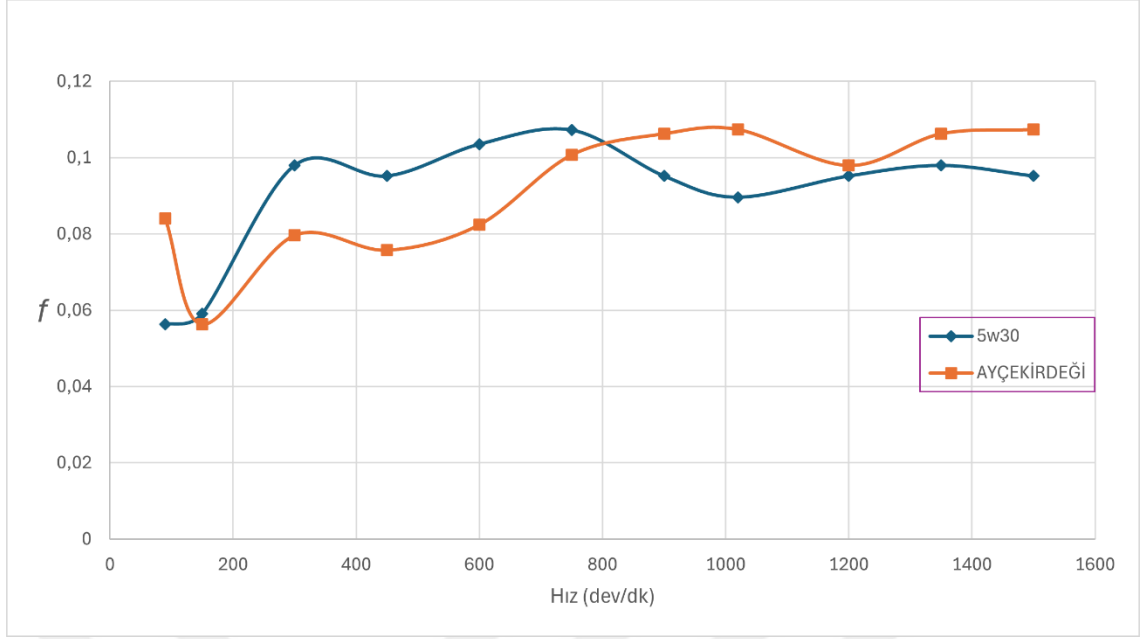
Şekil 3.21. RG-5 malzemesinde 5W30 ve soya yağlarının kıyaslanması

5W30 ile aspir yağını kıyaslırsak (Şekil 3.22) düşük hızlarda aspir yağı daha düşük sürtünme katsayısı ile avantaj sağlıyor. 5W30 yağı bu bölgede daha yüksek sürtünme katsayısına sahip. Orta hızlarda aspir yağı, daha stabil bir performans gösteriyor ve 5W30'a göre daha düşük sürtünme katsayısı sunuyor. Yüksek hızlarda her iki yağ da benzer seviyelerde stabilize oluyor, ancak aspir yağı hafif bir avantaj sağlayabilir. Düşük ve orta hızlarda aspir yağı daha etkili bir yağlama sağlar. 5W30, hidrodinamik rejimde daha rekabetçi bir performans gösterse de düşük hızlardaki dezavantajı nedeniyle enerji kaybı yaratabilir. Aspir yağı, düşük hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı sunduğu için enerji tasarrufu açısından avantajlı olabilir. Ancak, yüksek hızlarda her iki yağ da benzer performans göstermektedir.



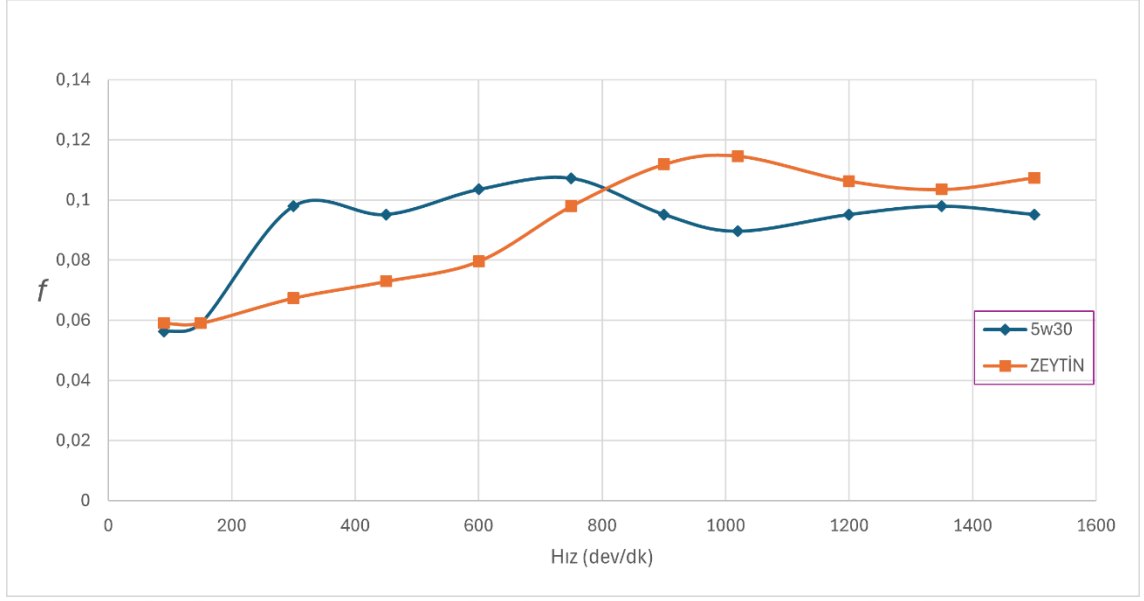
Şekil 3.22. RG-5 malzemesinde 5W30 ve aspir yağlarının kıyaslanması

5W30 ile ay çekirdeği yağını kıyaslırsak (Şekil 3.23) düşük hızlarda ay çiçek yağı, düşük sürtünme katsayısı ile daha iyi bir başlangıç performansı sunuyor. Orta hızlarda 5W30 yağı, daha düşük ve daha stabil sürtünme katsayısı ile avantaj sağlıyor. Ayçiçek yağı bu bölgede daha fazla dalgalanma gösteriyor. Yüksek hızlarda 5W30 yağı, daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlıyor. Ayçiçek yağı bu hızlarda enerji kaybına neden olabilir. 5W30 yağı, yüksek hızlarda ve genel olarak daha düşük sürtünme katsayısı ile daha etkili bir yağlama performansı sergiliyor. Ayçiçek yağı, düşük hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı ile avantaj sağlıyor ancak hız arttıkça performansını kaybediyor. Yüksek hızlarda 5W30 yağı daha iyi bir tercih olabilir. Ayçiçek yağı düşük hız ve düşük yük gerektiren uygulamalarda etkili olabilir.



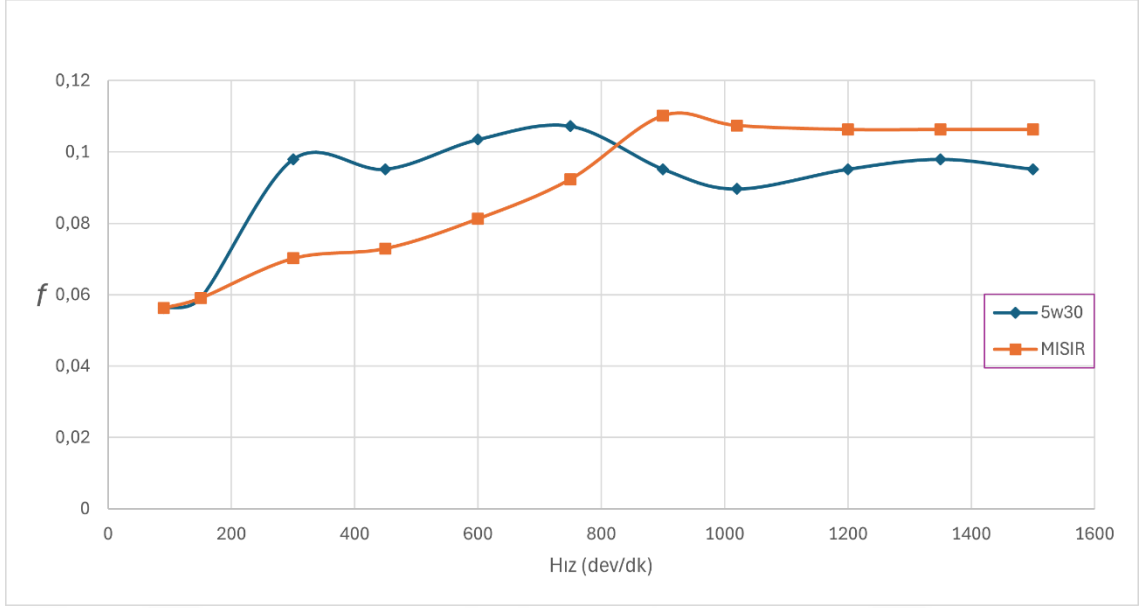
Şekil 3.23. RG-5 malzemesinde 5W30 ve ay çekirdeği yağlarının kıyaslanması

5W30 ile zeytin yağını kıyaslırsak (Şekil 3.24) düşük hızlarda zeytin yağı daha düşük sürtünme katsayısı ile avantaj sağlar. 5W30 ise bu bölgede zeytin yağına kıyasla daha yüksek bir başlangıç sürtünmesi gösterir. Orta hızlarda 5W30 daha stabil bir performans sergilerken zeytin yağı sürtünme katsayısında belirgin bir artış gösterir ve dezavantajlı hale gelir. Yüksek hızlarda 5W30 yağı daha düşük sürtünme katsayısı ile avantaj sağlarken zeytin yağı daha yüksek seviyede kalır. 5W30, özellikle orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. Zeytin yağı düşük hızlarda etkili olabilir ancak hız arttıkça performansı azalır. Yüksek hızlarda 5W30 yağı tercih edilmelidir. Zeytin yağı, düşük hız ve düşük yük gerektiren uygulamalarda kullanılabilir.



Şekil 3.24. RG-5 malzemesinde 5W30 ve zeytin yağlarının kıyaslanması

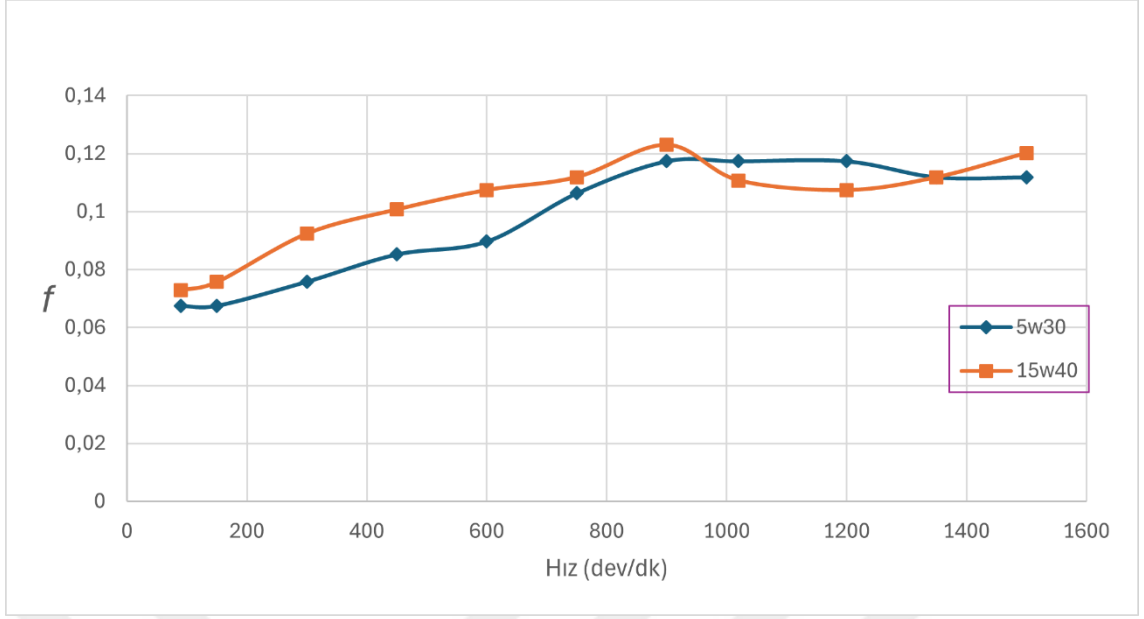
5W30 ile mısır yağını kıyaslarsak (Şekil 3.25) düşük hızlarda mısır yağı daha düşük sürtünme katsayısı ile avantaj sağlar. 5W30 ise bu bölgede biraz daha yüksek bir başlangıç sürtünmesine sahiptir. Orta hızlarda 5W30 daha düşük ve daha stabil bir performans sergilerken, mısır yağı daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve dezavantajlıdır. Yüksek hızlarda 5W30 yağı daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. Mısır yağı, bu hızlarda daha fazla enerji kaybına neden olabilir. 5W30 yağı, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. Mısır yağı, düşük hızlarda daha etkili olabilir ancak hız arttıkça bu avantajını kaybeder. Yüksek hızlarda ve değişken yük koşullarında 5W30 yağı tercih edilmelidir. Mısır yağı ise düşük hız ve düşük yük gerektiren uygulamalarda daha iyi bir alternatif olabilir.



Şekil 3.25. RG-5 malzemesinde 5W30 ve mısır yağlarının kıyaslanması

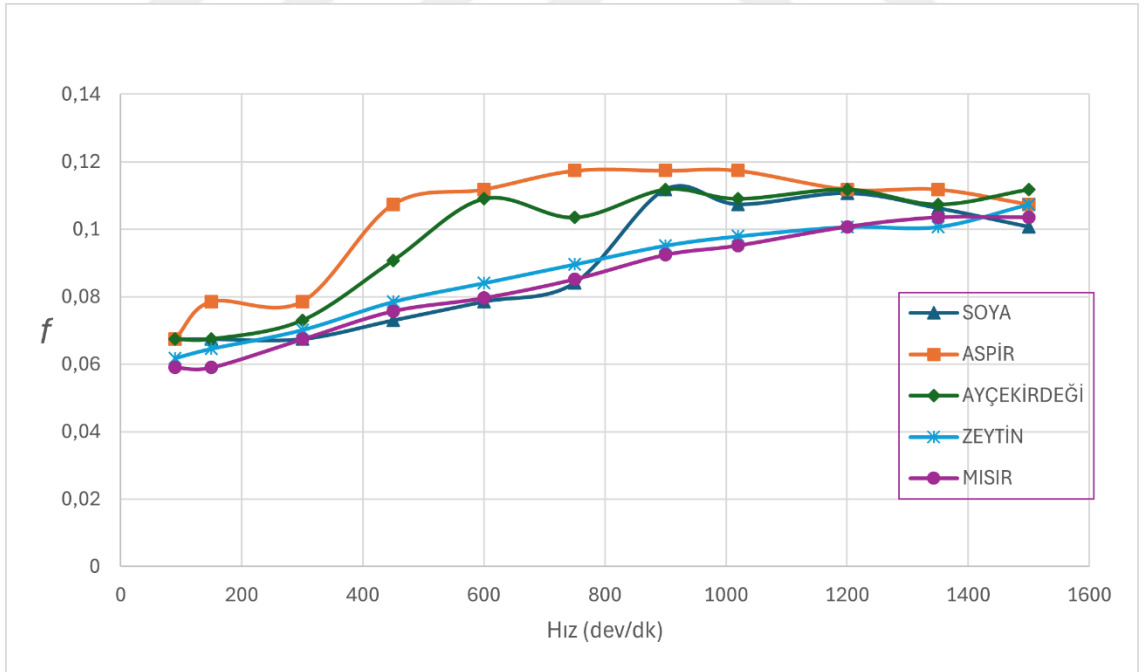
3.3.2. CuSn12 yatak malzemesinde yağların kıyaslanması

Öncelikli olarak iki madensel yağ olan 5W40 ve 15W40 yağlarını kıyaslarsak (Şekil 3.26) düşük hızlarda 5W30 yağı, düşük sürtünme katsayısı ile daha iyi bir performans sergiler. 15W40 yağı bu hızlarda daha az verimlidir. Orta hızlarda 5W30 daha stabil bir performans sergilerken, 15W40 daha yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle dezavantajlıdır. Yüksek hızlarda 5W30 daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 15W40, yüksek hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve bu nedenle enerji kaybı yaratabilir. 5W30 yağı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. Daha yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda tercih edilebilir. Ancak enerji verimliliği açısından dezavantajlıdır. Enerji kayıplarını minimize etmek ve daha stabil bir yağlama sağlamak için 5W30 yağı tercih edilmelidir.



Şekil 3.26. CuSn12 malzemesinde 5W30 ve 15W40 yağın kıyaslanması

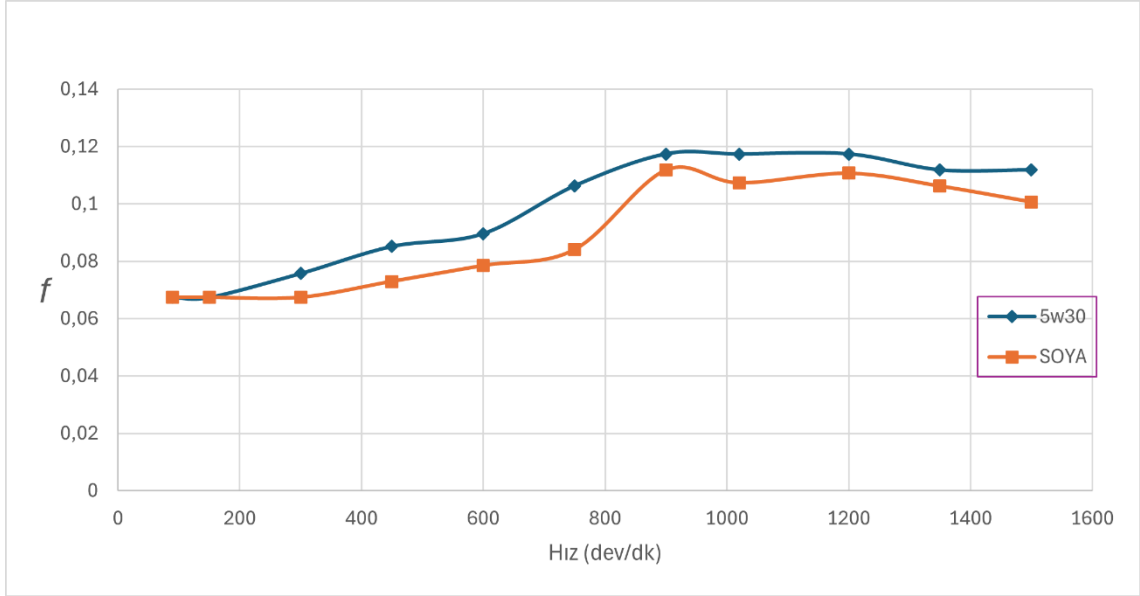
RG-5 yatak malzemesinde bitkisel yağları kıyaslarsak (Şekil 3.27) en iyi performansı mısır yağı en kötü performansı ise aspir yağı gösterir.



Şekil 3.27. CuSn12 malzemesinde bitkisel yağların kıyaslanması

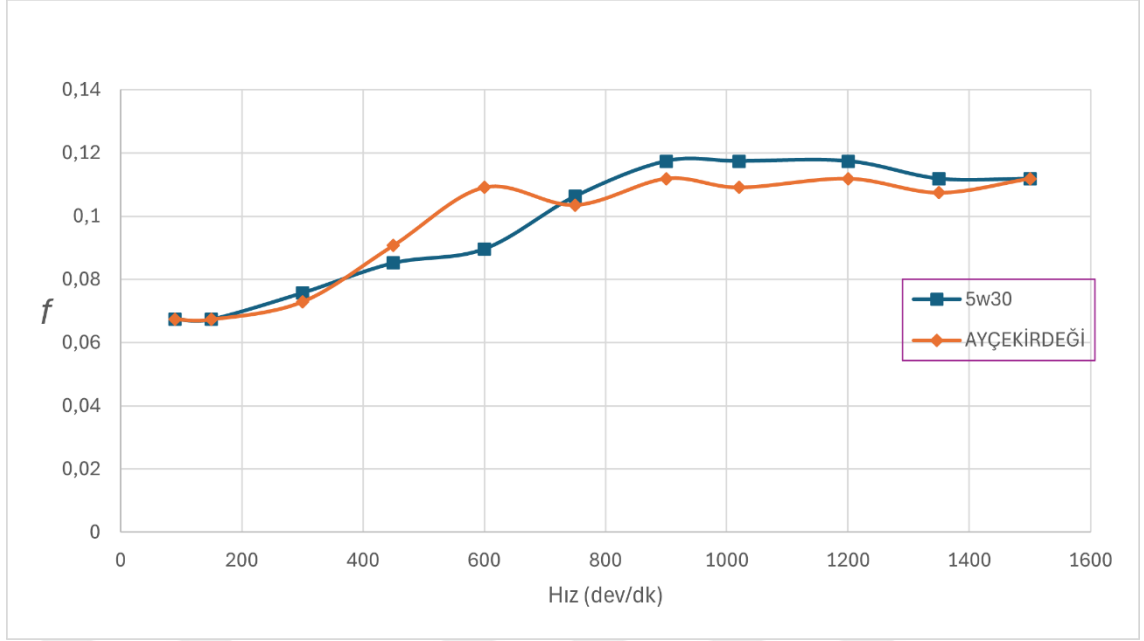
İyi performans gösteren 5W30 madensel yağ ile diğer bitkisel yağların kıyaslanması yapılmıştır.

5W30 ile soya yağı kıyaslırsak (Şekil 3.28) Soya yağı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı ile enerji verimliliği sağlar. 5W30 yağı, tüm hız aralıklarında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Yağlama performansı ve enerji verimliliği açısından soya yağı, 5W30'a kıyasla daha avantajlıdır.



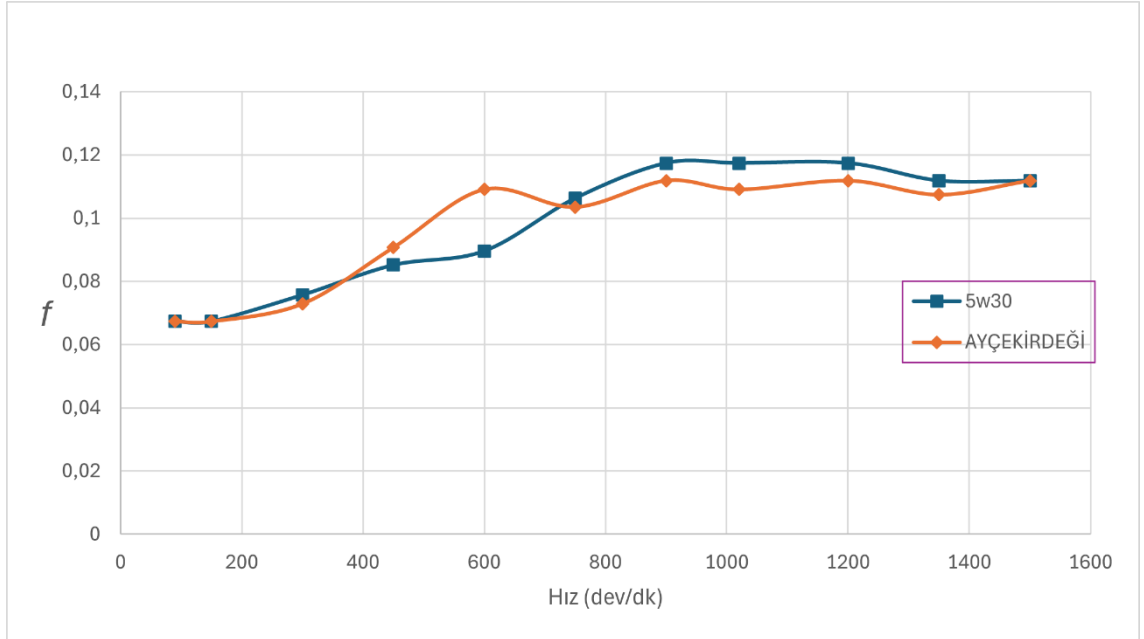
Şekil 3.28. CuSn12 malzemesinde 5W30 ve soya yağlarının kıyaslanması

5W30 ile aspir yağı kıyaslırsak (Şekil 3.29) 5W30 yağı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. Aspir yağı, özellikle orta ve yüksek hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısıyla dezavantajlıdır. Enerji kaybını minimize etmek ve verimli bir yağlama sağlamak için 5W30 yağı tercih edilmelidir.



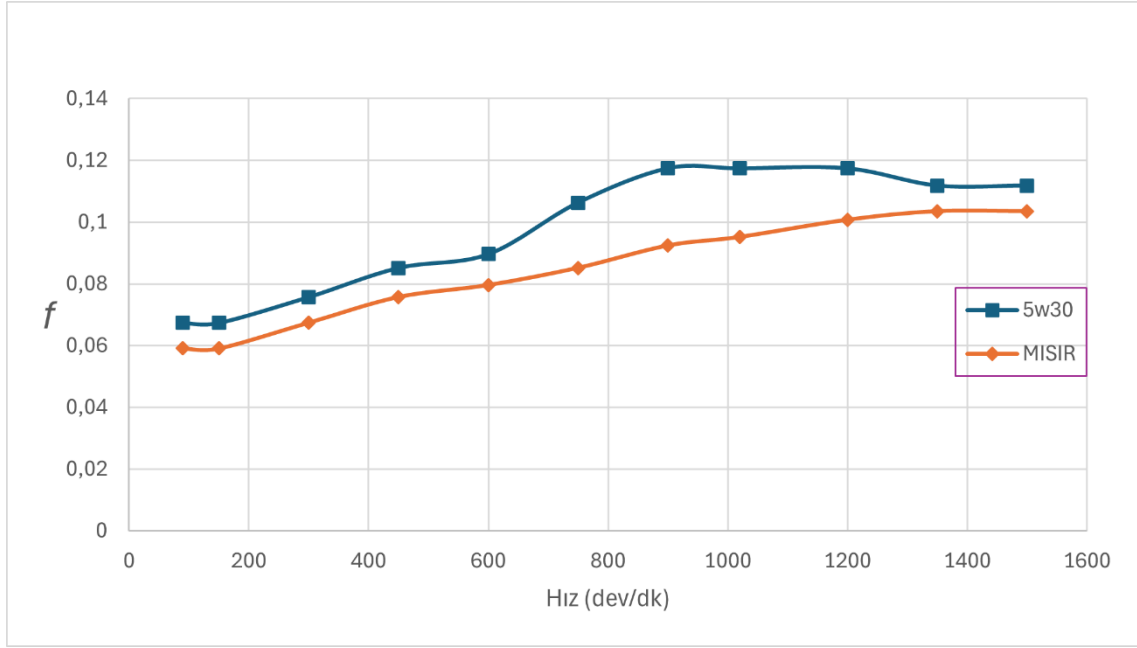
Şekil 3.29. CuSn12 malzemesinde 5W30 ve aspir yağlarının kıyaslanması

5W30 ile ay çekirdeği yağını kıyaslırsak (Şekil 3.30) 5W30 yağı, düşük ve orta hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. Ay çekirdeği yağı yüksek hızlarda 5W30 ile benzer seviyelere ulaşsa da, düşük ve orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle dezavantajlıdır. Verimliliği artırmak ve enerji kaybını minimize etmek için 5W30 yağı tercih edilmelidir.



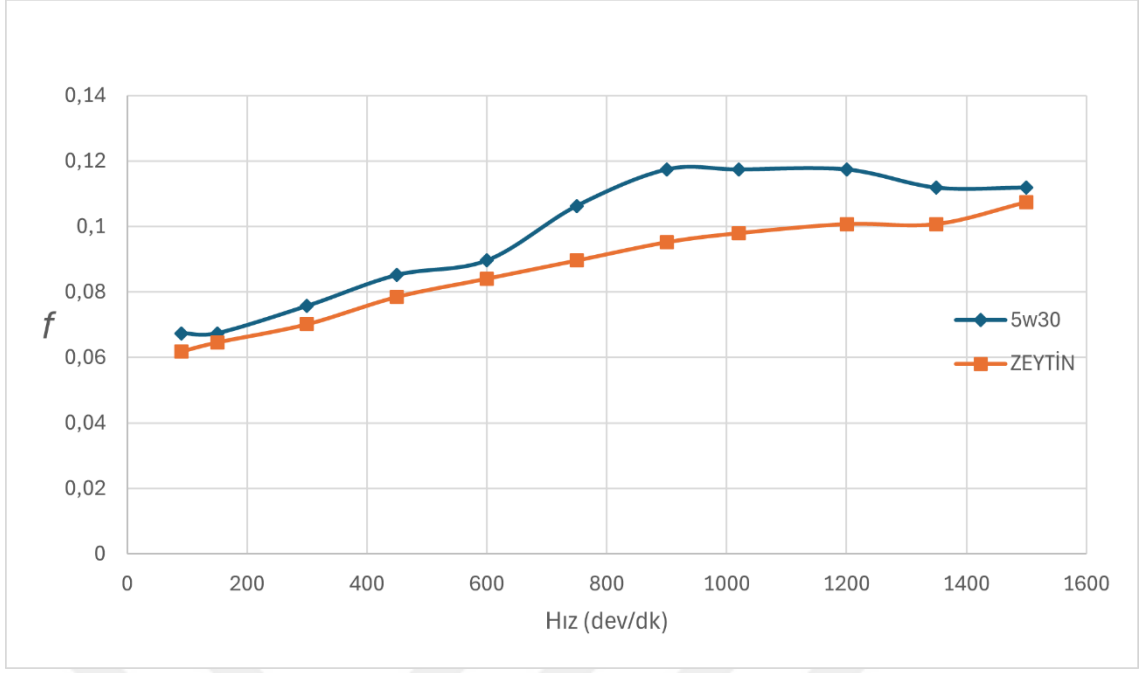
Şekil 3.30. CuSn12 malzemesinde 5W30 ve ay çekirdeği yağlarının kıyaslanması

5W30 ile mısır yağını kıyaslarsak (Şekil 3.31) mısır yağı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 5W30 yağı, tüm hız aralıklarında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Enerji tasarrufu ve yağlama verimliliği açısından mısır yağı, 5W30'a kıyasla daha uygun bir seçimdir.



Şekil 3.31. CuSn12 malzemesinde 5W30 ve mısır yağlarının kıyaslanması

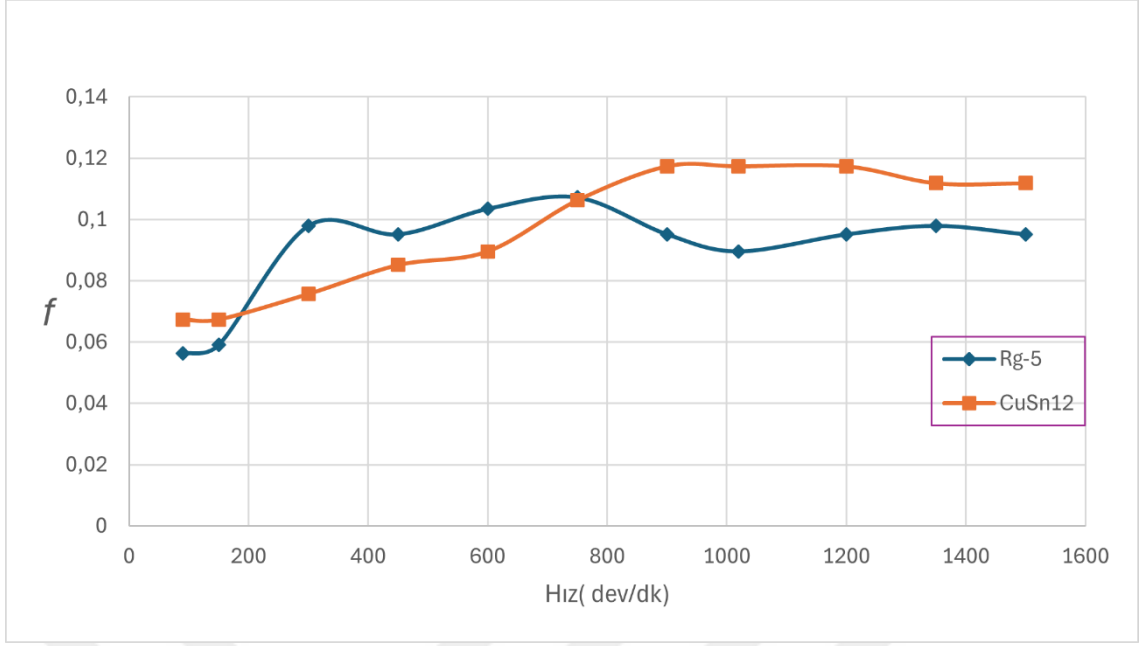
5W30 ile zeytin yağını kıyaslarsak (Şekil 3.32) zeytin yağı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 5W30 yağı, tüm hız aralıklarında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Enerji tasarrufu ve yağlama verimliliği açısından zeytin yağı, 5W30'a kıyasla daha uygun bir seçimdir.



Şekil 3.32. CuSn12 malzemesinde 5W30 ve zeytin yağlarının kıyaslanması

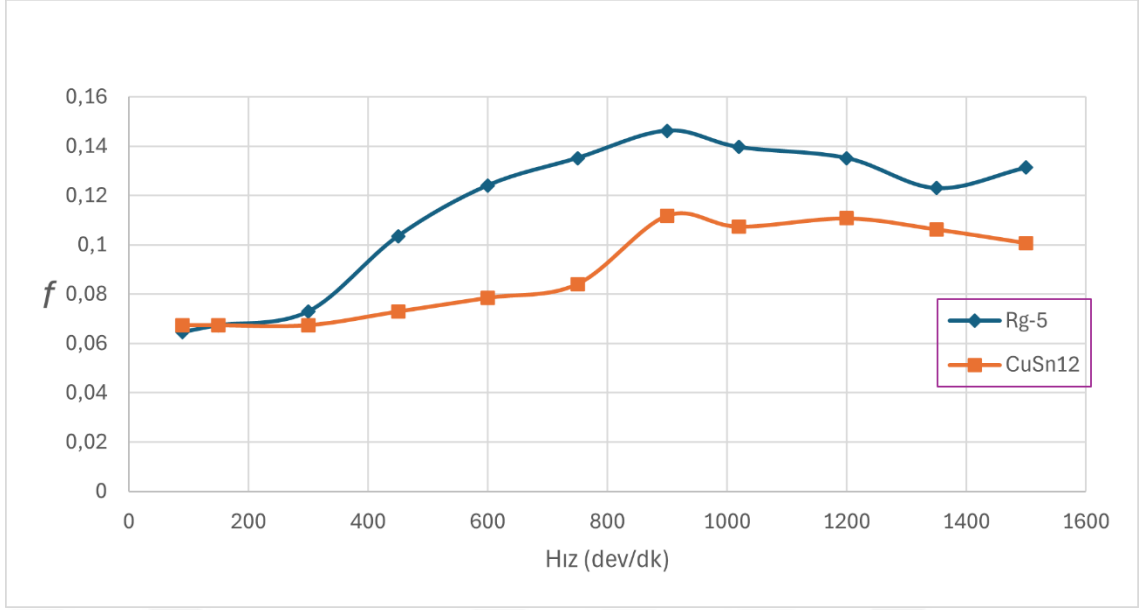
3.3.3. Yatak malzemelerinin kıyaslanması

5W30 yağda iki yatak malzemesi kıyaslanırsa (Şekil 3.33) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) CuSn12, daha düşük sürtünme katsayısıyla daha etkili bir performans sunar. RG-5, düşük hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-800 dev/dk) RG-5, daha düşük sürtünme katsayısıyla daha verimlidir. CuSn12, sürtünme katsayısında belirgin bir artış göstererek enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (800-1600 dev/dk) RG-5, daha düşük ve stabilize sürtünme katsayısıyla avantaj sağlar. CuSn12, yüksek hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. RG-5, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. CuSn12, düşük hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar. Yüksek hızda çalışan ve hidrodinamik rejime ihtiyaç duyan sistemler için RG-5 daha uygun bir seçenektir. Düşük hızda çalışan uygulamalarda ise CuSn12 tercih edilebilir.



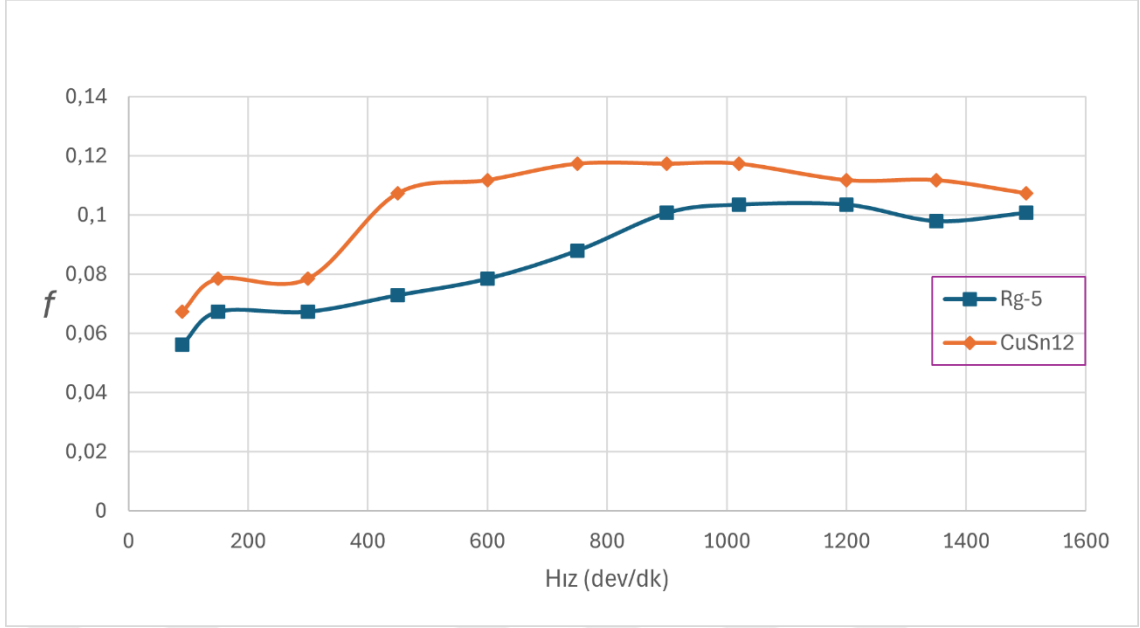
Şekil 3.33. 5W30 yağda CuSn12 ve RG-5 yatak malzemesi kıyası

Soya yağında iki yatak malzemesi kıyaslanırsa (Şekil 3.34) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) CuSn12, düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. RG-5, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-800 dev/dk) CuSn12, düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar. RG-5, sürtünme katsayısında belirgin bir artış göstererek daha fazla enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (800-1600 dev/dk) CuSn12, stabilize ve düşük sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. RG-5, daha yüksek sürtünme katsayısı ile enerji kaybına neden olabilir. CuSn12, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. RG-5, tüm hız aralıklarında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Enerji verimliliğini artırmak ve sürtünmeyi minimize etmek için CuSn12 malzemesi tercih edilmelidir.



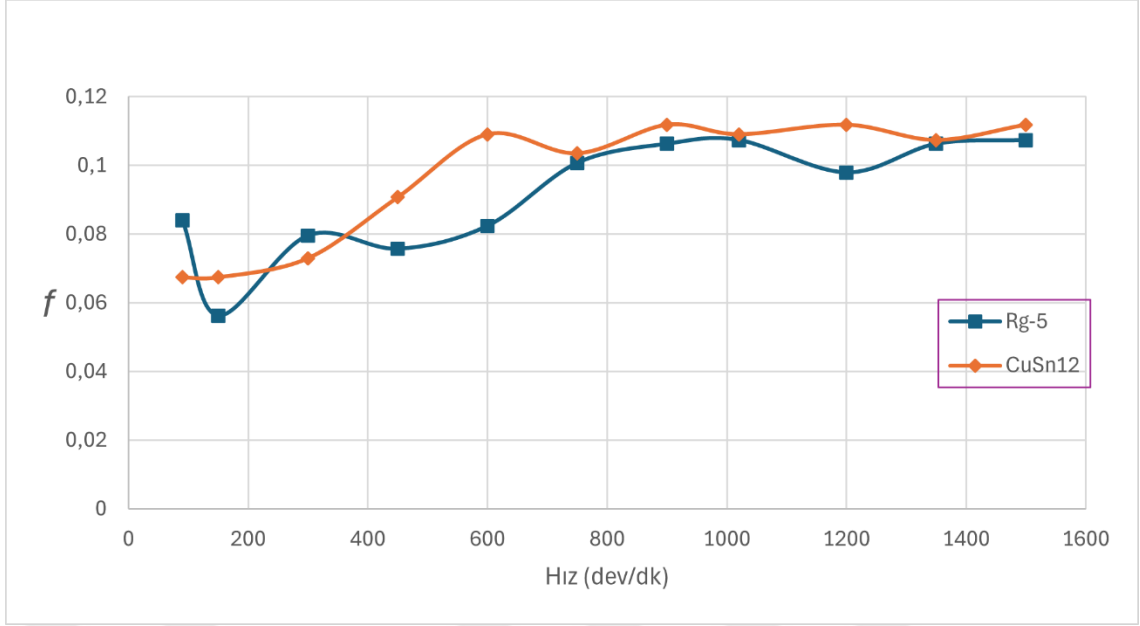
Şekil 3.34. Soya yağında CuSn12 ve RG-5 yatak malzemesi kıyası

Aspir yağında iki yatak malzemesi kıyaslanırsa (Şekil 3.35) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) RG-5, düşük sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. CuSn12, düşük hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına ulaşır. Orta hızlarda (400-800 dev/dk) RG-5, daha düşük ve daha stabil sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. CuSn12, sürtünme katsayısında belirgin bir artış göstererek daha fazla enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (800-1600 dev/dk) RG-5, düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar. CuSn12, daha yüksek sürtünme katsayısıyla dezavantajlıdır. RG-5, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. CuSn12, tüm hız aralıklarında daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olup enerji kaybına neden olur. Daha az enerji kaybı ve verimli yağlama performansı için RG-5 tercih edilmelidir.



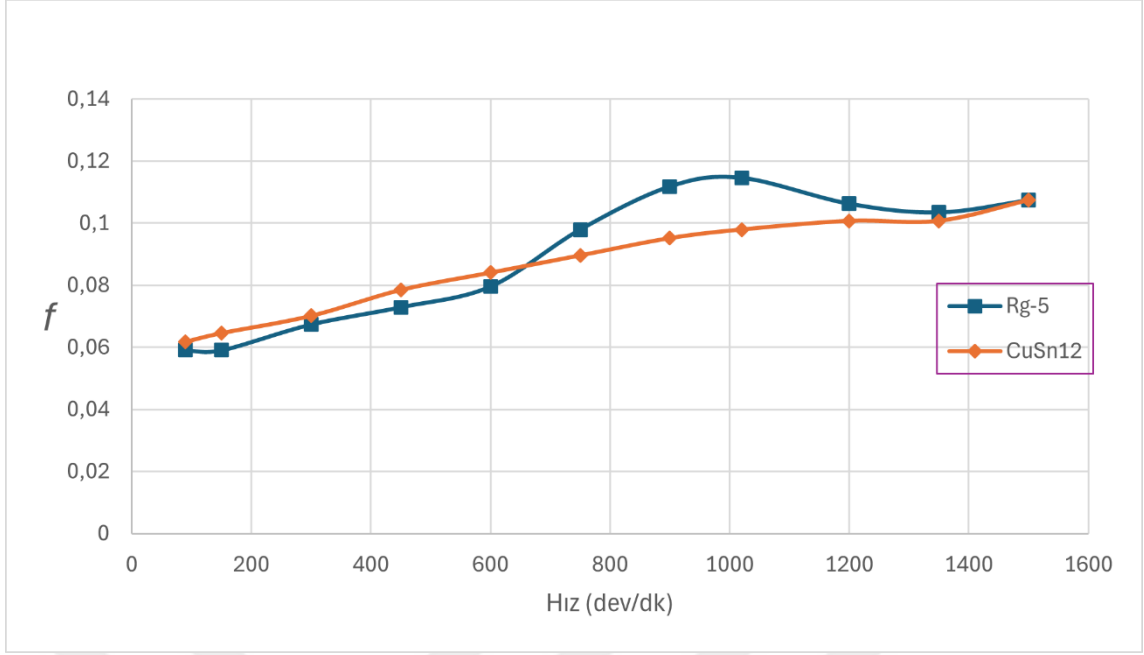
Şekil 3.35. Aspir yağında CuSn12 ve RG-5 yatak malzemesi kıyası

Ay çekirdeği yağında iki yatak malzemesi kıyaslanırsa (Şekil 3.36) düşük Hızlarda (0-400 dev/dk) RG-5, düşük sürtünme katsayısıyla daha verimlidir. CuSn12, düşük hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-800 dev/dk) RG-5, daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji kaybını minimize eder. CuSn12, daha yüksek sürtünme katsayısı ile dezavantajlıdır. Yüksek hızlarda (800-1600 dev/dk) RG-5, daha düşük sürtünme katsayısıyla hidrodinamik rejimde daha iyi performans gösterir. CuSn12, yüksek sürtünme katsayısıyla enerji kaybına neden olur. RG-5, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. CuSn12, özellikle orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısıyla enerji kaybına neden olur. Daha verimli bir yağlama ve düşük enerji kaybı için RG-5 malzemesi tercih edilmelidir.



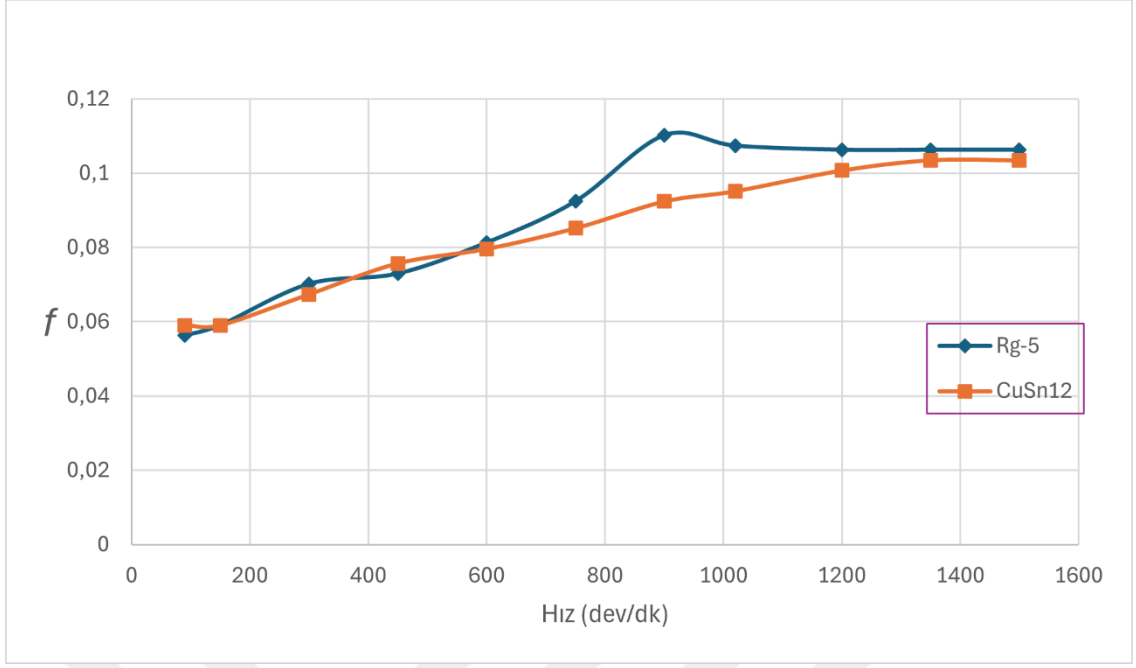
Şekil 3.36. Ay çekirdeği yağında CuSn12 ve RG-5 yatak malzemesi kıyası

Zeytin yağında iki yatak malzemesi kıyaslanırsa (Şekil 3.37) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) CuSn12, düşük sürtünme katsayısıyla daha verimlidir. RG-5, düşük hızlarda CuSn12 ile benzer performans gösterse de enerji kaybı daha fazla olabilir. Orta hızlarda (400-800 dev/dk) CuSn12, daha düşük sürtünme katsayısı ile daha stabil bir performans sergiler. RG-5, sürtünme katsayısında belirgin bir artış gösterir ve enerji kaybına neden olabilir. Yüksek hızlarda (800-1600 dev/dk) CuSn12, düşük sürtünme katsayısıyla hidrodinamik rejimde daha iyi performans gösterir. RG-5, daha yüksek sürtünme katsayısı ile enerji kaybına neden olabilir. CuSn12, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük ve stabil sürtünme katsayısı ile genel olarak daha avantajlıdır. RG-5, özellikle orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Daha stabil ve enerji verimliliği yüksek bir performans için CuSn12 malzemesi tercih edilmelidir.



Şekil 3.37. Zeytin yağında CuSn12 ve RG-5 yatak malzemesi kıyası

Mısır yağında iki yatak malzemesi kıyaslanırsa (Şekil 3.38) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) CuSn12, düşük sürtünme katsayısıyla daha etkili bir performans gösterir. RG-5, düşük hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle dezavantajlıdır. Orta hızlarda (400-800 dev/dk) CuSn12, daha düşük ve sabit sürtünme katsayısıyla daha enerji verimlidir. RG-5, sürtünme katsayısında zirveye ulaşır ve enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (800-1600 dev/dk) her iki malzeme de benzer seviyelere ulaşır ancak CuSn12 daha stabil bir eğri çizer. CuSn12, düşük hızlardaki avantajını genel performansa taşır. CuSn12, düşük ve orta hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. RG-5, özellikle orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olup enerji kaybına neden olabilir. Enerji verimliliği ve dengeli performans için CuSn12 malzemesi tercih edilmelidir.

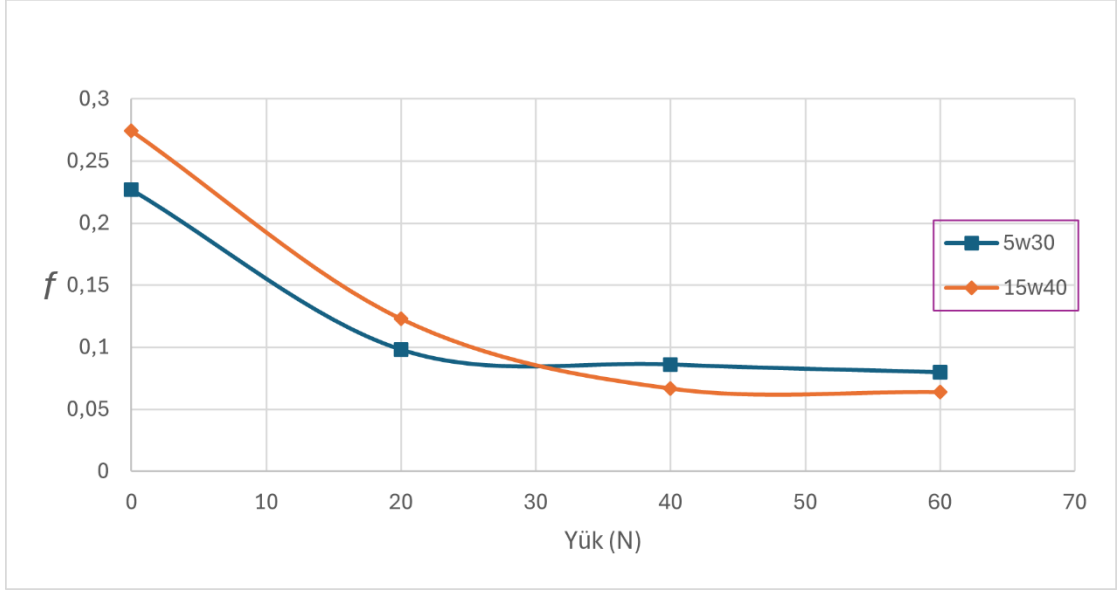


Şekil 3.38. Mısır yağında CuSn12 ve RG-5 yatak malzemesi kıyası

3.4. Sürtünme Katsayısı – Yük Grafikleri

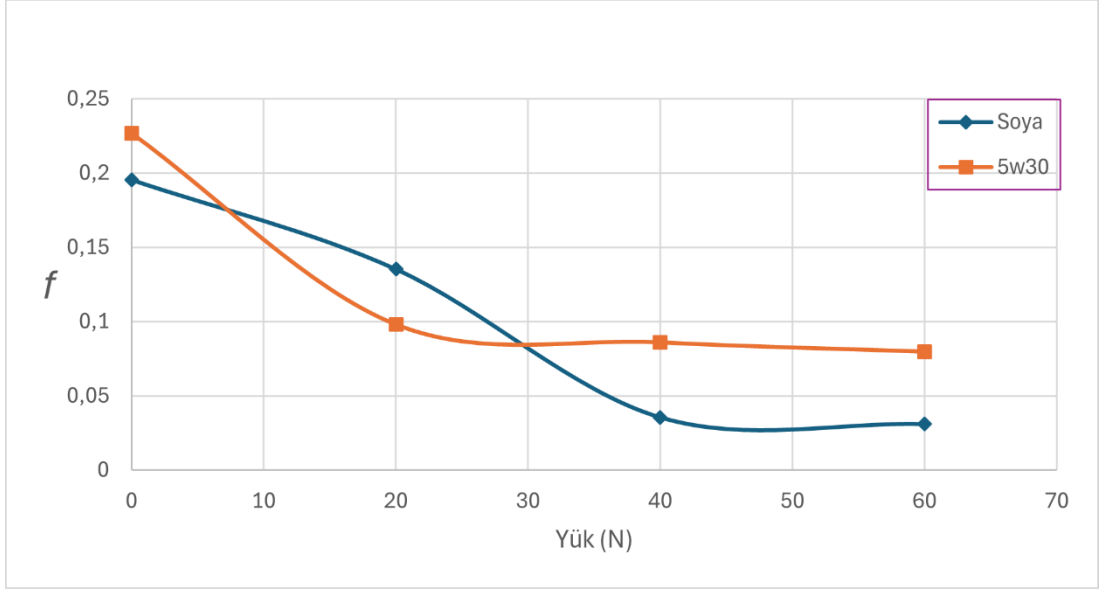
3.4.1. RG-5 yatak malzemesinde farklı yağlayıcılarda yük değişim grafikleri

İlk olarak iki madeni yağ olan 5W30 ve 15W40 yağları kıyaslanırsa (Şekil 3.39) düşük yüklerde (0-20 N) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısıyla daha iyi performans sergiler. 15W40, düşük yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) 5W30, daha düşük ve stabil bir sürtünme katsayısına sahiptir. 15W40, sürtünme katsayısında daha yavaş bir azalma gösterir ve enerji kaybına neden olabilir. Yüksek yüklerde (40-60 N) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. 15W40 yüksek viskozitesi nedeniyle daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. 5W30, tüm yük aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 15W40, özellikle düşük yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Enerji tasarrufu ve verimli yağlama sağlamak için 5W30 yağı tercih edilmelidir.



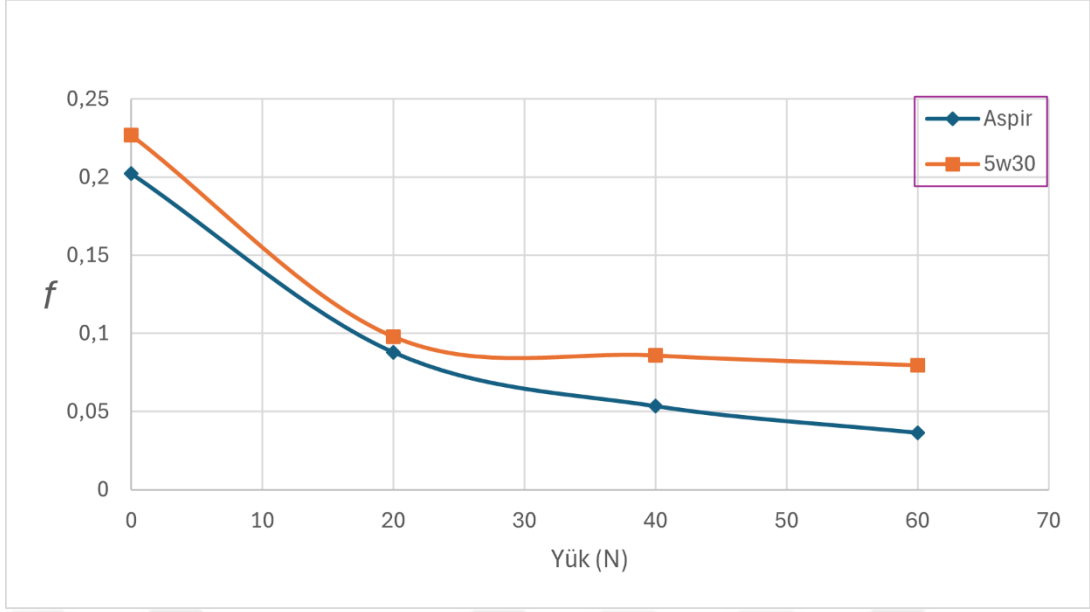
Şekil 3.39. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve 15W40 yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve soya kıyaslanırsa (Şekil 3.40) düşük yüklerde (0-20 N) 5W30, düşük sürtünme katsayısıyla daha iyi performans sergiler. Soya yağı, düşük yüklerde yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle dezavantajlıdır. Orta yüklerde (20-40 N) Soya yağı, bu yük aralığında sürtünme katsayısının azalmasıyla üstünlük sağlar. 5W30, bu yük aralığında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Yüksek yüklerde (40-60 N) Soya yağı, düşük ve stabil sürtünme katsayısıyla daha avantajlıdır. 5W30, daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahiptir. 5W30, düşük yüklerde daha düşük sürtünme katsayısı ile enerji verimliliği sağlar. Soya yağı, yük arttıkça sürtünme katsayısını azaltarak daha verimli bir performans sergiler. Yüksek yüklerde enerji kaybını minimize etmek ve verimliliği artırmak için soya yağı tercih edilebilir. Düşük yük uygulamalarında ise 5W30 daha uygundur.



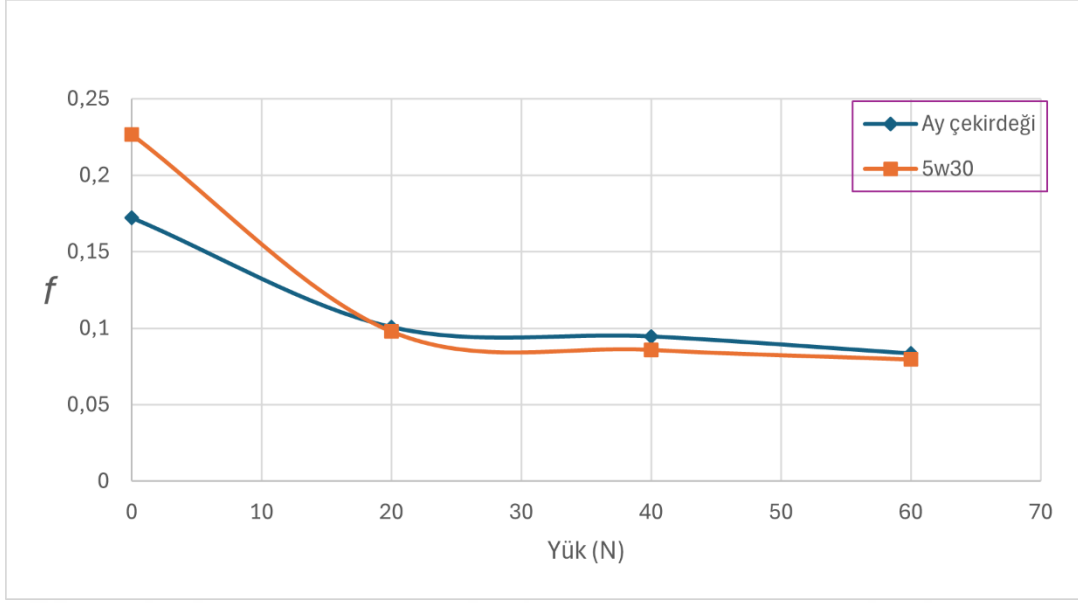
Şekil 3.40. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve soya yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve aspir kıyaslanırsa (Şekil 3.41) düşük yüklerde (0-20 N) her iki yağ da benzer performans sergiler, ancak aspir yağı daha hızlı bir düşüş eğilimi gösterir. Performans farkı düşük olduğu için belirgin bir dezavantaj görülmez. Orta yüklerde (20-40 N) aspir yağı, daha düşük sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Yüksek yüklerde (40-60 N) aspir yağı, en düşük sürtünme katsayısını koruyarak üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı ile dezavantajlıdır. Aspir yağı, tüm yük aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar. 5W30, özellikle orta ve yüksek yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji tasarrufu sağlamak için aspir yağı tercih edilmelidir.



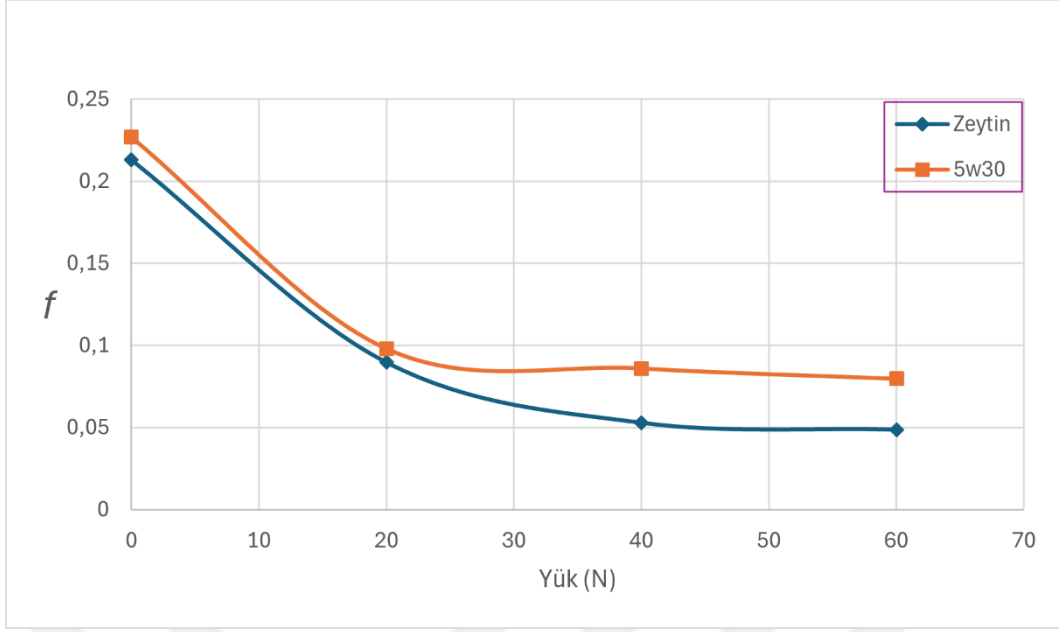
Şekil 3.41. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve aspir yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve ay çekirdeği kıyaslanırsa (Şekil 3.42) düşük yüklerde (0-20 N) ay çekirdeği yağı, daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, bu yük aralığında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) ay çekirdeği yağı, düşük ve sabit sürtünme katsayısı ile enerji tasarrufu sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı ile enerji kaybına neden olabilir. Yüksek yüklerde (40-60 N) ay çekirdeği yağı, en düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı ile dezavantajlıdır. Ay çekirdeği yağı, tüm yük aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji tasarrufu sağlar. 5W30, özellikle düşük ve orta yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olup enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği için ay çekirdeği yağı tercih edilmelidir.



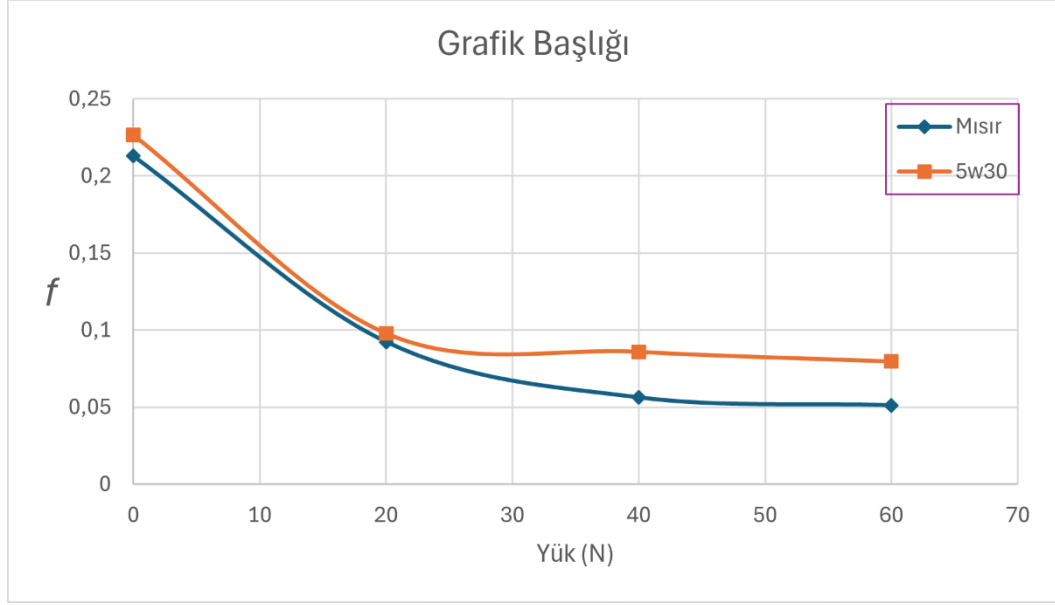
Şekil 3.42. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve ay çekirdeği yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve zeytin kıyaslanırsa (Şekil 3.43) düşük yüklerde (0-20 N) zeytin yağı, daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, düşük yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) zeytin yağı, düşük ve stabil sürtünme katsayısıyla daha avantajlıdır. 5W30, bu yük aralığında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Yüksek yüklerde (40-60 N) zeytin yağı, düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, bu yük aralığında daha fazla enerji kaybına neden olur. Zeytin yağı, tüm yük aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji tasarrufu sağlar. 5W30, özellikle düşük ve orta yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olup enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği için zeytin yağı tercih edilmelidir.



Şekil 3.43. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve zeytin yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

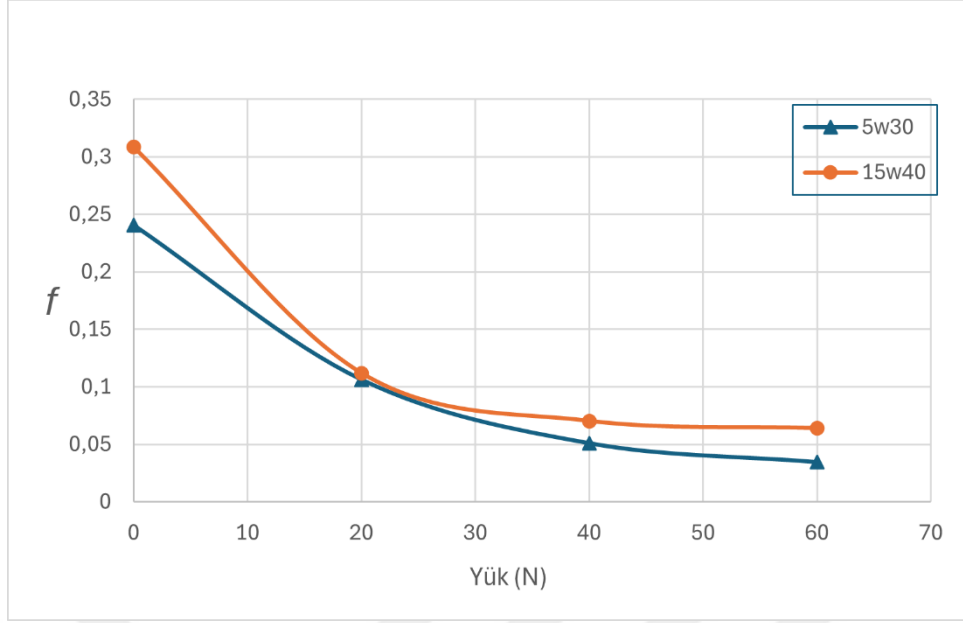
5W30 ve mısır kıyaslanırsa (Şekil 3.44) düşük yüklerde (0-20 N) mısır yağı, düşük sürtünme katsayısıyla daha iyi bir performans gösterir. 5W30, düşük yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) mısır yağı, düşük ve stabil sürtünme katsayısıyla enerji tasarrufu sağlar. 5W30, bu yük aralığında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Yüksek yüklerde (40-60 N) mısır yağı, düşük sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. 5W30, bu yük aralığında daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Mısır yağı, tüm yük aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji tasarrufu sağlar. 5W30, özellikle düşük ve orta yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olup enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği için mısır yağı tercih edilmelidir.



Şekil 3.44. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve mısır yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

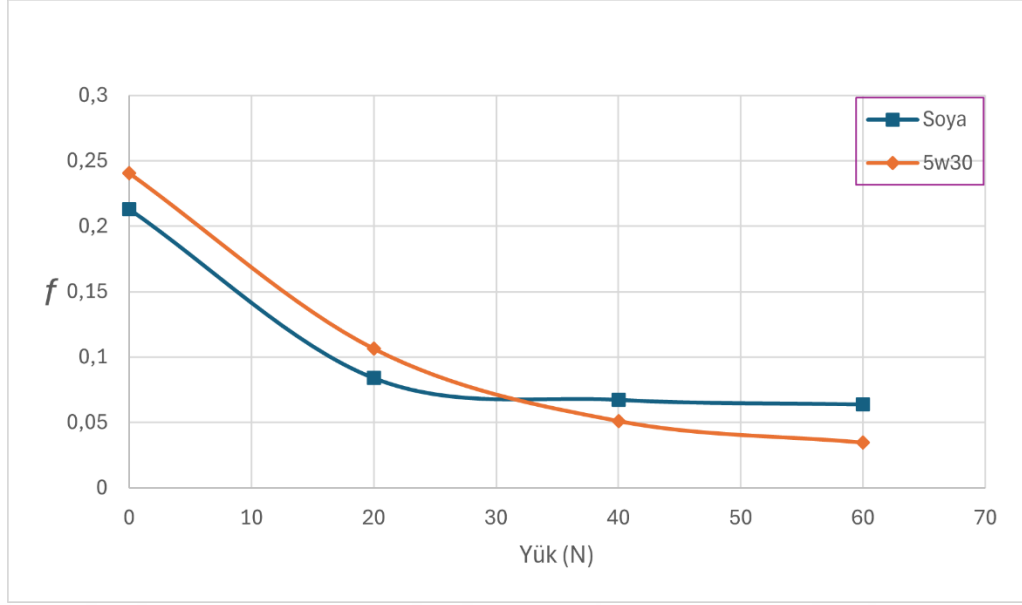
3.4.2. CuSn12 yatak malzemesinde farklı yağlayıcılarda yük değişim grafikleri

İki madeni yağ olan 5W30 ve 15W40 yağları kıyaslanırsa (Şekil 3.45) düşük yüklerde (0-20 N) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısıyla açıkça üstünlük sağlar. 15W40, düşük yüklerde yüksek sürtünme katsayısıyla enerji kaybına neden olur. Orta yüklerde (20-40 N) 5W30, daha düşük ve sabit sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. 15W40, sürtünme katsayısında daha yavaş bir azalma göstererek dezavantajlıdır. Yüksek yüklerde (40-60 N) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. 15W40, daha yüksek sürtünme katsayısıyla enerji kaybına neden olur. 5W30, düşük, orta ve yüksek yüklerde daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 15W40, özellikle düşük yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Enerji tasarrufu ve daha verimli bir yağlama sağlamak için 5W30 yağı tercih edilmelidir.



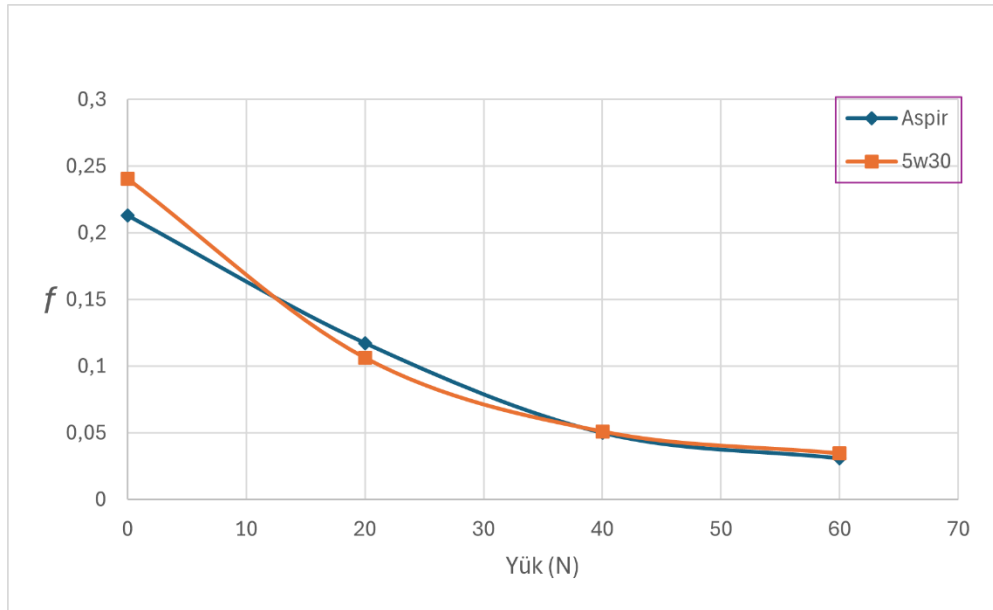
Şekil 3.45. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve 15W40 yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve soya kıyaslanırsa (Şekil 3.46) düşük yüklerde (0-20 N) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. Soya yağı, başlangıçta daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) soya yağı, bu yük aralığında daha düşük sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle dezavantajlıdır. Yüksek yüklerde (40-60 N) soya yağı, düşük ve sabit sürtünme katsayısı ile enerji tasarrufu sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısıyla enerji kaybına neden olur. Soya yağı, orta ve yüksek yüklerde daha düşük sürtünme katsayısı ile enerji verimliliği sağlar. 5W30, düşük yüklerde daha düşük sürtünme katsayısı ile daha verimlidir. Düşük yüklerde 5W30, orta ve yüksek yüklerde ise soya yağı tercih edilmelidir.



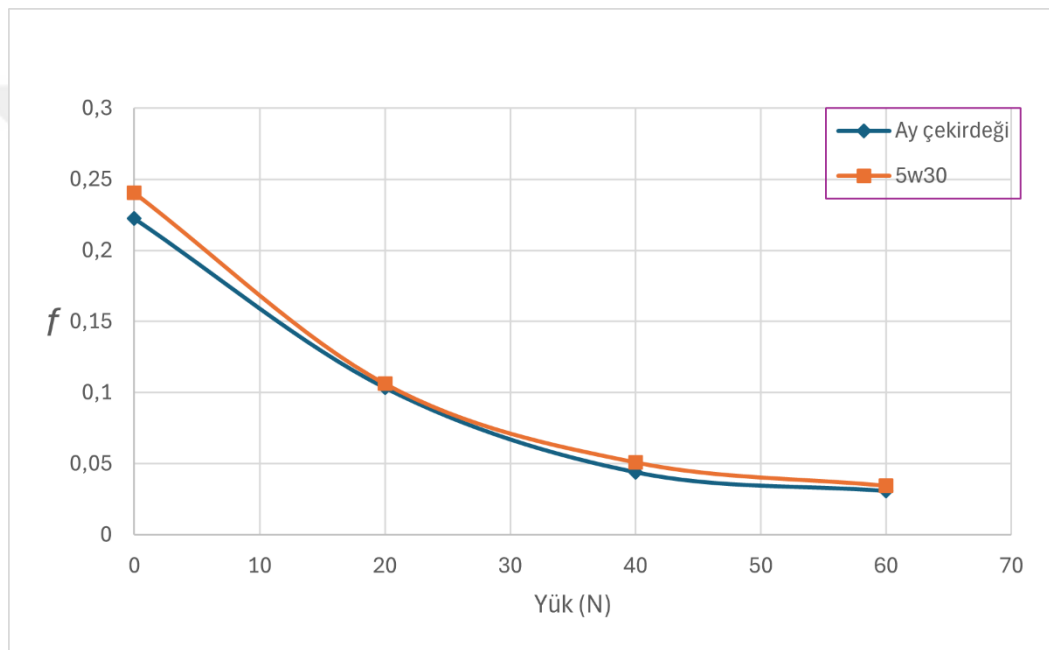
Şekil 3.46. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve soya yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve aspir kıyaslanırsa (Şekil 3.47) düşük yüklerde (0-20 N) aspir yağı, daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) her iki yağ benzer performans gösterir; belirgin bir üstünlük yoktur. Yüksek yüklerde (40-60 N) her iki yağ benzer performans gösterir; belirgin bir üstünlük yoktur. Aspir yağı, düşük yüklerde daha düşük sürtünme katsayısı ile enerji tasarrufu sağlar. Her iki yağın performansı neredeyse eşittir. Düşük yüklerde enerji verimliliği sağlamak için aspir yağı, orta ve yüksek yüklerde ise her iki yağ da tercih edilebilir.



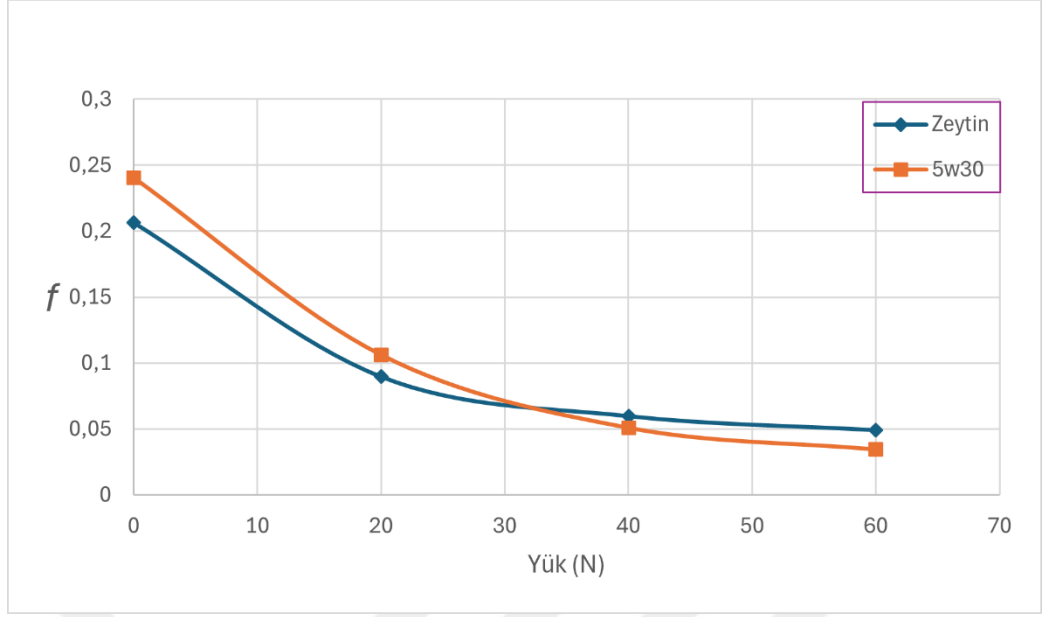
Şekil 3.47. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve aspir yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve ay çekirdeği kıyaslanırsa (Şekil 3.48) düşük yüklerde (0-20 N) ay çekirdeği yağı, düşük sürtünme katsayısıyla daha avantajlıdır. 5W30, biraz daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) iki yağ arasında belirgin bir fark yoktur; her ikisi de benzer performans sergiler. Yüksek yüklerde (40-60 N) iki yağ arasında belirgin bir fark yoktur; her ikisi de benzer performans sergiler. Ay çekirdeği yağı, düşük yüklerde daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji tasarrufu sağlar. Orta ve yüksek yüklerde her iki yağ da benzer performans sergiler; bu yük aralıklarında tercih, diğer kullanım koşullarına bağlı olabilir. Düşük yük uygulamalarında ay çekirdeği yağı, orta ve yüksek yük uygulamalarında ise her iki yağ da tercih edilebilir.



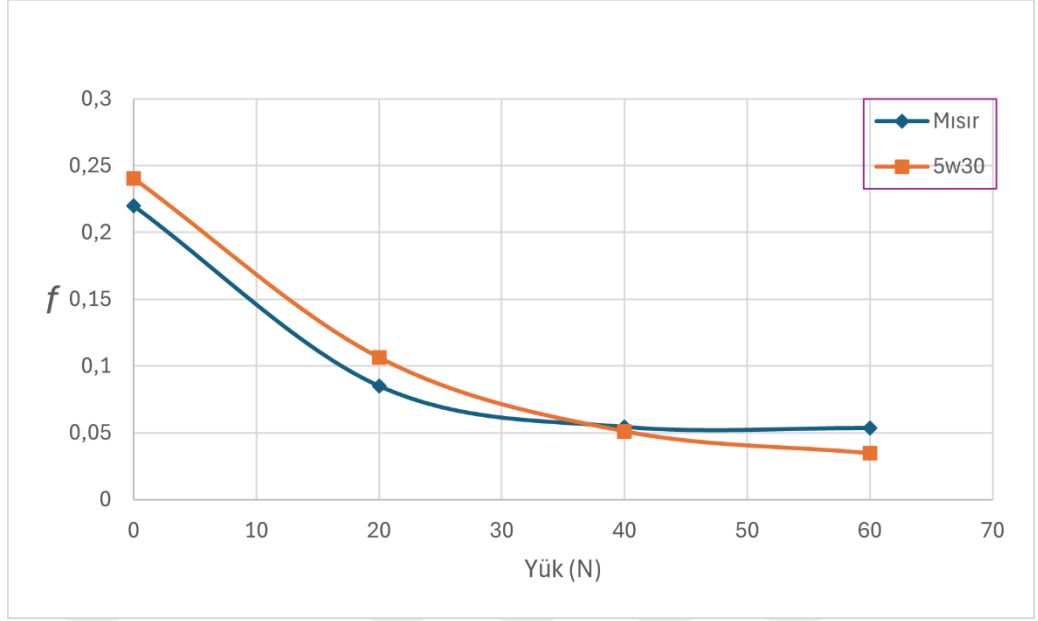
Şekil 3.48. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve ay çekirdeği yağlarına ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve zeytin kıyaslanırsa (Şekil 3.49) düşük yüklerde (0-20 N) zeytin yağı, düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle enerji kaybına neden olabilir. Orta yüklerde (20-40 N) zeytin yağı, bu yük aralığında daha düşük sürtünme katsayısıyla daha avantajlıdır. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Yüksek yüklerde (40-60 N) zeytin yağı, düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Zeytin yağı, tüm yük aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 5W30, özellikle düşük ve orta yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji tasarrufu için zeytin yağı tercih edilmelidir.



Şekil 3.49. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve zeytin yağlara ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

5W30 ve mısır kıyaslanırsa (Şekil 3.50) düşük yüklerde (0-20 N) mısır yağı, düşük sürtünme katsayısı ile enerji tasarrufu sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta yüklerde (20-40 N) mısır yağı, bu yük aralığında daha düşük sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Yüksek yüklerde (40-60 N) mısır yağı, düşük sürtünme katsayısını koruyarak üstünlük sağlar. 5W30, sürtünme katsayısı biraz daha yüksek olduğundan enerji kaybına neden olur. Mısır yağı, düşük, orta ve yüksek yük aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 5W30, özellikle düşük ve orta yüklerde daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji tasarrufu sağlamak için mısır yağı tercih edilmelidir.



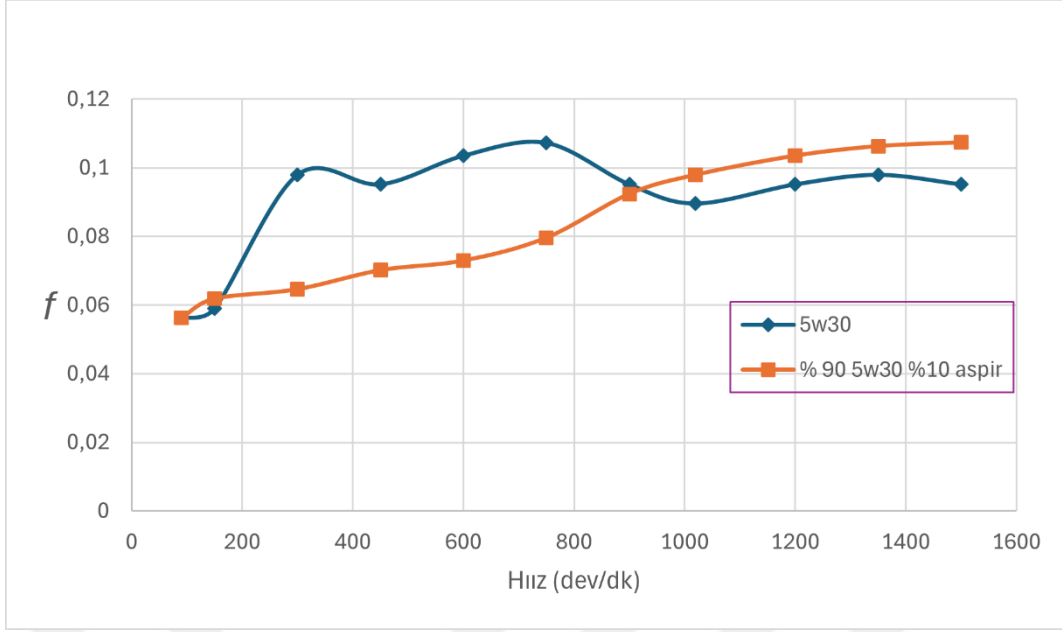
Şekil 3.50. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve mısır yağlarına ait sürtünme katsayısı-yük grafiği

3.5.Yağ Karışımlarının Sürtünme Katsayısı – Hız Grafikleri

RG-5 malzemede 5W30 ve aspir %90 - %10 , %80 - %20 ve %70- %30 oranlarda CuSn12 malzemede ise 5W30 ve soya %90 - %10 , %80 - %20 ve %70- %30 oranlarda karıştırılmıştır.

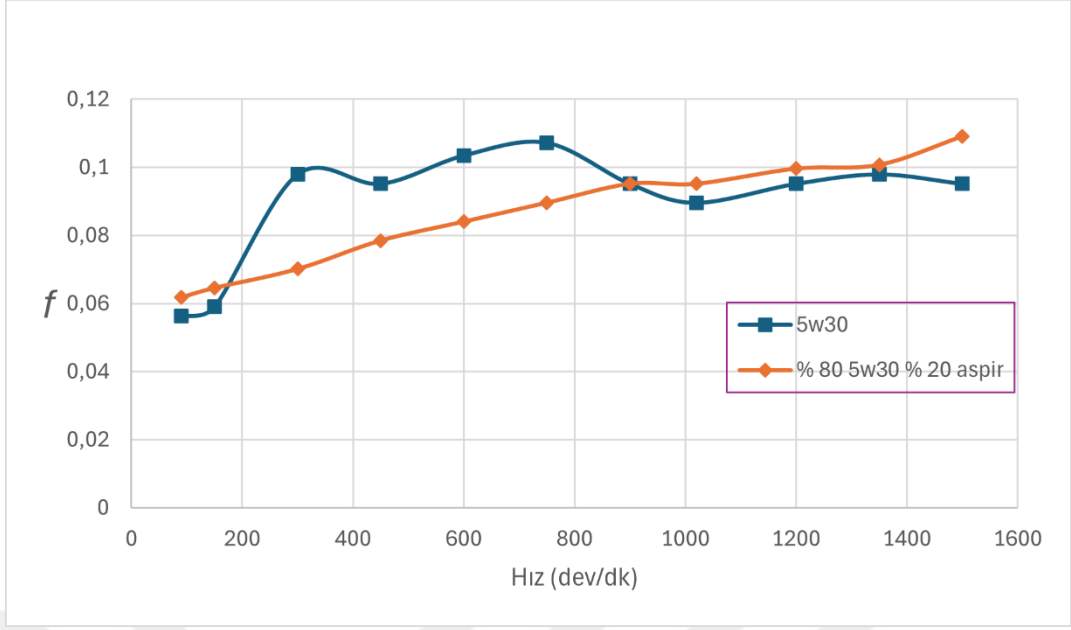
Bu karışımlar 5W30 yağ ile sürtünme katsayısı – hız grafikleri üzerinde kıyaslanmıştır.

RG-5 malzemede 5W30 ve aspir %90 - %10 yağ ile 5W30 karşılaştırılırsa (Şekil 3.51) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) %90 5W30 + %10 aspir yağı, daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-1000 dev/dk) karışım yağ, stabil ve düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (1000-1600 dev/dk) karışım yağ, düşük sürtünme katsayısını koruyarak avantaj sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı ile dezavantajlıdır. %90 5W30 + %10 aspir yağı karışımı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 5W30, özellikle düşük ve orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği için karışım yağ tercih edilmelidir.



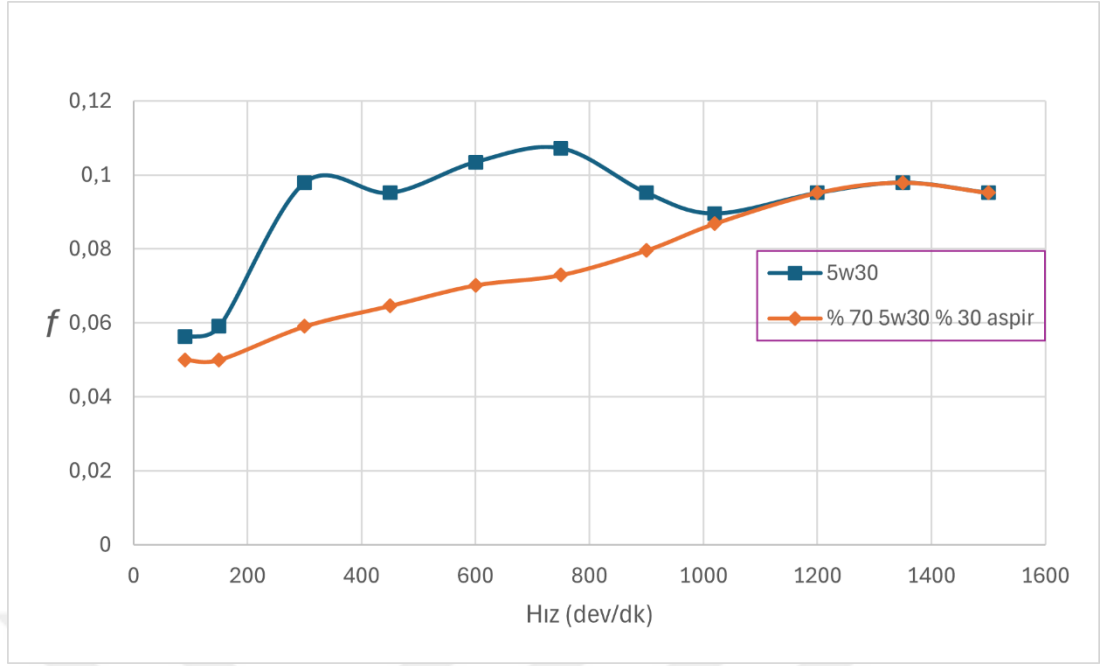
Şekil 3.51. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve %90 5W30 %10 aspir yağına ait sürtünme katsayısı-hız grafiği

RG-5 malzemedde 5W30 ve aspir %80 - %20 yağ ile 5W30 karşılaştırılırsa (Şekil 3.52) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) %80 5W30 + %20 aspir yağı, daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji verimliliği sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-1000 dev/dk) karışım yağ, stabil ve düşük sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. 5W30, dalgalı performansı ile daha fazla enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (1000-1600 dev/dk) karışım yağ, düşük sürtünme katsayısını koruyarak üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı ile dezavantajlıdır. %80 5W30 + %20 aspir yağı karışımı, tüm hız aralıklarında daha düşük sürtünme katsayısıyla daha avantajlıdır. 5W30, özellikle düşük ve orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği için karışım yağ tercih edilmelidir.



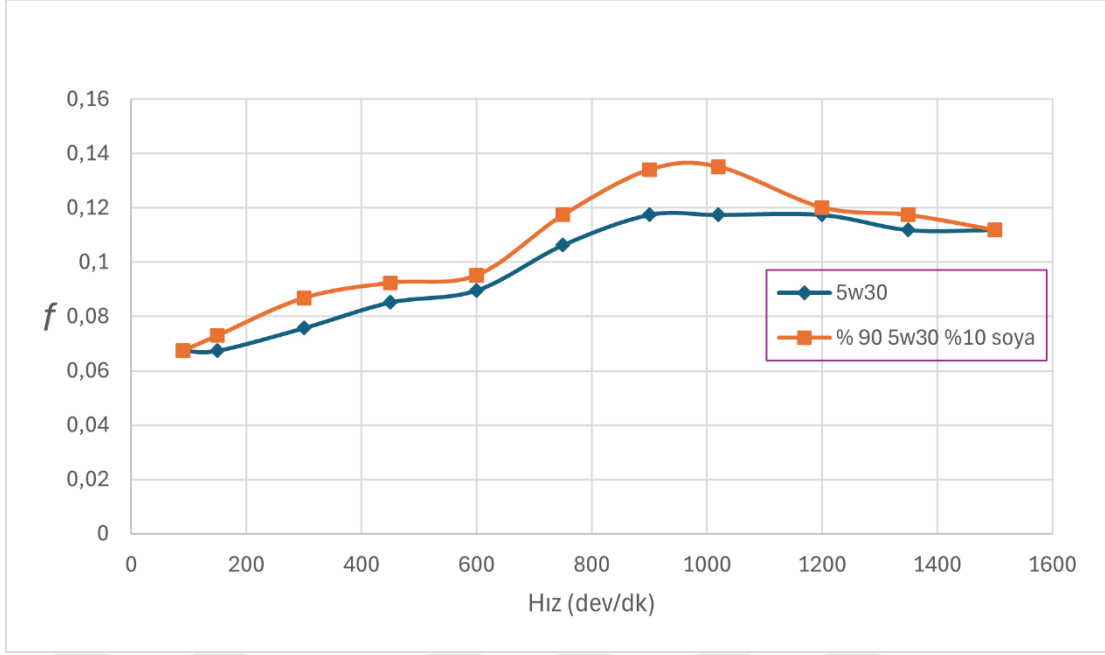
Şekil 3.52. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve %80 5W30 %20 aspir yağına ait sürtünme katsayısı-hız grafiği

RG-5 malzemede 5W30 ve aspir %70 - %30 yağ ile 5W30 karşılaştırılırsa (Şekil 3.53) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) %70 5W30 + %30 aspir yağı, daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Karışım yağ, daha stabil ve düşük sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. 5W30, dalgalı performansı ile enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (1000-1600 dev/dk) karışım yağ, düşük sürtünme katsayısını koruyarak üstünlük sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısı ile dezavantajlıdır. %70 5W30 + %30 aspir yağı karışımı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 5W30, özellikle düşük ve orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısı ile enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği sağlamak için %70 5W30 + %30 aspir yağı karışımı tercih edilmelidir.



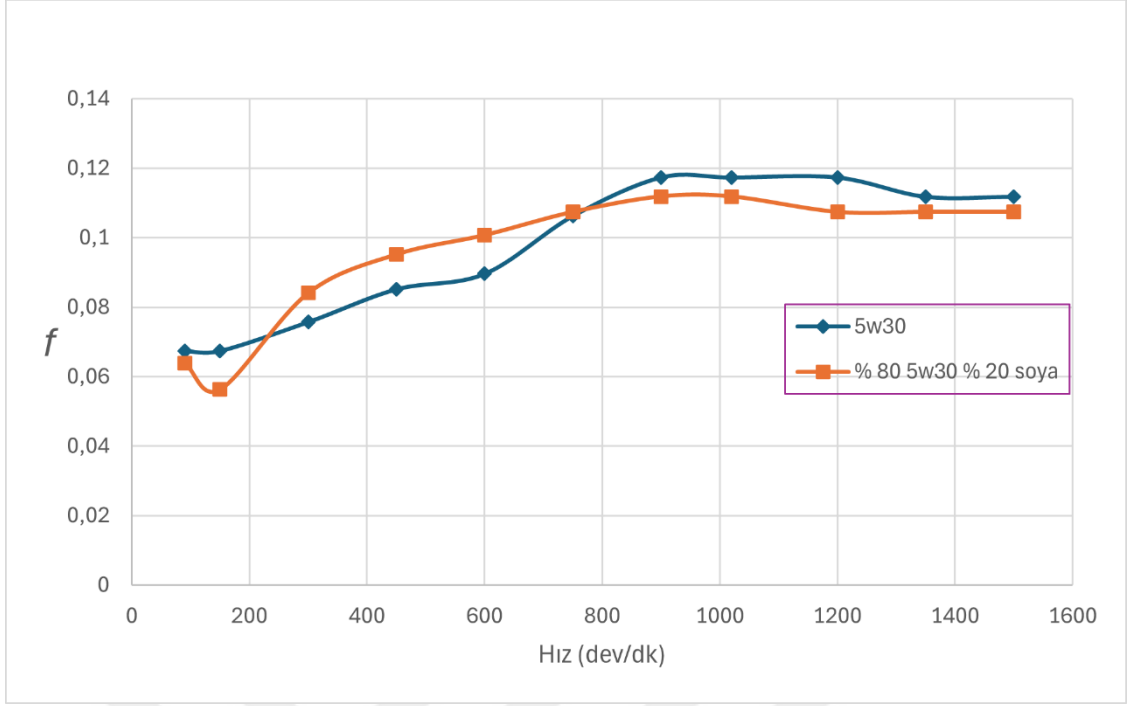
Şekil 3.53. RG-5 yatak malzemesinde 5W30 ve %70 5W30 %30 aspirin yağına ait sürtünme katsayısı-hız grafiği

CuSn12 malzeme 5W30 ve soya %90 - %10 yağ ile 5W30 karşılaştırılırsa (Şekil 3.54) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısı ile daha verimlidir. %90 5W30 + %10 soya yağı, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-1000 dev/dk) 5W30, karışıma kıyasla daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Karışım yağ, daha yüksek sürtünme katsayısı ile enerji kaybına neden olabilir. Yüksek hızlarda (1000-1600 dev/dk) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısını koruyarak üstünlük sağlar. Karışım yağ, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. 5W30, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı ile genel olarak daha avantajlıdır. %90 5W30 + %10 soya yağı karışımı, özellikle düşük ve orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği için saf 5W30 tercih edilmelidir.



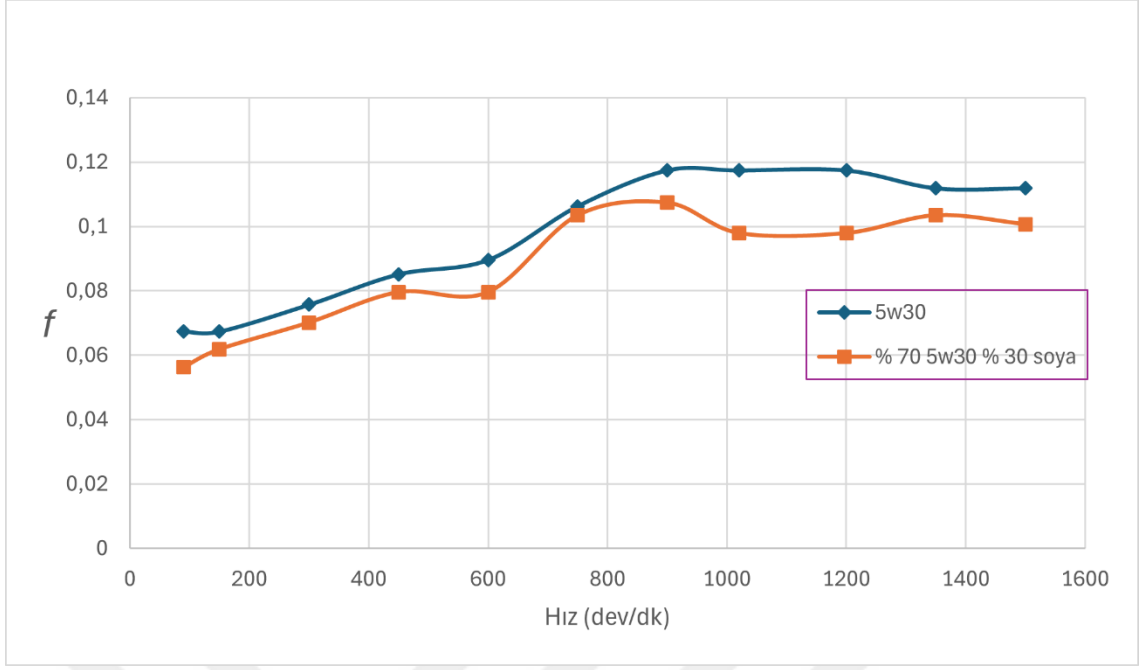
Şekil 3.54. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve %90 5W30 %10 soya yağına ait sürtünme katsayısı-hız grafiği

CuSn12 malzemede 5W30 ve soya %80 - %20 yağ ile 5W30 karşılaştırılırsa (Şekil 3.55) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) 5W30, daha düşük sürtünme katsayısı ile üstünlük sağlar. %80 5W30 + %20 soya yağı, hız arttıkça daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-1000 dev/dk) 5W30, daha stabil ve düşük sürtünme katsayısıyla avantajlıdır. Karışım yağ, bu aralıkta daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Yüksek hızlarda (1000-1600 dev/dk) 5W30, biraz daha düşük sürtünme katsayısıyla avantaj sağlar. Karışım yağ, saf 5W30'a kıyasla daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. 5W30, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. %80 5W30 + %20 soya yağı karışımı, özellikle orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve enerji kaybına neden olabilir. Daha düşük sürtünme katsayısı ve enerji verimliliği için saf 5W30 tercih edilmelidir.



Şekil 3.55. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve %80 5W30 %20 soya yağına ait sürtünme katsayısı-hız grafiği

CuSn12 malzemede 5W30 ve soya %70 - %30 yağ ile 5W30 karşılaştırılırsa (Şekil 3.56) düşük hızlarda (0-400 dev/dk) %70 5W30 + %30 soya yağı, daha düşük sürtünme katsayısıyla enerji tasarrufu sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Orta hızlarda (400-1000 dev/dk) karışım yağ, düşük ve stabil sürtünme katsayısıyla üstünlük sağlar. 5W30, daha fazla enerji kaybına neden olur. Yüksek hızlarda (1000-1600 dev/dk) karışım yağ, düşük sürtünme katsayısını koruyarak avantaj sağlar. 5W30, daha yüksek sürtünme katsayısıyla dezavantajlıdır. %70 5W30 + %30 soya yağı karışımı, düşük, orta ve yüksek hızlarda daha düşük sürtünme katsayısıyla genel olarak daha avantajlıdır. 5W30, özellikle düşük ve orta hızlarda daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Enerji verimliliği ve düşük sürtünme katsayısı için %70 5W30 + %30 soya yağı karışımı tercih edilmelidir.



Şekil 3.56. CuSn12 yatak malzemesinde 5W30 ve %70 5W30 %30 soya yağına ait sürtünme katsayısı-hız grafiği

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Stribeck Eğrileri ve Performans Değerlendirmesi

4.1.1. RG-5 malzemesi

- Sınır yağlama bölgesinde daha düşük sürtünme katsayısına sahip, bu da düşük hızda ve düşük yağlama koşullarında avantaj sağladığını gösteriyor.
- Karışık yağlama bölgesinde sürtünme katsayısında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu, RG-5'in karışık yağlama rejiminde daha fazla temas yüzeyi oluşturduğunu gösteriyor.
- Hidrodinamik yağlama bölgesinde, özellikle yüksek hızlarda yağ filmi stabilitesinde zorluk yaşanmıştır.

4.1.2. CuSn12 malzemesi

- Sınır yağlama bölgesinde RG-5'ten daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir, ancak karışık yağlama rejiminde daha stabil performans gösterir.
- Hidrodinamik yağlama bölgesinde düşük sürtünme katsayısıyla daha tutarlı ve dengeli bir yağlama sağlar.

4.2. Yağ Türleri Arasındaki Farklılıklar

4.2.1. Madeni yağlar (5W30, 15W40)

- 5W30, düşük viskozitesi sayesinde düşük hızlarda daha iyi yağlama sağlar.
- 15W40 daha yüksek viskozitesi nedeniyle yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda avantajlıdır, ancak enerji kaybı daha fazladır.

4.2.2. Bitkisel yağlar

- Aspir ve ay çekirdeği yağları düşük hızlarda daha düşük sürtünme katsayısı sunarken, yüksek hızlarda karışık performans sergilemiştir.
- Zeytin yağı, düşük hız ve düşük yük koşullarında en iyi performansı göstermiştir.

- Soya yağı, özellikle karışık yağlama bölgelerinde yüksek sürtünme katsayısıyla dezavantajlı bulunmuştur.

4.3. Malzeme ve Yağ Türü Kıyaslamaları

RG-5 Malzemesi:

- Madeni yağlarla kullanımda düşük hızlarda daha düşük enerji kaybı sağlamaktadır.
- Bitkisel yağlarla kullanımda karışık yağlama rejiminde daha fazla dalgalanma göstermiştir.
- %70 5W30 + %30 bitkisel yağ karışımları, düşük hızlar ve düşük yük koşullarında en iyi performansı sağlamıştır.

CuSn12 Malzemesi

- Bitkisel yağlar (örneğin zeytin ve soya yağları), düşük hız ve orta yüklerde daha stabil bir performans sunmuştur.
- Madeni yağlarla kullanımda, yüksek hızlarda hidrodinamik yağlama bölgesinde enerji kayıpları minimize edilmiştir.

4.4. Yağ Karışımları

RG-5 Malzemesi:

- %70 5W30 + %30 aspir yağı karışımı, düşük hızlarda ve orta yüklerde sürtünmeyi minimize ederek enerji tasarrufu sağlamıştır.
- Yüksek hızlarda ise saf 5W30 yağının daha tutarlı bir performans sunduğu görülmüştür.

CuSn12 Malzemesi

- %80 5W30 + %20 soya yağı karışımı, düşük hızlarda ve karışık yağlama rejiminde dalgalanmalar göstermiştir.

- Yüksek hızlarda %70 5W30 + %30 soya yağı karışımı daha stabil performans sergilemiştir.

4.5 Hız ve Yük Analizi

4.5.1. Hız değişimine göre performans

Düşük Hızlar (0-400 dev/dk):

- Bitkisel yağlar (aspir ve zeytin yağı) daha düşük sürtünme katsayısıyla avantaj sağlar.
- Karışım yağlar, düşük hızlarda enerji verimliliği artırmıştır.

Orta Hızlar (400-1000 dev/dk):

- 5W30 yağı, düşük viskozitesi sayesinde stabil performans göstermiştir.
- Karışım yağlar, RG-5 malzemesi için en etkili sonuçları sunmuştur.

Yüksek Hızlar (1000-1600 dev/dk):

- CuSn12 malzemesi için 5W30 gibi madeni yağlar tercih edilmelidir.
- Karışım yağlar, özellikle bitkisel yağ oranı %20'yi geçtikten sonra performans kaybına neden olmuştur.

4.5.2. Yük değişimine göre performans

Düşük Yükler (0-20 N):

- Aspir ve zeytin yağı düşük sürtünme katsayısıyla enerji tasarrufu sağlamıştır.

Orta Yükler (20-40 N):

- 5W30 yağı, daha stabil bir performans sergilemiştir.
- Soya yağı ve aspir yağı, enerji verimliliğini artırmıştır.

Yüksek Yükler (40-60 N):

- Madeni yağlar (5W30, 15W40), yüksek yük taşıma kapasitesinde avantajlı bulunmuştur.

4.6. Öneriler

4.6.1. Malzeme ve yağ seçimi

RG-5 Malzemesi için sınır ve karışık yağlama bölgesinde 5W30 veya karışım yağlar tercih edilmelidir. Düşük hız ve düşük yük uygulamalarında bitkisel yağlar etkili bir alternatif olabilir.

CuSn12 Malzemesi için hidrodinamik yağlama bölgesinde ve yüksek hızlarda 5W30 kullanımı önerilir. Daha düşük hız ve yüklerde enerji verimliliği için bitkisel yağlar tercih edilebilir.

4.6.2. Yağ karışımları

RG-5 için %70 5W30 + %30 bitkisel yağ karışımları, düşük hızlarda optimum sonuçlar verirken CuSn12 için ise %90 5W30 + %10 bitkisel yağ oranı, enerji verimliliği ve stabilite açısından uygun bulunmuştur.

Düşük hız ve düşük yük gerektiren yerlerde bitkisel yağlar veya %70 5W30 + %30 bitkisel yağ karışımları tercih edilebilir. Yüksek hız ve yüksek yük gerektiren durumlarda ise 5W30 veya 15W40 gibi madeni yağlar tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Adatepe, H., Cengil, M., & Güneş, B. (2012). Statik Yük Altındaki Kaymalı Yataklarda Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1), 25-34.
- Babalık, F.C. (2018). Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri 9.Baskı. Bursa, Türkiye Dora Yayınevi
- Baş, H. (2022). Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 877-887.
- Budynas, R. G. & Nisbett J. (2015). Shigley's mechanical engineering design 8th metric edition. New York, USA: McGraw-Hill Education.
- Dal A. & Kılıç M. & Akyüz A.Ö & Tuncer A.D. & Gungor A. (2020) Effects of Lubricant Fluid with Nanoparticle Additive on the Load Capacity of a Hydrostatic Journal Bearing. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering* Vol: 7, No: 2, (753-762)
- Daniel, M., Stanko, Š., Branko, K. & Dragan, Ž. (2019). An Experimental study of composite plain bearings: The Influence of Clearance on Friction Coefficient and Temperature. *Strojniški vestnik Journal of Mechanical Engineering* 65 10, 547-556
Doi: <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6108>
- Daniel W. Gebretsadik, Jens Hardell, Braham Prakash, (2015) Friction and wear characteristics of different Pb-free bearing materials in mixed and boundary lubrication regimes, *Wear*, 340–341, Pages 63-72, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.06.002>.
- Farfan-Cabrera, Leonardo & Erdemir, Ali & Cao Romero, Julio & Alam, kazi & Lee, Seungjoo. (2023). Electrification effects on dry and lubricated sliding wear of bearing steel interfaces. *Wear*. 10.1016/j.wear.2022.204592.
- Feyzullahoğlu, E. & Saffak, Z. (2008). The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions. *Materials & Design*, 29, 205-211.
Doi : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.012>
- Gao, G., Yin, Z., Jiang, D. & Zhang, X. (2014). Numerical analysis of plain journal bearing under hydrodynamic lubrication by water. *Tribology International*, 75, 31-38.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.03.009>
- Hamdullah Cuvalcı , Hasan Bas (2004) Investigation of The Tribological Properties of Silicon Containing Zinc – Aluminum Based Journal Bearings. *Tribology International* 37 433–440
- Hamrock, B. J., Schmid, S. R., & Jacobson, B. O. (2004). *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. CRC Press.

- Hao X., Graham J., Derrick P. (2002), Assessment of plain bearing performance in a hydraulic pump using hydrodynamic analysis, *Tribology Series*, 40. 3-594.
- Karadere, G. (2001). Sinterlenmiş bronz yataklarda performans karakteristiklerinin sürtünme katsayısına etkileri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 11-16. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20535/218776>
- Kumar, Sunil & Jadon, Vijay & Singh, Anoop. (2020), Influence of lubricants on the performance of journal bearings – a review. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*. 14. 1-12.
- Öncü, G. & Durak, E. (2021). Statik yüklü radyal kaymalı yataklarda hidrodinamik yağlamanın analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 167-175. Doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.826662>
- Sarı, A. & Salman, Nteziyaremye Ö. (2016). Polimer Yatak Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Bilimleri Dergisi*, 16(2), 446-453. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/43402/529112>
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering Tribology*. Elsevier.
- Subramanian, Baskar & Sriram, G.. (2012). Experimental analysis of hydrodynamic journal bearing under different biolubricants. *IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012*.
- Ünlü, B. S. & Atik, E. (2008). Evaluation of effect of alloy elements in copper based cusn10 and cuzn30 bearings on tribological and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds* 489, 262–268 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.09.068>
- 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. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20522/218539>
- Wang, Lanwen & Sheng, Xuanyu. (2019). Friction and wear performance of sliding bearing seat of reactor pressure vessel. *Wear*. 444-445. 203167. 10.1016/j.wear.2019.203167.
- YILMAZ, S. S., Unlu, B. S., & 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*, vol.31, no.9, 4496-4501.