

**SİLİNDİRİK MAKARALI RULMANLARDA
ELASTOHİDRODİNAMİK FİLM KALINLIĞININ
TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Hatice AKSU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLİNDİRİK MAKARALI RULMANLARDA ELASTOHİDRODİNAMİK FİLM
KALINLIĞININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Hatice AKSU

Orcid No: 0000-0001-5870-3460

Doç. Dr. Gültekin KARADERE
(Danışman)

Orcid No: 0000-0002-9280-0982

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ KONSTRÜKSİYON VE İMALAT ANABİLİM DALI**

BURSA– 2019

TEZ ONAYI

Hatice AKSU tarafından hazırlanan ‘‘Silindirik Makaralı Rulmanlarda Elastohidrokinamik Film Kalınlığının Teorik Olarak İncelenmesi’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Gültekin KARADERE
Orcid No : 0000-0002-9280-0982

Başkan : Doç. Dr. Gültekin KARADERE
Orcid No : 0000-0002-9280-0982
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ
Orcid No : 0000-0003-1790-6987
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliğı Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ
Orcid No : 0000-0003-3350-1509
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliğı Anabilim
Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

../././...

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

7/10/2019.

Hatice AKSU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SİLİNDİRİK MAKARALI RULMANLARDA ELASTOHİDRODİNAMİK FİLM KALINLIĞININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Hatice AKSU

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gültekin KARADERE

Bu tezde aynı boyuttaki silindirik makaralı rulman için, 3 farklı malzeme kombinasyonunda 3 farklı yük altında eliptik temas ve dikdörtgen temas yöntemleriyle boyutsuz film parametreleri ve minimum film kalınlıkları hesaplanmıştır. Eliptik temas yöntemi ve dikdörtgen temas metodu arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Malzemedен bağımsız olarak eliptik temas yöntemine göre elde edilen sonuçlara göre, yük yaklaşık 2 kat artırıldığında hesaplanan minimum film kalınlığı iç bilezik-makara temasında yaklaşık %5,18 dış bilezik-makara temasında yaklaşık %5 oranında azalmaktadır. Dikdörtgen temas yönteminde ise iç bilezik-makara %8,5 ve dış bilezik-makara teması film kalınlığında %7,3 azalmaktadır. Yük 2,5 kat artırıldığında hesaplanan minimum film kalınlığı iç bilezik-makara temasında yaklaşık %6,2 dış bilezik-makara temasında yaklaşık %6,5 oranında azalmaktadır. Dikdörtgen temas yönteminde ise iç bilezik-makara %11 ve dış bilezik-makara teması film kalınlığında %8,5 azalmaktadır. Malzeme kombinasyonundan bağımsız olarak, eliptik temas ve dikdörtgen temas yöntemine göre, iç temas yüzeyindeki boyutsuz film parametresi dış temas yüzeyindekinden yaklaşık % 21 küçük bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Silindirik makaralı rulmanlar, elastohidrodinamik yağlama, film kalınlığı

ABSTRACT

MSc Thesis

THEORETICAL INVESTIGATION OF ELASTOHYDRODYNAMIC FILM THICKNESS IN CYLINDRICAL ROLLER BEARINGS

Hatice AKSU

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering Construction and Manufacturing

Supervisor: Doç. Dr. Gültekin KARADERE

In this thesis, dimensionless film parameters and minimum film thicknesses were calculated by using elliptical contact and rectangular contact methods under 3 different material combinations in 3 different material combinations for cylindrical roller bearing of the same size. Comparisons were made between the elliptical contact method and the rectangular contact method. According to the results obtained according to the elliptical contact method independent of the material, the calculated minimum film thickness decreases by approximately 5,18% in the inner ring-roller contact when the load is increased by 2 times, and by 5% in the outer ring-roller contact. In the rectangular contact method, inner ring-pulley and outer ring-pulley contact decreased by 8.5% and 7.3% in film thickness. When the load is increased by 2.5 times, the calculated minimum film thickness decreases by approximately 6.2% at the inner ring-to-roller contact and by approximately 6.5% at the outer ring-to-roller contact. In the rectangular contact method, inner ring-spool 11% and outer ring-spool contact decreased by 8.5% in film thickness. Regardless of the combination of materials, according to the elliptical and rectangular contact method, the dimensionless film parameter on the inner contact surface was about 21% smaller than on the outer contact surface.

Keywords: Cylindrical Roller Bearings, elastohydrodynamic lubrication, film thickness

TEŐEKKÖR

Tez alıőmam sűresince bilgi ve tecrűbelerinden faydalandıđım, her aőamada bana yardımcı olan ve destek veren tez danıőmanım Sayın Doç. Dr. Gűltekin KARADERE'ye teőekkűrlerimi sunarım.

Bu tez çalıőmamı hazırlama sűrecime kadar bilgi ve deneyimlerinden faydalandıđım deđerli hocalarıma teőekkűrlerimi sunarım.

Ayrıca alıőma sűrem boyunca benden desteđini esirgemeyen deđerli aileme ve niőanlım aynı zamanda meslektaőım Bayram UđURLU' ya teőekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.2. RULMANLI YATAKLAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER	4
2.2.1. RULMANLARIN YAPISI.....	4
a. İÇ BİLEZİK	4
b. DIŞ BİLEZİK.....	4
c. YUVARLANMA ELEMANLARI.....	5
d. KAFES.....	5
e. KAPAKLAR.....	5
f. KLAVUZ RİNGİ.....	5
2.3. RULMANLI YATAK TİPLERİ.....	6
2.3.1. SABİT BİLYALI RULMAN	7
2.3.2. OYNAK BİLYALI RULMAN.....	7
2.3.3. EĞİK BİLYALI RULMAN	7
2.3.4. EKSENEL BİLYALI RULMAN	7
2.3.5. SİLİNDİRİK MAKARALI RULMAN.....	8
2.3.6. OYNAK MAKARALI RULMAN	8
2.3.7. KONİK MAKARALI RULMAN.....	8
2.3.8. EKSENEL MAKARALI RULMAN	9
2.4. RULMAN MALZEMELERİ	9
2.5. RULMANLARIN YAĞLANMASI	13
2.6. RULMAN YÜK DEĞERLERİ VE RULMAN ÖMRÜ	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20

4. BULGULAR	25
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
u	x yönünde ortalama hız, m/s
η	Viskozite, N.s /m ²
η_0	Atmosferik viskozite, N.s /m ²
ρ	Yoğunluk , kg/m ³
ρ_0	Atmosferik yoğunluk, kg/m ³
δ	Elastiklik
E'	Efektif elastisite modülü , Pa
P	Uygulanan normal yük, N
h	Film kalınlığı, m
R_x	x yönünde efektif yarıçap, m
R_y	y yönünde efektif yarıçap, m
ξ	Akışkanın basınç-viskozite katsayısı
H	Boyutsuz film kalınlığı parametresi
k_e	Eliptiklik parametresi
W	Boyutsuz yük parametresi
U	Boyutsuz hız parametresi
G	Boyutsuz malzeme parametresi
W'	Boyutsuz yük parametresi (Dikdörtgensel Temas)
R_q	Kompozit Yüzey Pürüzlülüğü
λ	Boyutsuz minimum film kalınlığı parametresi
H_{min_i}	İç Bilezik Boyutsuz Film Kalınlığı
H_{min_o}	Dış Bilezik Boyutsuz Film Kalınlığı
Kısaltmalar	Açıklama
EHL	Elastohidrodinamik Yağlama

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Rulmanın ana elemanları.....	4
Şekil 2.2. Yatak tipleri	6
Şekil 2.3. Rulmanlı yatakların sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.4. Rulmanların yağlanması.....	14
Şekil 2.5. Rulmanlarda sızdırmazlık.....	15
Şekil 3.1. Elastik katıların temas geometrisi	21
Şekil 4.1. Problemin modellenmesi	26
Şekil 5.1. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Boyutsuz Film Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Eliptik Temas Yöntemi)...	64
Şekil 5.2. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Boyutsuz Film Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Dikdörtgen Temas Yöntemi)	65
Şekil 5.3. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığının Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Eliptik Temas Yöntemi)	66
Şekil 5.4. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığının Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Dikdörtgen Temas Yöntemi)	66
Şekil 5.5. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Eliptik Temas Yöntemi)	67
Şekil 5.6. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Dikdörtgen Temas Yöntemi)	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Radyal (X) ve Eksenel (Y) Yük Katsayısı.....	16
Çizelge 2.2. Güvenilirlik için ömür ayar faktörü a_1	19
Çizelge 2.3. Düzeltme faktörü a_{2-3}	19
Çizelge 4.1. Silindirik makaralı rulman kataloğu (NSK Rulman Kataloğu)	25
Çizelge 5.1. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Boyutsuz Film Parametreleri.....	64
Çizelge 5.2. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı	65
Çizelge 5.3. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı Parametreleri.....	67

1. GİRİŞ

Yataklar minimum sürtünme ile harekete izin veren makine elemanlardır. Hareketin dönme olması halinde yatak, doğrusal olması halinde kızak denir.

Rulmanlı yataklar tipik tribolojik bileşenlerdir. Bir gövdenin diğerine göre kısıtlı hareketine izin verirken, yükü desteklemek için yuvarlanma elemanları ve yivler arasındaki yuvarlanma temaslarını kullanırlar. Bir yuvarlanma elemanı yatağının standart konfigürasyonu, iç ve dış halkaları, iç ve dış halkalar arasında bir sıra halinde düzenlenmiş bir dizi yuvarlanma elemanı ve yuvarlanma elemanları arasında uygun bir halka şeklindeki boşluğu korumak için bir tutucu veya kafes içerir. (XiaolanAi-Charles A. Moyer, 2001)

Rulmanın temel görevi, aralarında rölatif dönme hareketi olan iki eleman arasında sürtünmeyi minimuma indirmek ve sorunsuz yük aktarımını sağlamaktır. Dönen her mekanizmada rulmanlardan faydalanılır. Redüktör, vantilatör ve pompalarda, takım tezgahları millerinde, otomobil şaftı, aks, dişlikutusu, kayış gergi sistemi, alternatörde, direksiyon sistemlerinde, su pompası, her çeşitli endüstriyel elektrik motorunda, çamaşır makinesi ve elektrikli süpürgelerinde, tarım makinelerinde, ağır iş makinelerinde, rüzgar türbinlerinde, gaz türbinlerinde rulman kullanılan düzeneklerdir.

Yataklarda temas yüzeyleri arasında elastik deformasyonun önemli olduğu elastohidrodinamik (EHD) yağlama söz konusudur. Tarihsel olarak, elastohidrodinamik yağlama, yirminci yüzyıldaki yağlama alanındaki ana gelişmelerden biri olarak görülebilir. Pürüzsüz yüzeyler için oldukça geliştirilen elastohidrodinamik yağlama teorisiyle film kalınlıkları ve boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri iyi bir doğrulukla bulunabilmektedir. (Hamrock ve ark., 2006).

Bu tez çalışmasında 3 farklı malzeme kombinasyonunda ve 3 farklı yük altında silindirik makaralı rulmanlarda boyutsuz film parametreleri ve elastohidrodinamik film kalınlığı hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Kaneta (1992), elastohidrodinamik yağlama filmlerinin yüzeyin kinematik şartlarından ve yüzey pürüzlülüklerinin şeklinden niçin ve nasıl etkilendiğini pürüz modellerinin kullanıldığı deneylere dayanarak açıklamıştır.

Zaretsky(1989), Lundberg ve Palmgren teorisine göre yuvarlanma temasında yorulma ömrü ($L = \left(\frac{C}{P}\right)^n$) olarak ifade edilebilir. L milyon devir cinsinden yatak yorulma ömrü; C %90 güvenirlilikte bir milyon devir ömre karşılık gelen yük değeri olarak rulman kataloğunda verilen dinamik yük sayısı, P rulman eşdeğer dinamik yükü ve n üssü malzemeye ve yuvarlanma elemanı şekline bağlı bir sabittir.

Poon and Hains (1966-1967), yuvarlanma temaslarındaki aşınma, yorulma davranışlarını ve pürüzler arasındaki etkileşimleri karakterize eden bir film faktörünün kullanışlı, temel bir parametre olduğunu göstermişlerdir.

Guessasma M. and Machado C. (2018), çalışmalarında mekanik yükleme ve montaj koşulları altında Soyut Eleman Yöntemi (DEM) kullanarak işletme yağlama rejimini öngörmek için radyal bilyalı yatağın verimli bir 3D modellemesini incelemektedir. Temas alanının büyüklüğü, malzemelerin mekanik özellikleri, pürüzlülüğü ve akışkan viskozitesi ile ilgili parametrelere bağlı olarak bir elastohidrodinamik yağlama formülasyonu vasıtasıyla, yağlayıcı film kalınlığı tahmin etmiş ve akışkan filmi, sönümleme etkisinin ve sürtünme katsayısının değişmesini simülasyon eğrisi ile sunmuşlardır.

Tevrüz, (2015), Rulmanlı yataklarda temas alanı çok küçük olduğundan yuvarlanma yüzeylerinde yüksek Hertz basınçları oluşmaktadır. Diğer taraftan rulmanlı yataklarda titreşimli zorlanma hali gerçekleşmektedir. Bu bakımdan, rulman imalinde kullanılacak malzemelerden yüksek yüzey basınç ve sürekli mukavemet sınırına sahip olmaları, dolayısıyla aşınmaya ve yorulmaya dayanıklı olmaları beklenir.

Jablonka ve ark.,(2018) Radyal olarak yüklenmiş sabit bilyalı rulmanlarda film kalınlığının kantitatif ölçümlerine yeni bir yaklaşımın sunulduğu bir çalışmada film kalınlığıyla ters orantılı bir ilişkiye sahip olan elektriksel kapasitans kullanımının uygun olduğu belirtilmiştir.

Marko Matthew D. (2018) çalışmasında bilyalı rulmanların temas noktasındaki yağlayıcı kalınlığı ile sabit hareket altındaki rulmanların ömrünü tahmin etmek için ampirik denklemler arasında bir ilişkiyi incelemiştir. Çalışmada iki bağımsız arıza mekanizması dikkate alındı, yorulma arızası ve yağlama arızası. Arızalar denklemlerle modellenmiş ve DIN / ISO281'de standardize edilmiştir. Daha sonra sonuçlar ticari rulmanlar için öngörülen rulman ömürleriyle kıyaslanmıştır.

Ghezzi ve ark.,(2018) düşük salınım hızlı, yüksek yüklü silisyum nitrür bilyalara sahip hibrit yatakların hasar evriminin incelendiği bir çalışmada, özellikle ilerleyici hasarın, hibrit yatakların iç bilezik yuvarlanma yolunda daha yüksek sayıda döngüden sonra başlarken, eşdeğer temas basıncına sahip çelik-çelik yatakların en çok yüklenmiş bilyalarında hasarın daha erken başladığı vurgulanmıştır.

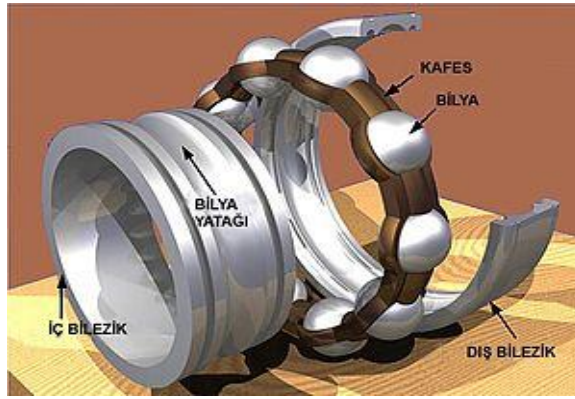
Nazir ve ark. (2018) seramik bilyalı rulmanlar için kırılma mekaniği yaklaşımıyla yorulma çatlak başlangıcı ve yayılmasının silisyum nitrür bilyalı rulmanda önemli bir hasar mekanizması olduğu ve hem üreticiler hem de kullanıcılar için tasarım ve mukavemet açısından zorluklar getirdiği belirtilmiştir.

Karadere G. Tosun C. (2019) bilyalı rulmanlarda 3 farklı malzeme kombinasyonunda uygulanan radyal yük değerini artırarak toplam lokal ezilme miktarlarını ve minimum film kalınlığını hesaplayarak sonuçlar arasında karşılaştırma yapmışlardır.

2.2. Rulmanlı Yataklar Hakkında Genel Bilgiler

2.2.1. Rulmanların Yapısı

Rulman ana parçaları iç bilezik, dış bilezik, kafes, yuvarlanma elemanları ve sızdırmazlık kapağıdır. Rulmanların bazılarında ilave parçalar vardır. Kılavuz ringi oynak makaralı rulmanlarda kullanılan ilave parçaya örnektir. Şekil 3.1.de rulman üzerinde bulunan ana parçalar görülmektedir.



Şekil 2.1. Rulmanın ana elemanları (İnternet, <http://www.yedas.com.tr/tr/sayfa/rulman-nedir>)

a. İç Bilezik

İç bilezik mil üzerine monte edilir ve birçok durumda dönen parçadır. İç bilezik deliği silindirik ve konik olabilir. Yuvarlanma yüzeyleri farklı formlardaki yuvarlanma elemanları ile beraber çalışırlar. Yuvarlanma elemanları yüzeyleri, yuvarlanma elemanlarının tipine bağlı olarak; oynak, silindirik, konik olabilir.

b. Dış Bilezik

Dış bilezik makinenin yuva kısmına monte edilir ve birçok durumda dönmez. Yuvarlanma yüzeyleri farklı formlardaki yuvarlanma elemanları ile beraber çalışırlar. Yuvarlanma elemanlarının yüzeyleri yuvarlanma elemanının tipine bağlı olarak; oynak, silindirik, konik olabilir.

c. Yuvarlanma Elemanları

Yuvarlanma elemanları bilya, silindirik, makara, konik makara veya iğneli makara olabilir. Yuvarlanma elemanları iç bilezik ile dış bilezik yuvarlanma yüzeyleri arasında dönerler ve ince yağ filmi yoluyla rulman üzerinde yükü iletirler.

d. Kafes

Kafes, yuvarlanma elemanlarının çalışma esnasında iyi olmayan yağlama şartlarında bile birbirlerine temas etmesini önler. Kafes birçok rulman tipinde taşıma esnasında, yuvarlanma elemanlarını beraber tutmayı sağlar.

e. Kapaklar

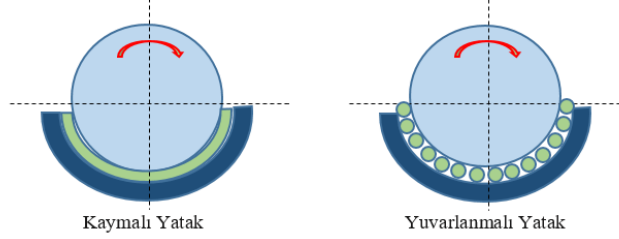
Kapaklar veya keçeler rulman ömrünün uzun olması için gereklidir. Kapaklar rulmanları pislikten korur, kendisinden kapaklı rulmanların tercihi günden güne artmaktadır.

f. Kılavuz Ringi

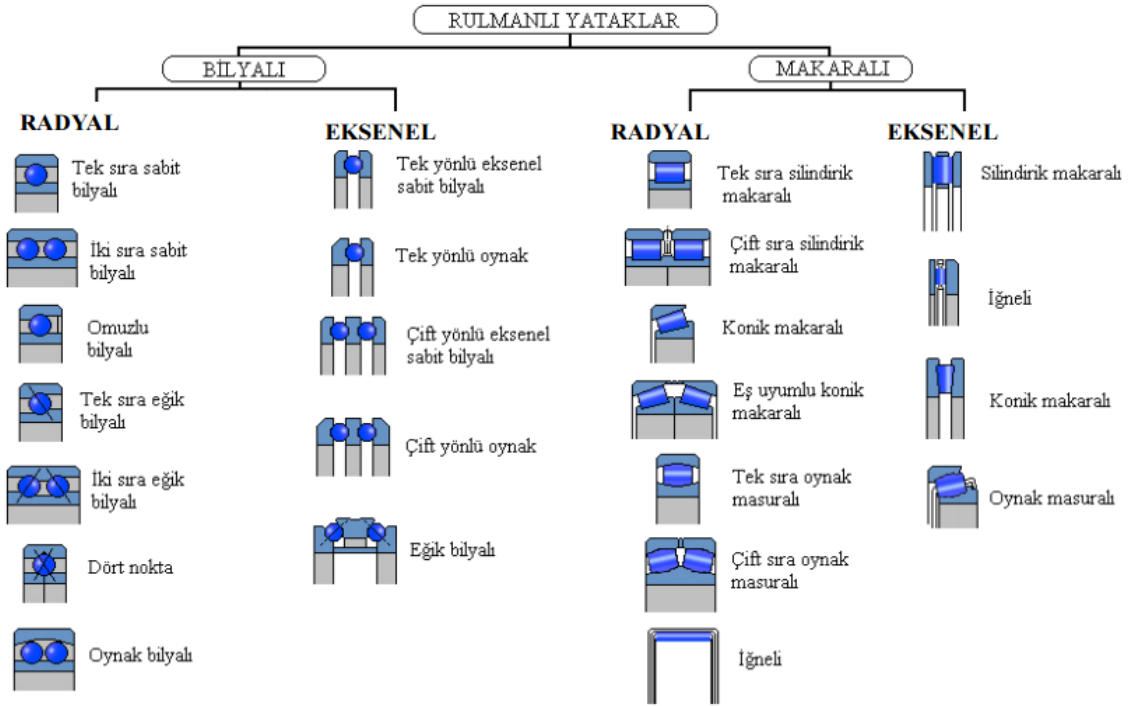
Kılavuz ringi kullanılmasının amacı; rulmanda yuvarlanma elemanlarına kılavuzluk yaparak mil ile paralel dönmesini sağlamak ve yükleri eşit dağıtmaktır.

2.3. Rulmanlı Yatak Tipleri

Yataklar, kaymalı ve rulmanlı olmak üzere iki çeşittir. Kaymalı yataklarda yüzeyler arasında kayma hareketi ve rulmanlarda ise yüzeyler arasında yuvarlanma hareketi vardır.



Şekil 2.2. Yatak tipleri (Sakarya Üniversitesi Makine Elemanları II Ders Notu Doç.Dr. Akın Oğuz Kaptı)



Şekil 2.3. Rulmanlı yatakların sınıflandırılması (DEÜ Makina Elemanlarına Giriş Ç.

Özes, M. Belevi, M. Demirsoy)

Rulmanlı yataklar; mil üzerine sıkı geçen bir iç bilezik ile gövdeye sıkı geçen bir dış bilezik arasında, kafes içinde çalışan bilya, silindirik makara, konik makara, fiç makara ve iğne şeklindeki yuvarlanma elemanlarından oluşan yataklama elemanlarıdır.

Kayma sürtünmesini yuvarlanma sürtünmesine dönüştürerek makinenin i sürtünme kaybını azaltırlar. Makine boyutlarının daha küçük olmasına imkn verirler. Yağlama gereksinimleri düşük, ömürleri uzundur. Mil malzemesinden bağımsız olduğundan sarma tehlikesi yoktur.

Rulmanlı yatakları yuvarlanma elemanlarının Şekline göre, “bilyalı ve makaralı” taşıyabileceği yüklere göre de “radyal ve eksenel” olarak sınıflandırabiliriz. Makaralı yuvarlanma elemanlarının silindirik, konik, iğne ve masura Şeklinde olması da alt sınıflandırma gruplarında dikkate alınır.

2.3.1. Sabit Bilyalı Rulman: Radyal kuvvetleri ve çift yönlü küçük eksenel kuvvetleri taşıyabilir. Piyasadaki en ucuz, en yaygın kullanımı olan, en basit rulman tipidir. İ ve dış bilezikteki makara oyuğu derin olduğu için bir miktar eksenel yük alabilirler. Orta büyüklükteki elektrik motorlarında bu tip rulmanlar kullanılır.

2.3.2. Oynak Bilyalı Rulman: Mil ekseninin 5° ye kadar aı yapmasına müsaade edilmesi istenen, milin eğilme ihtimalinin olduğu yerlerde kullanılır. Bu rulmanlarda iki sıra bilya vardır. Bu rulmanların en önemli özelliği boyuna eksenel aılanmalarına (eksen kaymasına) müsaade etmeleridir. Böylece Őafttan gelen moment rulmana taınmamı olur ve rulman hasarı oluşmaz. Bu durum aynı zamanda montaj hatalarından kaynaklanabilecek eksen kaymalarını da kompanse eder.

2.3.3. Eğik Bilyalı Rulman: Sadece bir yönde gelen eksenel kuvvetleri taşıyabilir. Bu rulmanlar diğer makaralı rulmanlara göre daha fazla eksenel yük taşıyabilecek Şekilde i ve dış bileziklerindeki bilya oyukları birbirlerine göre eksenel yönde simetrik olacak Şekilde dizayn edilmişlerdir. Eksenel yük taşıma kapasiteleri bu oyukların bilyalarla temas açıları ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu rulmanların diğer avantajı ise yüksek çalışma hassasiyetleri olmasıdır.

2.3.4. Eksenel Bilyalı Rulman: Burulmalara Türkiye’de BTE de denilmektedir. Bunlar sadece eksenel yük altında dönmesi gereken makinalarda kullanılırlar. BTE’lerde iki tarafta yuva, arada ise bilyalar ve kafes bulunur. Yuva ve makaralar ayrılabilir olduğu için sklp takılmaları çok kolaydır. Btelerin yuva alınları düz

olduğu gibi bazı tiplerde küresel oynamalara imkan verecek şekilde alın yarı küre şeklinde de üretilir. Büteler aksnel yükü sadece bir yönde taşıyacak ise bir sıra makaralı olan büteler kullanılabilir. Ancak aksnel yük her iki yönde de etki ediyorsa çift sıra makaralı büte kullanılması gerekir. Çift sıra bilyalı bütelerde kafesleri ile birlikte iki sıra makara, iki sıra arasında iki tarafı oyuk bir makara yuvası ve dışlarda iki adet birer tarafı oyuk makara yuvası bulunur. Bunların da aksnel oynamalarına imkan vermek için dış yuvaların alınları küresel olabilir.

2.3.5. Silindirik Makaralı Rulman: Bu rulmanların iki önemli temel karakteristik özelliği vardır. Bunlar;

1- Çok yüksek radyal yük taşımalarına karşın aksnel yük taşıyamazlar.

2- Aksnel yönde kaymalara müsaade ederler. Bu özellik termal genleşmelerden kaynaklanan şaft uzamasını kompanse etmek açısından önemlidir.

Silindirik makaralı rulmanlar tek ve çift sıralı olarak temin edilebilirler.

2.3.6. Oynak Makaralı Rulman: Çok ağır yük altında çalışabilirler ve aksnel dönmelere imkan verdikleri için şaft üzerinden moment almazlar. Bir şaftın iki ucunda bu rulman kullanılmışsa rulman iç bileziği şafta ortadan binen yükün yarattığı sehime uyum sağlar.

2.3.7. Konik Makaralı Rulman: Radyal kuvvetleri ve sadece tek yönde etkileyen aksnel kuvvetleri taşıyabilir. İç ve dış bileziklerindeki makara yuvaları konik olan rulmanlardır. Konik oyukların iç ve dış bileziklerdeki çizgisel uzantıları rulman ekseninde birbirleri ile çakışacak şekilde imal edilirler. Bu rulmanların en önemli özelliği hem çok büyük radyal yükler, hem de çok büyük aksnel yükler taşıyabilme kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu rulmanlarda dış bilezik genellikle ayrılabilir yapıdadır. İç bilezik makaralar birlikte, dış bilezik ise bunlardan ayrılabilir yapıdadır. Bu özeliğinden ötürü konik makaralı rulmanların montajı sırasında iç ve dış bileziklerin bir birlerine göre olan konumunu iyi ayarlamak önem kazanmaktadır. İç ve dış bileziklerin birbirlerine göre aksnel yönde olması gereken konum belli bir miktar ön yük yaratacak durumda olmalıdır. Eğer bu ön yük verilmez ise rulman çok gevşek

olacağından rulmanın çalışma hassasiyeti azalır. İç ve dış bilezik birbirlerine aksel olarak olması gerekenden daha yakın olursa bu sefer rulman çok sıkı olacağından aşırı sürtünme ve ısınmaya neden olur. Bu nedenle uygun konumu tespit için bir aparat yardımı ile montaj yapmak yararlı olur.

2.3.8. Aksel Makaralı Rulman: Aksel silindirik makaralı rulmanlar (Makaralı büte) çok büyük aksel yükler söz konusu olduğunda kullanılırlar. Örnek : 120 Ton yük kaldırması gereken vincin döner kancası. Bu rulmanlar aynı zamanda çok büyük aksel şok darbelerine dayanabilirler. Bu rulmanlar sadece bir yöndeki aksel yükleri taşırlar. Eğer aksel yük her iki yönde de varsa ikinci bir büte kullanılması veya çift sıralı büte kullanılması gerekir. Bütelere de her iki taraftaki flanşlar ve kafes içindeki makaralar birbirinden ayrılabilir yapıdadır. Bu rulmanların en büyük dezavantajı aksel açılmalara müsait olmamaları ve radyal yük taşıyamamalarıdır.

2.4. Rulman Malzemeleri

Rulman üretim endüstrisinde birbirinden farklı rulman parçalarının üretimi için çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler, rulman performans ve ömrünü arttırmak ve istenilen diğer özellikleri elde edilebilmek için işlenmektedirler. Bu konuda bahsedeceğimiz malzemeler sanayide en sık kullanılanlardır.

Paslanmaz Çelik (Krom çelik) Rulman – SAE 52100 (çelik derecesi)

Hassas bilyalı rulmanlar ile silindirik ve konik makaralı rulmanlar için yük taşıyan bileşenlerin üretiminde en çok kullanılan malzeme “52100 paslanmaz çeliği”dir. Bu bileşenler dış bilezik, iç bilezik, bilyalar ve makaralardır. Kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi yüksek oranda karbon ve %1.5 oranında krom içermektedir. Kontrollü süreç ve ısıtım işlem metotları kullanılarak üretilen rulman parçaları çatlak oluşumuna karşı yüksek mukavemete sahiptirler ve ayrıca alt yüzeylerde yuvarlanma sonucu oluşan temas yorgunluğuna karşı yüksek direnç ortaya koyan sert yüzeye sahiptirler. Bu malzemedен üretilen rulman bileşenlerinin karakteristik yüzey sertliği 60-64 derece arasında (Rockwell C sertlik skalası – Rc) değişmektedir.

Ekstra Temiz 52100 Paslanmaz Çelik

Yüksek hassasiyete sahip minyatür rulmanlarda kullanılan saf çelik ilave eritme işlemlerine tabi tutulur. Sonuç olarak çok düzgün ve ince taneli malzeme yapısına sahip bir çelik türü elde edilerek rulman temas yüzeyleri mükemmel seviyede pürüzsüz olarak islenebilmektedir ve böylelikle rulman gürültüsü de (çalışma esnasındaki ses seviyesi) çok düşük seviyededir.

Krom çelik için en yaygın ısıtma işlem yöntemi, çeliğin kontrollü bir atmosfer fırınında sertleştirilmesidir. Krom çelikten imal edilen yataklar 120 ° C'ye kadar sürekli sıcaklıklarda çalışabilir.

Daha yüksek sıcaklıklarla karşılaşıldığında, rulman bileşenlerinde “Isı Dengelemesi” yapmak mümkündür. Rulmanlar ısıtma işlem süreci değiştirilerek üretilebilmektedir, böylece 220°C ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler. Bu uygulamalar için bileşenler, çalışma sıcaklığına karşılık gelenden daha yüksek bir sıcaklıkta tavlama işlemine tabi tutulmaları gerekmektedir. Bu şekilde arttırılan tavlama işlemi malzemenin sertliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir ve yatağın yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır.

SAE 52100 mükemmel genel amaçlı yatak çeliğidir. Mükemmel sertlik ve aşınma direncine sahip olduğu için, bilyalı rulmanlarda iyi yorulma ömrü gösterir. Ancak, krom çeliğin korozyon direnci düşük krom içeriği nedeniyle zayıftır. Yatakların yüzeyleri paslanmayı önlemek için bir pas önleyici kaplama veya yağ ile korunmalıdır.

Paslanmaz Çelik Rulmanlar

Paslanmaz çelik malzemeler rulman bileşenleri yapımında kullanılmaktadır, çünkü yüksek miktarda krom içeriği (~% 18) ve nikel ilavesi ile yüzey korozyonuna karşı daha dayanıklıdır. Krom, oksijen ile reaksiyona girer ve pasif bir film meydana getirerek yüzeyde bir krom oksit tabakası oluşturur.

Martenzitik Paslanmaz Çelik – AISI 440C

400 serisi paslanmaz çeliklerin karbon içeriği yeterince yüksektir, bu nedenle Rc58'e kadar standart ısıyla muamele yöntemleri kullanılarak sertleştirilebilir. Düşük seviyedeki sertlik nedeniyle, 52100 krom çelik rulmanlara kıyasla, bu malzemedan yapılmış rulmanlarda yük taşıma kapasitesi % 20 daha düşüktür. Karbon içerik seviyesi bileşenlerin manyetik olduğu anlamına gelir. 440C malzeme tatlı suya ve hafif kimyasallara maruz kaldığında korozyon direnci "iyi" dir.

Geleneksel 440C paslanmaz çeliğinden imal edilen minyatür rulmanlar nispeten gürültülüdürler, çünkü normal olarak parçacık seviyesinde oluşan büyük karpitler yüzey bitirme işlemi esnasında ortaya çıkmaktadır. Daha büyük rulman yatakları ise bu durumdan etkilenmezler. 400 serisi paslanmaz çelikten yapılmış rulmanlar kromlu çelikten daha yüksek sıcaklıklarda, 250° C'ye kadar sürekli çalışabilir.

Bu malzemedan rulmanlar genellikle krom çelik rulmanlardan daha pahalıdır.

Martenzitik Paslanmaz Çelik – ACD34 / KS440 / X65Cr13

Birçok minyatür rulman üreticisi, yüzük ve bilyalarını, ACD34, KS440 ve X65Cr13 gibi çeşitli isimler altında bilinen AISI 440C'den biraz daha düşük karbon ve krom içeriğine sahip paslanmaz çelik bir malzeme ile hazırlar. Isıl işlemten sonra bu malzeme daha küçük karbürlere sahiptir, bu nedenle rulman 440C ile aynı korozyon direnci sunarken üstün düşük gürültü özelliklerine sahiptir. Bu malzemedan üretilen yataklar için, bazı üreticiler krom çeliğiyle aynı yük derecelendirmesini yayımlayacaklardır. Bunun nedeni, sertliği Rc 60'a kadar çıkan sıkı kontrollü ısıl işlem yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bilyalı rulmanlar için en yaygın kullanılan paslanmaz çeliklerden biri olmasına rağmen, bu malzeme için AISI belirlemesi bulunmamaktadır.

Martenzitik Paslanmaz Çelik – SV30

Martenzitik paslanmaz çelik, karbon içeriğini düşürerek ve nitrojeni bir alaşım elementi olarak işleme sokarak ham çeliğin işlenmesi sırasında modifiye edilebilir. Nitrojen, krom karbürleri yerine krom nitrürlere dönüşen kromun doyumunu artırır. Sonuç, bazı uygulamalarda yorulma ömrünü % 100 (iki misli) uzatan üstün mikro yapı beraberinde

yüksek mukavemet ve sertliğe sahip bir çeliktir. Bu malzeme aynı zamanda 440C'den ve ACD34'den 5 kat daha iyi korozyon direnci sunar. Bu malzemeden üretilen rulmanlar % 20-40'lık bir fiyat primine sahiptirler, fakat çoğu zaman üstün performans ile getirdikleri kazançlar ile bunu telafi etmektedirler.

AISI316 Östenitik Paslanmaz Çelik

300 serisi paslanmaz çelik malzemelerden yapılmış rulman parçaları, daha düşük korozyon direncine sahiptir ve düşük karbon içeriğinden dolayı manyetik değildir. Fakat, önemli bir husus bu malzemenin sertleştirilememesi ve bu sebepten dolayı da rulmanların yalnızca düşük yük ve hız altında çalışabilmeleridir. Rulman yüzeyleri, pasifleştirme işlemi adı verilen oksijenle kimyasal işleme tabi tutularak oluşturulan pasif film sayesinde rulman korozyondan korunur. Korozyon direnci, rulman sıvının tamamen altında (sualtı uygulamaları gibi) kalmadığı durumlarda en iyisidir. Bu malzemeden yapılan rulmanlar genellikle minimum miktarları gerektiren özel sipariş öğeleridir ve de daha pahalıdır.

Karbon Alaşımli Çelikten Rulmanlar

Karbon çelik malzemeler rulmanların çeşitli bileşenlerini üretmek için kullanılmaktadır ve iki temel türleri vardır: Orta Karbon Alaşımli Çelik ile Düşük Karbon Alaşımli Çelik.

Seramik Malzemelerden Yapılan Rulmanlar

Seramik malzemelerden imal rulmanlar bu endüstrisinde özel bir alanda yer alırlar. En yaygın uygulama, genellikle paslanmaz çelik yüzükler ile seramik bilyalar içeren hibrit rulman şeklindedir. Kullanılan en yaygın seramik malzeme silisyum nitrittir. Bu malzemeden yapılmış makaralar Rc78 seviyesine kadar sertliğe sahiptirler ve aynı zamanda çok düzgün bir yüzeye sahiplerdir. Hibrit rulmanlar tüm paslanmaz çelik rulmanlardan daha pahalıdır.

Çelik malzemeden imal edilmiş standart rulmanların kullanımı bir takım problemler çıkardığında, seramik makaralar ve çelik bileziklerden oluşan hibrit rulmanlar ya da tamamen seramik malzemelerden oluşan rulmanların kullanımı söz konusudur.

Tamamen çelik rulmanlarla karşılaştırıldığında, seramik rulmanlar genel olarak daha yüksek verimlilik, daha yüksek hız, daha yüksek güvenilirlik, daha yüksek ölçü hassasiyeti, daha fazla rijitlik, daha uzun ömür, marjinal yağlama, daha düşük sürtünme, korozyona direnç, elektriksel yalıtıklık ve daha az bakım özellikleriyle gereksinimleri daha kolay karşılayabilir. Tamamen veya kısmen seramik rulmanların birim fiyatı tamamen çelik rulmanlara göre fazla ise de, tüm konstrüksiyon dikkate alındığında bu elemanlarla ekonomik çözümlere ulaşılabilir (Rende ve Hanyaloğlu, 2012; Wang ve ark., 2000).

Tamamen seramik malzemeden yapılmış makaralı rulmanlarda bilezikler ve makaralar yüksek tribolojik özellikler gösteren Silisyum Nitrür, Zirkonyum Oksit veya Silisyum karbürden yapılır. Kafesler seramikten veya PEEK, PTFE gibi kompozit malzemelerden yapılabilir. Zirkonyum oksit mekanik ve termik özellikleri çelik malzemeye yakın olup son derece dayanıklı bir malzemedir. Seramik rulmanlar çelik rulmanların % 40'ı mertebesinde bir ağırlığa sahiptir (<https://www.ortechceramics.com/product-category/ceramic-bearings/>).

2.5. Rulmanların Yağlanması

Rulmanlarda yuvarlanma elemanları, iç – dış bilezikler ve kafes arasındaki direkt metalik teması önlemek için bu kısımlar yağlanmalıdır. Yağlama ile aynı zamanda bu kısımlar aşınmaya ve korozyona karşı korunmuş olur. Yağların yağlama kabiliyeti mekanik zorlanmalar ısı, nem ve diğer nedenlerle zamanla azalır. Bu yüzden kirlenen ve eksilen yağlar zamanında yenilenmeli ve tamamlanmalıdır. Rulmanlar ya gres yağı ya da sıvı yağ ile yağlanırlar.



Şekil 2.4. Rulmanların yağlanması (<https://www.makinaegitimi.com/rulmanlarin-yaglanmasi/>)

Oynak makaralı rulmanlar yapıları gereği sıvı yağ ile yağlanmalıdır. Bu tür rulmanlarda ancak düşük devir sayılarında gres yağı kullanılır. Normal şartlarda, rulmanlarda yağlama için gres yağı kullanılır. Çünkü gres yağı toz, sıvı ve pisliklere karşı yatakları sızdırmaz hale getirir ve akıcı olmadığından yatak bölgelerinde tutulmaları kolaydır.

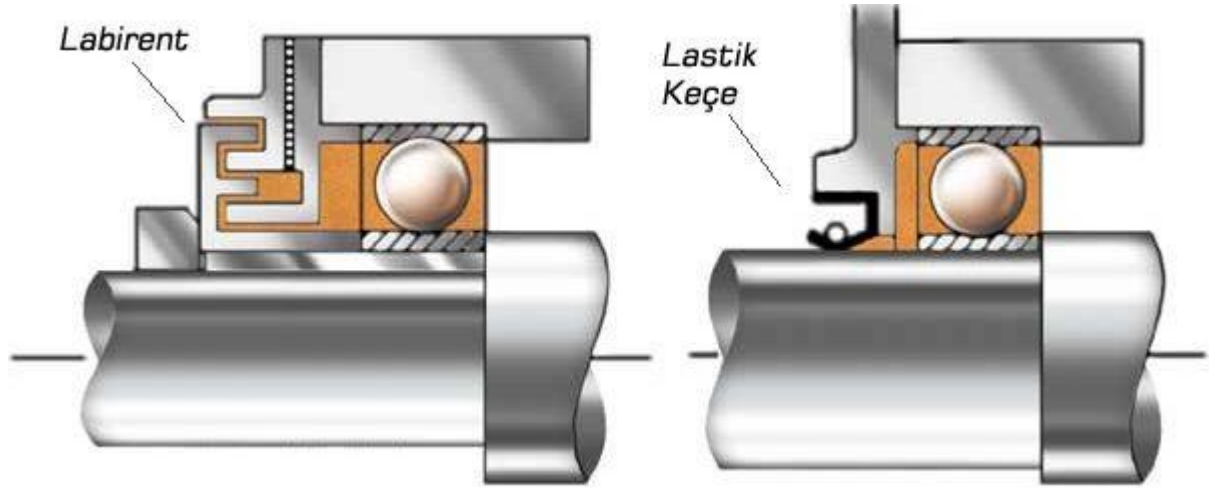
Rulmanların yağlama periyotları ilgili kataloglarında verilmektedir. Küçük rulmanlarda, özellikle sabit bilyalı rulmanlarda yağlama periyodu çok uzundur. Bu süre yatağın ömründen uzun ve en az o kadar olduğunda içi gres yağı ile doldurulduktan sonra metal veya plastik kapakla kapatılmış rulmanlar kullanılabilir. Gres yağı ile sık yağlama yapılırsa rulman yuvasına yağlama deliği açılarak ucuna gresörlük takılmalıdır.

Yüksek devirde ve yüksek ısıda çalışan rulmanlarda yağlama için sıvı yağ kullanılır. Düşüş devirde çalışan rulmanların sıvı yağ ile yağlanması “yağ banyosu” aracılığı ile olur. Rulmanların bulunduğu makine düzeneğinin alt kısmında belirli bir yükseklikte (en alttaki rulman yuvarlanma elemanının ortasından biraz aşağıda) olmalıdır. Rulman dönerken rulman yuvarlanma elemanları sıra ile bu yağ banyosuna dalarak yağlanırlar. Rulmanların bulunduğu makine düzeneğindeki, örneğin bir dişli kutusundaki dişliler için kullanılan yağ banyosu aynı zamanda rulmanların yağlanması için kullanılabilir.

Yüksek devirle çalışan rulmanların yağlanması yağ pompası ile yapılır. Çalışma esnasında yüksek devirden dolayı ısınan yağ devridaim yağ pompası yardımıyla rulman bölgesinden alınarak hem temizlenmiş olarak, hem de soğutulmuş olarak tekrar rulmanlar üzerine püskürtülür.

Rulmanların Sızdırmazlığının Sağlanması

Rulmanların çalıştığı bölgelerden dışarı yağların çıkmaması için, ayrıca dışarıdan rulmanların çalıştığı bölgeye, toz, pislik, su ve yabancı sıvıların girmemesi için bu kısımların sızdırmazlığı sağlanmalıdır. Rulman sızdırmazlıkları, bazı makine parçaları ve sistemler için çok önemli bir konudur. Hazır kapaklı rulmanların dışında, diğer rulmanların bulunduğu kısımların sızdırmazlığı genellikle aşağıda gösterildiği şekilde sağlanmaktadır. Aşağıdaki şekillerde gres yağı için kullanılan temassız rulman sızdırmazlıkları görülmektedir.



Şekil 2.5. Rulmanlarda sızdırmazlık (<https://www.makinaegitimi.com/rulmanlarin-yaglanmasi/>)

Rulmanlarda gres yağının sızdırmazlığı ve gres yağının koruma amaçlı olarak lastik ya da kauçuk -lastik sızdırmazlık elemanları kullanılır. Genellikle gres yağı için kapak içine yerleştirilmiş yün keçe, sıvı yağın rulman sızdırmazlığı için ise kapak içine yerleştirilmiş bir lastik keçe kullanılır.

2.6. Rulman Yük Değerleri ve Rulman Ömrü

Rulman yükü, rulman seçimi için önemli bir temeldir. Rulman üreticileri iki temel yük derecesi sağlar: temel statik yük derecesi ve temel dinamik yük derecesi. Dinamik yük katsayısı kavramı, rulman arızasının yorulma niteliğini yansıtacak şekilde sunulmuştur. Yuvarlanma temas yorulması, tekrarlanan gerilmeler nedeniyle üst veya alt yüzey katmanında meydana gelen benzersiz bir malzeme arızasıdır. Taşıyıcı malzemenin mikro ölçekli homojen olmadığı için, yatak malzemesinin yorulma dayanımı noktadan noktaya değişmektedir. Laboratuvar testleri ve tecrübeler birbirinin tamamen aynı olan rulmanların, tamamen aynı şartlarında farklı ömürlere sahip olduğunu göstermiştir. Temel statik yük katsayısı, dönmeyen bir yatağa uygulanabilecek izin verilen maksimum yükü belirlemek için kullanılır. Statik radyal yük derecesi C_0 ve statik itme yük derecesi C_{0a} , sırasıyla 180° ve 360° yük bölgesi olan dönmeyen bir rulmandaki

kontakın ortasındaki yuvarlanma elemanı ile yatak yuvarlanma yolu arasındaki maksimum temas gerilimine dayanır.

Dinamik yük sayısı; yatakların %90'nın 1 milyon (10^6) devir süresinde dayandığı yük veya bir milyon devirlik nominal ömre eriştiği yük olarak tanımlanır. Radyal rulmanlar için temel dinamik yük katsayısı, merkezi bir radyal yüküdür. Sabit yön, C_1 ile belirtilirken, itme yatakları için temel dinamik yük oranı, merkezi eksenel ile aynı yönde bir eksenel yük oluşturur ve C_{1a} ile belirtilir.

Dinamik eş değer yük; (P) Rulmanlı yataklar aynı anda hem radyal (F_r), hemde eksenel (F_a) yani kombine kuvvetlerin etkisinde kalabilir. Dinamik eşdeğer yük, yorulma bakımından kombine yük gibi tesir eden, radyal yataklarda radyal, eksenel yataklarda ise eksenel bir yüküdür.

$$P = XF_r + YF_a \quad (2.6.1)$$

X ve Y değerleri ISO 281-1990 ve belirli rulmanlar için rulman kataloglarında verilmiştir.

Çizelge 2.1. Radyal (X) ve Eksenel (Y) Yük Katsayısı

Bearing type	e	Single acting		Double acting				
		$\frac{P_a}{P_r} > e$		$\frac{P_a}{P_r} \leq e$		$\frac{P_a}{P_r} > e$		
		X	Y	X	Y	X	Y	
Thrust ball	$\beta = 45^\circ$	1.25	0.66	1	1.18	0.59	0.66	1
	$\beta = 60^\circ$	2.17	0.92	1	1.90	0.55	0.92	1
	$\beta = 75^\circ$	4.67	1.66	1	3.89	0.52	1.66	1
Spherical roller thrust	$1.5 \tan \beta$	$\tan \beta$	1	$1.5 \tan \beta$	0.67	$\tan \beta$	1	
Tapered roller	$1.5 \tan \beta$	$\tan \beta$	1	$1.5 \tan \beta$	0.67	$\tan \beta$	1	

Ömür : Bir rulmanın bileziklerinden birinde veya yuvarlanma elemanlarında yorulma meydana gelinceye kadar dayandığı toplam dayanma sayısıdır.

Gerçek Ömür: Bilezik veya yuvarlanma elemanlarında ilk yorulma belirtileri oluşuncaya kadar geçen süredir.

Nominal Ömür: Yatakların %90'nın herhangi bir kısmında yorulma belirtileri göstermeksizin eriştiği ve aştığı ömürdür.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \quad (2.6.2)$$

L: 10^6 olarak ömür

P: kgf olarak eşdeğer yük

C: dinamik yük sayısı

n: Ömür katsayısı (bilyalı yataklarda $n=3$, makaralı yataklarda $n=10/3$ alınmaktadır.)

Sabit hızda çalışan rulmanlarda, yorulma ömrünü saat olarak ifade etmek uygundur. Genelde, otomobil ve diğer araçlarda kullanılan rulmanların yorulma ömrü kilometre olarak verilmiştir.

Temel rulman ömrünü L_h (saat,h), rulman hızını n (dk^{-1}), yorulma faktörünü f_h , ve hız faktörünü f_n , olarak belirleyerek;

Temel rulman ömrünü L_h (saat,h) ;

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^n \quad (2.6.3)$$

Yorulma ömrü faktörü f_h ;

$$f_h = f_n \frac{C}{P} \quad (2.6.4)$$

Hız faktörü ;

$$f_n = \left(\frac{10^6}{500 \times 60n}\right)^n = (0,03n)^n \quad (2.6.5)$$

n: Ömür katsayısı (bilyalı yataklarda $n=3$, makaralı yataklarda $n=10/3$ alınmaktadır.)

Yorulma faktörü f_h , ve hız faktörü f_n firma kataloglarından tespit edilebilir.

Rulman yükü P ve hızı n biliniyorsa, makinanın tahmini ömrü için uygun yorulma ömrü faktörü f_h 'yi belirleyiniz ve sonra aşağıdaki denklem aracılığıyla temel yük değeri C 'yi hesaplayınız.

$$C = \frac{f_h}{f_n} x P \quad (2.6.6)$$

Daha sonra, rulman tablolarından bu C değerini karşılayan bir rulman seçilmelidir.

L_{10} ömrü, %90 istatistikî güvenilirlik ile temel rulman ömrü olarak tanımlanır. Gerçek rulman çalışma koşulları, temel dinamik yük değerlerinin tespit edildiği referans koşullarından belirgin şekilde değişebilir. Güvenilirlik gereksinimi, yatak malzemesi kalitesi ve işlenmesi, çalışma koşulları ve arıza kriterleri gibi çevre farklılıklarının nicel değerlendirilmesine izin vermek için, rulman üreticileri tarafından ayarlama faktörleri getirilmiştir. ISO 281-1990, düzeltilmiş ömrü vermek için üç faktörü aşağıdaki denklemde birleştirir.

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10} \quad (2.6.7)$$

Rulman malzemesindeki son zamanlardaki gelişmeler yorulma ömrünü büyük ölçüde uzatmıştır. Ayrıca, elastohidrodinamik yağlama kuramının geliştirilmesi, bilezikler ile yuvarlanma elemanları arasındaki temas bölgesindeki yağlama filminin kalınlığının rulman ömrünü büyük ölçüde etkilediğini kanıtlar.

L_{na} , devirlerde ayarlanmış yatak ömrüdür ve a_1 , a_2 ve a_3 , ömür ayar faktörleridir. Ömür düzeltme faktörlerinin tanımı ve her bir faktöre dahil edilen değişkenler aşağıda verilmiştir.

a_1 = Güvenilirlik için ömür ayar faktörü

a_2 = malzeme kalitesini ve üretim teknolojisini dikkate alan düzeltme faktörü (URB rulmanlarının üretiminde kullanılan malzeme ve teknolojiler için $a_2 = 1$)

a_3 = çalışma şartlarını ve yağlama kalitesini dikkate alan düzeltme faktörü.

Güvenilirlik için ömür ayar faktörü a_1 , %90'dan daha yüksek güvenilirlikler için aşağıda verilmiştir.

Çizelge 2.2. Güvenilirlik için ömür ayar faktörü a_1

Güvenilirlik (%)	90	95	96	97	98	99
a_1	1.00	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

Özel rulman nitelik faktörü a_2 de çalışma koşullarından etkilendiğinden, a_2 ve a_3 'ü bir miktar($a_2 \times a_3$), olarak birleştirme ve bunları ayrı ayrı düşünmeme önerisi vardır. Bu durumda, normal yağlama ve çalışma koşulları altında, ürün ($a_2 \times a_3$) bire eşit varsayılmalıdır. Ancak, yağın viskozitesi çok düşükse, değer 0.2'ye kadar düşer.

Eksenel kaçıklığı yoksa ve yeterli yağ filmi elde edilmesi için yüksek viskoziteli yağ kullanılırsa, ($a_2 \times a_3$) ürünü yaklaşık 2 olabilir.

Çizelge 2.3. Düzeltme faktörü a_{2-3}

v/v_1	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2	3	4	5
a_{23}	0,45	0,55	0,75	1	1,3	1,6	2	2,5	2,5

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Elastohidrokinamik yağlama, yatak yüzeylerinin elastik deformasyonunun belirgin hale geldiği bir sıvı-film yağlama şeklidir. Genellikle yuvarlanan yataklar gibi yüksek gerilmeli makine parçalarıyla ilişkilendirilir. Tarihsel olarak, elastohidrokinamik yağlama, yirminci yüzyıldaki yağlama alanındaki ana gelişmelerden biri olarak görülebilir. Pürüzsüz yüzeyler için oldukça geliştirilen elastohidrokinamik yağlama teorisiyle film kalınlıkları ve basınç profilleri iyi bir doğrulukla bulunabilmektedir.

Elastohidrokinamik yağlamada kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir.

Reynolds eşitliği;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = 12u \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) \quad (3.1)$$

Buradan ;

$$u = \frac{u_a + u_b}{2} \quad (3.2)$$

Viskozite değişkeni ;

$$\eta = \eta_0 e^{\xi \rho} \quad (3.3)$$

Burada η_0 atmosferik basınçta mutlak veya dinamik viskozite katsayısı ve ξ akışkanın basınç-viskozite katsayısıdır.

Yoğunluk değişkeni ; (mineral yağlar için)

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0,6p}{1+1,7p} \right) \quad (3.4)$$

Burada ρ_0 atmosferik koşullardaki yoğunluk.

Elastiklik denklemi,

$$\delta = \frac{2}{E'} \iint_A \frac{p(x,y)dxdy}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} \quad (3.5)$$

Buradan;

$$E' = \frac{2}{\frac{(1-\nu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\nu_b^2)}{E_b}} \quad (3.6)$$

Film kalınlığı eşitliği;

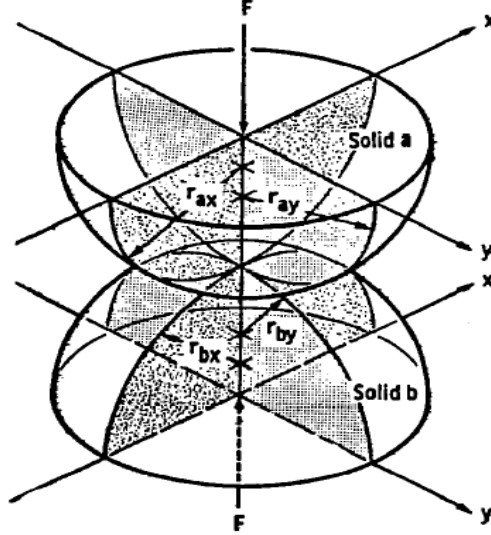
$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + \delta(x,y) \quad (3.7)$$

Burada;

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}} \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{r_{ay}} + \frac{1}{r_{by}} \quad (3.9)$$

Denklemlerde (4.8) ve (4.9) ifade edilen farklı yarıçaplar Şekil 4.1 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Elastik katıların temas geometrisi (Hamrock, B.J.,Schmid, S.R., Jacobson, B.O. (2006) *Fundamentals of Machine Elements*, McGraw-Hill, International Edition, Singapore. (13. Bölüm)

Elastohidrodinamik yağlama çözeltisi, aynı zamanda, basıncın akışkanın özellikleri üzerinde ve elastik katıların geometrisi üzerinde etkilerinin oluşmasına izin vererek, aynı zamanda birleşim içindeki basınç dağılımının hesaplanmasını gerektirir. Çözelti ayrıca kayganlaştırıcı filmin şeklini, özellikle de katılar arasındaki minimum boşluğu sağlayacaktır. Kullanılabilecek esneklik modelinin ayrıntılı bir açıklaması Dowson ve Hamrock (1976) tarafından verilmiş, tam elastohidrodinamik yağlama teorisi Hamrock ve Dowson (1976) tarafından verilmiştir.

Yukarıda yazılan denklemlerden 5 farklı boyutsuz denklem elde edilir.

Boyutsuz film kalınlığı;

$$H = \frac{h}{R_x} \quad (3.10)$$

Eliptiklik parametresi;

$$k_e = \frac{D_y}{D_x} = \left(\frac{R_y}{R_x}\right)^{2/\pi} \quad (3.11)$$

Boyutsuz yük parametresi;

$$W = \frac{P}{E R_x^2} \quad (3.12)$$

Boyutsuz hız parametresi;

$$U = \frac{\eta_0 u}{E' R_x} \quad (3.13)$$

Boyutsuz malzeme parametresi;

$$G = \xi E' \quad (3.14)$$

Minimum film kalınlığı diğer dört denklemin fonksiyonu olarak yazılabilir.

Elastohidrodinamik yağlama teorisinin en önemli pratik yönü, bir kombinasyon içindeki minimum film kalınlığının belirlenmesidir. Yani, akışkan film kalınlığının yeterli büyüklükte tutulması, yuvarlanma elemanı yatakları gibi makine elemanlarının

çalışması için son derece önemlidir. Spesifik olarak, elastohidrodinamik film kalınlığı, yorulma ömrünü etkiler.

Hamrock ve Dowson ve diğerlerinde belirtilen sayısal prosedürler kullanılarak, eliptiklik parametresi ve boyutsuz hız, yük ve malzeme parametrelerinin minimum film kalınlığı üzerindeki etkisi Hamrock ve Dowson (1977) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada otuz dört farklı durum değerlendirilmiştir. Elde edilen minimum film kalınlığı denklemi ;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}(1 - e^{-0,68k_e}) \quad (3.15)$$

Bu denklemde en baskın katsayı, hız parametresinde meydana gelir. Yük parametresindeki katsayı çok küçük ve negatiftir. Malzeme parametresi, mühendislik durumlarında bu değişkenin sınırlı olsa da, önemli bir katsayı değeri taşır.

Benzer şekilde, dikdörtgen temaslar için boyutsuz minimum film kalınlığı formülü,

$$H_{min} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128} \quad (3.16)$$

Burada;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} \quad (3.17)$$

P_z' birim genişlik başına normal uygulanan yüküdür. Denklemler (3.16) ve (3.17) Hamrock ve Dowson'da (1976) belirtilen sayısal prosedürler kullanılarak, elipsite parametresinin etkisi ve minimum film kalınlığı üzerindeki boyutsuz hız, yük ve malzeme parametreleri Hamrock ve Dowson (1977) tarafından incelenmiştir.

Boyutsuz hız parametresi U, yaklaşık iki büyüklük sırasına ve boyutsuz yük parametresi W'ye bir aralık boyunca değişmiştir. Boyutsuz malzeme parametresi G'nin rolünün araştırılmasında, bronz, çelik ve silikon nitrür katı maddelerin ve parafinik ve naftenik yağların kayganlaştırıcı maddelerinin kullanılmasına eşdeğer durumlar göz önüne alınmıştır. (Hamrock ve Dowson (1977)) Bu durumda boyutsuz minimum film kalınlığı;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}(1 - e^{-0,68k_e}) \quad (3.18)$$

Hamrock-Dowson denklemleri olarak bilinir ve makaralı rulmanlar, dişliler, kamlar, vb. gibi elastohidrodinamik olarak yağlanmış gövdelere uygulanabilir.

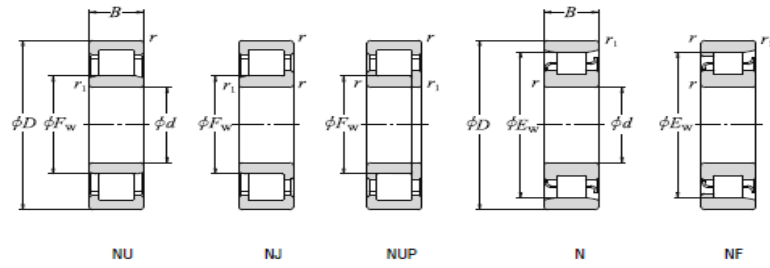
Film kalınlığının kompozit yüzey pürüzlülüğüne (R_q) bölünmesiyle boyutsuz film parametresi bulunmuştur.

$$\lambda = \frac{h_{min}}{R_q} = \frac{h_{min}}{(R_{q_a}^2 + R_{q_b}^2)^{1/2}} \quad (3.19)$$

4. BULGULAR

Piyasada kullanılan silindirik makaralı rulman standartlarından seçim yapılarak elastohidrokinamik yağlama bölümünde geliştirilen formüllerle iç ve dış minimum film kalınlıkları üzerinde teorik hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Silindirik makaralı rulman kataloğu (NSK Rulman Kataloğu)



d	Temel Ölçüler (mm)						Temel Yük Değerleri (N)		Limit Hızları ⁽¹⁾ (dak ⁻¹)	
	D	B	r min.	r ₁ min.	F _w	E _w	C _r	C _{0r}	Gres	Yağ
60	95	18	1.1	1	69.5	85.5	40 000	48 500	6 700	8 500
	110	22	1.5	1.5	-	97.5	68 500	75 000	6 000	7 100
	110	22	1.5	1.5	72	-	97 500	107 000	5 300	6 300
	110	28	1.5	1.5	72	-	131 000	157 000	5 300	6 300
	130	31	2.1	2.1	-	113	124 000	126 000	4 800	5 600
	130	31	2.1	2.1	77	-	124 000	126 000	4 800	5 600
	130	31	2.1	2.1	77	-	150 000	157 000	4 800	5 600
	130	46	2.1	2.1	77	-	222 000	262 000	4 300	5 300
	150	35	2.1	2.1	83	127	167 000	168 000	4 300	5 300
	65	100	18	1.1	1	74.5	90.5	41 000	51 000	6 300
120		23	1.5	1.5	-	105.6	84 000	94 500	5 300	6 300
120		23	1.5	1.5	78.5	-	108 000	119 000	4 800	5 600
120		31	1.5	1.5	78.5	-	149 000	181 000	4 800	6 000
140		33	2.1	2.1	-	121.5	135 000	139 000	4 300	5 300
140		33	2.1	2.1	83.5	-	135 000	139 000	4 300	5 300
140		33	2.1	2.1	82.5	-	181 000	191 000	4 300	5 300
140		48	2.1	2.1	82.5	-	233 000	265 000	3 800	4 800
160		37	2.1	2.1	89.3	135.3	182 000	186 000	4 000	4 800
70		110	20	1.1	1	80	100	58 500	70 500	6 000
	125	24	1.5	1.5	-	110.5	83 500	95 000	5 000	6 300
	125	24	1.5	1.5	83.5	-	119 000	137 000	5 000	6 300
	125	31	1.5	1.5	83.5	-	156 000	194 000	4 500	5 600
	150	35	2.1	2.1	-	130	149 000	156 000	4 000	5 000
	150	35	2.1	2.1	90	-	158 000	168 000	4 000	5 000
	150	35	2.1	2.1	89	-	205 000	222 000	4 000	5 000
	150	51	2.1	2.1	89	-	274 000	325 000	3 600	4 500
	180	42	3	3	100	152	228 000	236 000	3 600	4 300

Bu çalışmada üç farklı radyal yük ve üç farklı malzeme kombinasyonu için eliptik ve dikdörtgen temas metotlarına göre toplam 18 adet hesaplama yapılmıştır. Hesaplamalar detaylı olarak anlatılmış ve sonuçlar tabloda gösterilmiştir. Hazırladığım tez projemde iç çap 70 mm, dış çap 125 mm olan silindirik makaralı rulman seçilmiştir. Bu rulmana ait büyüklükler ve çalışma koşulları aşağıda verilmiştir. Buna bağlı olarak;

İç çap, d_i70 mm

Dış çap, d_o125 mm

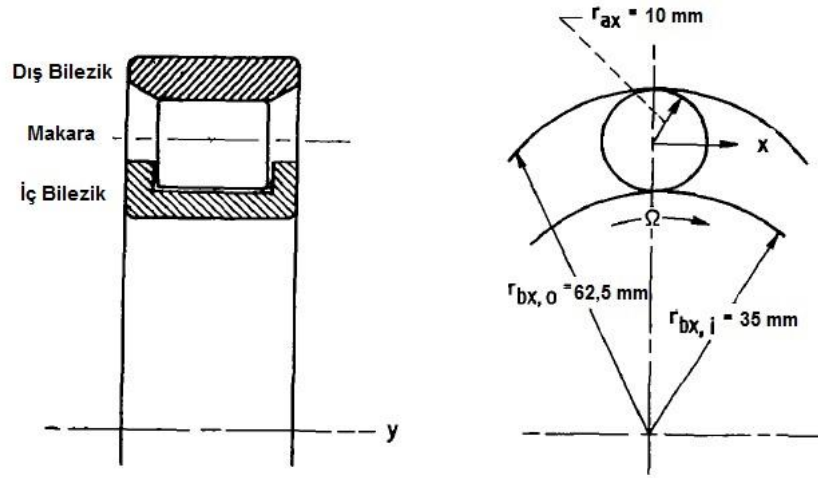
Silindirik makara çapı20 mm

Makara genişliği24 mm

Kullanılan rulman adedi (n)9

Kompozit yüzey pürüzlülüğü $R_{q_{çelik}}$ (μm) 0,0625

Kompozit yüzey pürüzlülüğü $R_{q_{seramik}}$ (μm) 0,175



Şekil 4.1. Problemin modellenmesi

Şekil 5.1'den eğriliğin yarıçapını şöyle yazabiliriz:

Sırasıyla iç ve dış temaslarda x ve y yönlerindeki eşdeğer (efektif) yarıçaplar:

$$r_{ax} = 0,01 m$$

$$r_{ay} = \infty$$

$$r_{bxi} = 0,035 m$$

$$r_{byi} = \infty$$

$$r_{byi} = -0,0625 m$$

$$r_{byo} = \infty$$

İç bilezik-makara ve dış bilezik-makara temaslارının eğrilik toplamları

$$\frac{1}{R_{xi}} = \frac{1}{0,01} + \frac{1}{0,035}$$

$$R_{xi} = 0,0077 m$$

$$\frac{1}{R_{xo}} = \frac{1}{0,01} - \frac{1}{0,0625}$$

$$R_{xo} = 0,012 \text{ m}$$

$$\frac{1}{R_{yi}} = \frac{1}{R_{yo}} = \frac{1}{\infty} = 0$$

I. Varsayım

İlk olarak bu yatağın aşağıdaki koşullarda çalıştığını varsayılmıştır.

Radyal yük, P.....10 025 N

İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....54

Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....0

Atmosferik basınçta (p=0) mutlak viskozite η_o (Pa . s)...0,1

Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N)..... $2,2 \times 10^{-8}$

Elastisite Modülü (Çelik-çelik) E_a - E_b (Pa) $2,075 \times 10^{11}$

Poisson oranı (Çelik) ν_a - ν_b0,3

I. Varsayım Çözümü (P=10 025 N)

Efektif elastisite modülü;

$$E'_{\text{çelik-çelik}} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 2,28 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,0975 \text{ m}$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 \text{ m/s}$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,28 \times 10^{11})(0,0077)} = 7,997 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(2,28 \times 10^{11}) = 5016$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 10025}{9} = 4456 \text{ N}$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{4456}{(2,28 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 3,296 \times 10^{-4}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,28 \times 10^{11})(0,012)} = 5,13 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{4456}{(2,28 \times 10^{11})(0,012^2)} = 1,35 \times 10^{-4}$$

Elastohidrokinematik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(7,997x10^{-11})^{0,68}x5016^{0,49}x(3,296x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 57,7x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 57,7x10^{-6}x0,0077 = 0,44 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(5,13x10^{-11})^{0,68}x5016^{0,49}x(1,35x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 45,55x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 45,55x10^{-6}x0,012 = 0,55 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{4456}{0,024} = 0,18MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,18x10^6}{2,28x10^{11}x0,007} = 1,16x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(7,997x10^{-11})^{0,694}x5016^{0,568}x(1,16x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 67,96x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 67,96x10^{-6}x0,007 = 0,48 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{4456}{0,024} = 0,18 \text{ MN/m}$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,18x10^6}{2,28x10^{11}x0,0125} = 0,651x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(5,13x10^{-11})^{0,694}x5016^{0,568}x(0,651x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 53,76x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 53,76x10^{-6}x0,012 = 0,645 \mu m$$

II. Varsayım

Aynı ölçülerde hibrit rulman için aşağıdaki varsayımlarda çalıştığı kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır.

Radyal yük, P.....	10 025 N
İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....	54
Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....	0
Atmosferik basınçta ($p=0$) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)....	0,1
Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N).....	$2,2 \times 10^{-8}$
Elastisite Modülü (Çelik bilezik) E_a (Pa)	$3,2 \times 10^{11}$
Elastisite Modülü (Seramik makara) E_b (Pa)	$2,075 \times 10^{11}$
Poisson oranı (Çelik bilezik) ν_a	0,3
Poisson oranı (Seramik makara) ν_b	0,26

II. Varsayım Çözümü (P=10 025 N)

Efektif elastisite modülü;

$$E'_{\text{çelik-seramik}} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 2,74 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,0975 \text{ m}$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 \text{ m/s}$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,74 \times 10^{11})(0,0077)} = 6,655 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(2,74 \times 10^{11}) = 6028$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 10025}{9} = 4455 \text{ N}$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{4455}{(2,74 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 2,743 \times 10^{-4}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,74 \times 10^{11})(0,012)} = 4,27 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{4455}{(2,74 \times 10^{11})(0,012^2)} = 1,129 \times 10^{-4}$$

Elastohidrodinamik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(6,655x10^{-11})^{0,68}x6028^{0,49}x(2,743x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 56,49x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 56,49x10^{-6}x0,0077 = 0,435 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(4,27x10^{-11})^{0,68}x6028^{0,49}x(1,129x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 44,57x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 44,57x10^{-6}x0,012 = 0,535 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{4456}{0,024} = 0,18MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,18x10^6}{2,74x10^{11}x0,007} = 0,968x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(6,655x10^{-11})^{0,694}x6028^{0,568}x(0,938x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 68,23x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 68,23x10^{-6}x0,007 = 0,478 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{4456}{0,024} = 0,18 \text{ MN/m}$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,18x10^6}{2,74x10^{11}x0,0125} = 0,542x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(4,27x10^{-11})^{0,694}x6028^{0,568}x(0,542x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 53,79x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 53,79x10^{-6}x0,012 = 0,645 \mu m$$

III. Varsayım

Aynı ölçülerde seramik-seramik rulman için aşağıdaki çalışma koşullarında çalıştığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Radyal yük, P.....	10 025 N
İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....	54
Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....	0
Atmosferik basınçta ($p=0$) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)....	0,1
Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N).....	$2,2 \times 10^{-8}$
Elastisite Modülü (Seramik-seramik) E_a-E_b (Pa)	$3,2 \times 10^{11}$
Poisson oranı (Seramik-seramik) $\nu_a-\nu_b$	0,26

III. Varsayım Çözümü (P=10 025 N)

Efektif elastisite modülü;

$$E'_{seramik-seramik} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 3,43 \times 10^{11} Pa$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,1 m$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 m/s$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(3,43 \times 10^{11})(0,0077)} = 5,316 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(3,43 \times 10^{11}) = 7\,546$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 10025}{9} = 4\,456\,N$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{4456}{(3,43 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 2,19 \times 10^{-4}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(3,43 \times 10^{11})(0,012)} = 3,41 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{4456}{(3,43 \times 10^{11})(0,012^2)} = 0,902 \times 10^{-4}$$

Elastohidrokinematik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(5,316x10^{-11})^{0,68}x7546^{0,49}x(2,19x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 55,02x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 55,02x10^{-6}x0,0077 = 0,424 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(3,41x10^{-11})^{0,68}x7546^{0,49}x(0,902x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 43,40x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 43,40x10^{-6}x0,012 = 0,521 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{4456}{0,024} = 0,18MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,18x10^6}{3,43x10^{11}x0,007} = 0,773x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(5,316x10^{-11})^{0,694}x7546^{0,568}x(0,773x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 67,99x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 67,99x10^{-6}x0,007 = 0,475 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{4456}{0,024} = 0,18 \text{ MN/m}$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,18x10^6}{3,43x10^{11}x0,0125} = 0,433x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(3,41x10^{-11})^{0,694}x7546^{0,568}x(0,433x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 53,8x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 53,8x10^{-6}x0,012 = 0,646 \mu m$$

IV. Varsayım

İlk olarak bu yatağın aşağıdaki koşullarda çalıştığını varsayılmıştır.

Radyal yük, P.....	20 050 N
İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....	54
Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....	0
Atmosferik basınçta (p=0) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)....	0,1
Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N).....	$2,2 \times 10^{-8}$
Elastisite Modülü (Çelik-çelik) E_a-E_b (Pa)	$2,075 \times 10^{11}$
Poisson oranı (Çelik) $\nu_a-\nu_b$	0,3

IV. Varsayım Çözümü (P=20 050 N)

Efektif elastisite modülü;

$$E'_{\text{çelik-çelik}} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 2,28 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,0975 \text{ m}$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 \text{ m/s}$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,28 \times 10^{11})(0,0077)} = 7,997 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(2,28 \times 10^{11}) = 5016$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 20050}{9} = 8911 \text{ N}$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{8911}{(2,28 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 6,592 \times 10^{-4}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,28 \times 10^{11})(0,012)} = 5,13 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{8911}{(2,28 \times 10^{11})(0,012^2)} = 2,71 \times 10^{-4}$$

Elastohidrodinamik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(7,997x10^{-11})^{0,68}x5016^{0,49}x(6,592x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 54,8x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 54,8x10^{-6}x0,0077 = 0,42 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(5,13x10^{-11})^{0,68}x5016^{0,49}x(2,71x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 43,28x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 43,28x10^{-6}x0,012 = 0,52 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{8911}{0,024} = 0,37MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,37x10^6}{2,28x10^{11}x0,007} = 2,32x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(7,997x10^{-11})^{0,694}x5016^{0,568}x(2,32x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 62,18x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 62,18x10^{-6}x0,007 = 0,43 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{8911}{0,024} = 0,37 MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,37x10^6}{2,28x10^{11}x0,0125} = 1,298x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(5,13x10^{-11})^{0,694}x5016^{0,568}x(1,298x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 49,2x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 49,2x10^{-6}x0,012 = 0,615 \mu m$$

V. Varsayım

Aynı ölçülerde hibrit rulman için aşağıdaki varsayımlarda çalıştığı kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır.

Radyal yük, P.....	20 050 N
İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....	54
Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....	0
Atmosferik basınçta ($p=0$) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)....	0,1
Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N).....	$2,2 \times 10^{-8}$
Elastisite Modülü (Çelik bilezik) E_a (Pa)	$3,2 \times 10^{11}$
Elastisite Modülü (Seramik makara) E_b (Pa)	$2,075 \times 10^{11}$
Poisson oranı (Çelik bilezik) ν_a	0,3
Poisson oranı (Seramik makara) ν_b	0,26

V.Varsayım Çözümü (P=20 050 N)

Efektif elastisite modülü;

$$E'_{\text{çelik-seramik}} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 2,74 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,0975 \text{ m}$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 \text{ m/s}$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,74 \times 10^{11})(0,0077)} = 6,655 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(2,74 \times 10^{11}) = 6028$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 20050}{9} = 8911 \text{ N}$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{8911}{(2,74 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 5,485 \times 10^{-4}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,74 \times 10^{11})(0,012)} = 4,27 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{8911}{(2,74 \times 10^{11})(0,012^2)} = 2,258 \times 10^{-4}$$

Elastohidrodinamik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(6,655x10^{-11})^{0,68}x6028^{0,49}x(5,485x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 53,63x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 53,63x10^{-6}x0,0077 = 0,413 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(4,27x10^{-11})^{0,68}x6028^{0,49}x(2,258x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 42,33x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 42,33x10^{-6}x0,012 = 0,508 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik.

Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{8911}{0,024} = 0,37MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,37x10^6}{2,74x10^{11}x0,007} = 1,93x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(6,655x10^{-11})^{0,694}x6028^{0,568}x(2,32x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 62,14x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 62,14x10^{-6}x0,007 = 0,435 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{8911}{0,024} = 0,37 MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,37x10^6}{2,74x10^{11}x0,0125} = 1,08x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(4,27x10^{-11})^{0,694}x6028^{0,568}x(1,08x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 50,66x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 50,66x10^{-6}x0,012 = 0,608 \mu m$$

VI. Varsayım

Aynı ölçülerde seramik-seramik rulman için aşağıdaki çalışma koşullarında çalıştığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Radyal yük, P.....20 050 N

İç çap açılmal hızı, ω_i (rad/sn).....54

Dış çap açılmal hızı, ω_o (rad/sn).....0

Atmosferik basınçta ($p=0$) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)...0,1

Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N)..... $2,2 \times 10^{-8}$

Elastisite Modülü (Seramik-seramik) E_a-E_b (Pa) $3,2 \times 10^{11}$

Poisson oranı (Seramik-seramik) $\nu_a-\nu_b$0,26

VI. Varsayım Çözümü (P=20 050 N)

Efektif elastisitemodülü;

$$E'_{seramik-seramik} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 3,43 \times 10^{11} Pa$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı ve d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,1 m$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 m/s$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(3,43 \times 10^{11})(0,0077)} = 5,316 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(3,43 \times 10^{11}) = 7\,546$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 20050}{9} = 8\,911\,N$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{8911}{(3,43 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 4,38 \times 10^{-4}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(3,43 \times 10^{11})(0,012)} = 3,41 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{8911}{(3,43 \times 10^{11})(0,012^2)} = 1,80 \times 10^{-4}$$

Elastohidrodinamik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(5,316x10^{-11})^{0,68}x7546^{0,49}x(4,38x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 52,3x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 52,3x10^{-6}x0,0077 = 0,402 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(3,41x10^{-11})^{0,68}x7546^{0,49}x(1,80x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 41,27x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 41,27x10^{-6}x0,012 = 0,495 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{8911}{0,024} = 0,37MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,37x10^6}{3,43x10^{11}x0,007} = 1,541x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(5,316x10^{-11})^{0,694}x7546^{0,568}x(1,541x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 62,24x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 62,24x10^{-6}x0,007 = 0,435 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{8911}{0,024} = 0,37 \text{ MN/m}$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,37x10^6}{3,43x10^{11}x0,0125} = 8,63x10^{-5}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(3,27x10^{-11})^{0,694}x7546^{0,568}x(8,63x10^{-5})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 47,84x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 47,84x10^{-6}x0,0125 = 0,598 \mu m$$

VII. Varsayım

Bu varsayımda yine I. varsayım gibi çelik-çelik rulman için yük artırılarak aşağıdaki koşullarda hesaplamalar yapılmıştır.

Radyal yük, P.....	50 125 N
İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....	54
Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....	0
Atmosferik basınçta ($p=0$) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)....	0,1
Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N).....	$2,2 \times 10^{-8}$
Elastisite Modülü (Çelik-çelik) E_a-E_b (Pa)	$2,075 \times 10^{11}$
Poisson oranı (Çelik) $\nu_a-\nu_b$	0,3

VII. Varsayım Çözümü (P=50 125 N)

Efektif elastisitemodülü;

$$E'_{\text{çelik-çelik}} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 2,28 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı ve d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,0975 \text{ m}$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 \text{ m/s}$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,28 \times 10^{11})(0,0077)} = 7,997 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(2,28 \times 10^{11}) = 5016$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 50125}{9} = 22277 \text{ N}$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{22277}{(2,28 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 1,648 \times 10^{-3}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,28 \times 10^{11})(0,012)} = 5,13 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{22277}{(2,28 \times 10^{11})(0,012^2)} = 6,79 \times 10^{-4}$$

Elastohidrodinamik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(7,997x10^{-11})^{0,68}x5016^{0,49}x(1,648x10^{-3})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 51,3x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 51,3x10^{-6}x0,0077 = 0,395 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(5,13x10^{-11})^{0,68}x5016^{0,49}x(6,79x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 40,48x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 40,48x10^{-6}x0,012 = 0,486 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{22277}{0,024} = 0,93MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,37x10^6}{2,28x10^{11}x0,007} = 5,82x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(7,997x10^{-11})^{0,694}x5016^{0,568}x(5,82x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 55,3x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 55,3x10^{-6}x0,007 = 0,39 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{22277}{0,024} = 0,93MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,93x10^6}{2,28x10^{11}x0,0125} = 3,263x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(5,13x10^{-11})^{0,694}x5016^{0,568}x(3,263x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 43,74x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 43,74x10^{-6}x0,0125 = 0,547 \mu m$$

VIII. Varsayım

Bu varsayımda yine II. Varsayım gibi çelik-seramik rulman için yük artırılarak aşağıdaki koşullarda hesaplamalar yapılmıştır.

Radyal yük, P.....	50 125 N
İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....	54
Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....	0
Atmosferik basınçta (p=0) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)...	0,1
Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N).....	$2,2 \times 10^{-8}$
Elastisite Modülü (Çelik bilezik) E_a (Pa)	$3,2 \times 10^{11}$
Elastisite Modülü (Seramik makara) E_b (Pa)	$2,075 \times 10^{11}$
Poisson oranı (Çelik bilezik) ν_a	0,3
Poisson oranı (Seramik makara) ν_b	0,26

VIII. Varsayım Çözümü (P=50 125 N)

Efektif elastisite modülü;

$$E'_{\text{çelik-seramik}} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 2,74 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,1 \text{ m}$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 \text{ m/s}$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,74x10^{11})(0,0077)} = 6,655x10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2x10^{-8})(2,74x10^{11}) = 6\ 028$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4x50125}{9} = 22\ 277\ N$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{22277}{(2,74x10^{11})(0,0077^2)} = 1,37x10^{-3}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(2,74x10^{11})(0,012)} = 4,27x10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{22277}{(2,74x10^{11})(0,012^2)} = 5,64x10^{-4}$$

Elastohidrodinamik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}(1 - e^{-0,68k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(6,655x10^{-11})^{0,68}x6028^{0,49}x(1,37x10^{-3})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 50,2x10^{-6}$$

$$H_{min_i} = 50,2x10^{-6}x0,0077 = 0,387 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(4,27x10^{-11})^{0,68}x6028^{0,49}x(5,64x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 39,63x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 39,63x10^{-6}x0,012 = 0,476 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{22277}{0,024} = 0,93MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,93x10^6}{2,74x10^{11}x0,007} = 4,85x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(6,655x10^{-11})^{0,694}x6028^{0,568}x(4,85x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 55,3x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 55,3x10^{-6}x0,007 = 0,387 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{22277}{0,024} = 0,93 \text{ MN/m}$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,93x10^6}{2,74x10^{11}x0,0125} = 2,72x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(4,27x10^{-11})^{0,694}x6028^{0,568}x(2,72x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 43,76x10^{-6}$$

$$H_{min_o} = 43,76x10^{-6}x0,0125 = 0,547 \mu m$$

IX. Varsayım

Bu varsayımda yine III. varsayım gibi seramik-seramik rulman için yük artırılarak aşağıdaki koşullarda hesaplamalar yapılmıştır.

Radyal yük, P.....	50 125 N
İç çap açısal hızı, ω_i (rad/sn).....	54
Dış çap açısal hızı, ω_o (rad/sn).....	0
Atmosferik basınçta ($p=0$) mutlak viskozite η_0 (Pa . s)....	0,1
Basınç- viskozite katsayısı ξ (m^2/N).....	$2,2 \times 10^{-8}$
Elastisite Modülü (Seramik-seramik) E_a-E_b (Pa)	$3,2 \times 10^{11}$
Poisson oranı (Seramik-seramik) $\nu_a-\nu_b$	0,26

IX. Varsayım Çözümü (P=50 125 N)

Efektif elastisite modülü;

$$E'_{\text{seramik-seramik}} = \frac{2}{(1 - \nu_a^2)/E_a + (1 - \nu_b^2)/E_b} = 3,43 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$u = \frac{|\omega_i - \omega_o| (d_e^2 - d^2)}{4d_e}$$

d_e = adım çapı d = rulman makara çapı;

$$d_e = \frac{d_o + d_i}{2} = \frac{0,125 + 0,070}{2} = 0,1 \text{ m}$$

Bundan dolayı;

$$u = \frac{0,1^2 + 0,02^2}{4(0,1)} |54 - 0| = 1,404 \text{ m/s}$$

Bu bağıntılardan boyutsuz hız, malzeme ve yük parametreleri,

$$U_i = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xi}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(3,43 \times 10^{11})(0,0077)} = 5,316 \times 10^{-11}$$

$$G_i = G_o = \xi E' = (2,2 \times 10^{-8})(3,43 \times 10^{11}) = 7\ 546$$

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2}$$

$$(P_z)_{max} = \frac{4P_z}{n} = \frac{4 \times 50125}{9} = 22\ 277\ N$$

Buradan;

$$W_i = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xi}^2} = \frac{22277}{(3,43 \times 10^{11})(0,0077^2)} = 1,09 \times 10^{-3}$$

$$U_o = \frac{\eta_0 u}{E' R_{xo}} = \frac{(0,1)(1,404)}{(3,43 \times 10^{11})(0,012)} = 3,41 \times 10^{-11}$$

$$W_o = \frac{(P_z)_{max}}{E' R_{xo}^2} = \frac{22277}{(3,43 \times 10^{11})(0,012^2)} = 4,51 \times 10^{-4}$$

Elastohidrodinamik film kalınlığı denkleminde;

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R_x} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073} (1 - e^{-0,68 k_e})$$

Rulman için $k_e = \infty$ dir ve bu durumda eşitlik;

$$H_{min} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

İç bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63 U^{0,68} G^{0,49} W^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 3,63x(5,316x10^{-11})^{0,68}x7546^{0,49}x(1,09x10^{-3})^{-0,073}$$

$$H_{min_i} = \frac{h_{min}}{R_{xi}} = 48,9x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 48,9x10^{-5}x0,0077 = 0,377 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 3,63x(3,41x10^{-11})^{0,68}x7546^{0,49}x(4,51x10^{-4})^{-0,073}$$

$$H_{min_o} = \frac{h_{min}}{R_{xo}} = 38,59x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 38,59x10^{-6}x0,012 = 0,463 \mu m$$

İç ve dış film kalınlıklarını eliptik temas yöntemi ile yaklaşık ölçüm olarak belirledik. Şimdi de dikdörtgen temas yöntemi ile hesabımızı yapalım.

İç bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{22277}{0,024} = 0,93MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,93x10^6}{3,43x10^{11}x0,007} = 3,873x10^{-4}$$

$$H_{min_i} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 1,714x(5,316x10^{-11})^{0,694}x7546^{0,568}x(3,873x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_i} = 55,31x10^{-6}$$

$$h_{min_i} = 55,31x10^{-6}x0,007 = 0,387 \mu m$$

Dış bilezik film kalınlığı;

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_y}$$

$$P_z' = \frac{P_z}{B} = \frac{8911}{0,024} = 0,93 MN/m$$

$$W' = \frac{P_z'}{E'R_x} = \frac{0,93x10^6}{3,43x10^{11}x0,0125} = 2,17x10^{-4}$$

$$H_{min_o} = 1,714U^{0,694}G^{0,568}(W')^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 1,714x(3,41x10^{-11})^{0,694}x7546^{0,568}x(2,17x10^{-4})^{-0,128}$$

$$H_{min_o} = 43,77x10^{-6}$$

$$h_{min_o} = 43,77x10^{-6}x0,0125 = 0,547 \mu m$$

Yapılan tüm EHD minimum film kalınlığının kompozit yüzey pürüzlülüğüne oranından boyutsuz minimum film kalınlığı elde edilir.

Kompozit yüzey pürüzlülüğü, imalat yöntemine göre sabit kabul edilerek, malzeme kombinasyonuna göre değişmemiştir ve;

$$R_q = (R_{q_{makara}}^2 + R_{q_{bilezik}}^2)^{1/2} = (0,0625^2 + 0,175^2)^{1/2}$$
$$R_q = 0,186 \mu m$$

Buradan 9 varsayım için elde edilen tüm sonuçlar kompozit yüzey pürüzlülüğüne bölünür ve boyutsuz film parametresi elde edilir. Sonuçlar Çizelge 6.3 de sunulmuştur.

Görüldüğü gibi minimum film kalınlıklarının en küçüğü iç bilezik ile en ağır yüklenmiş makara arasında oluşur. EHD yağlamada boyutsuz film parametresinin sınırları 3 ila 10 arası tanımlandığına göre, bu halde minimum EHD film kalınlığı kompozit yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık üç katı olduğundan yatak yağlaması tatmin edici olarak kabul edilebilir.

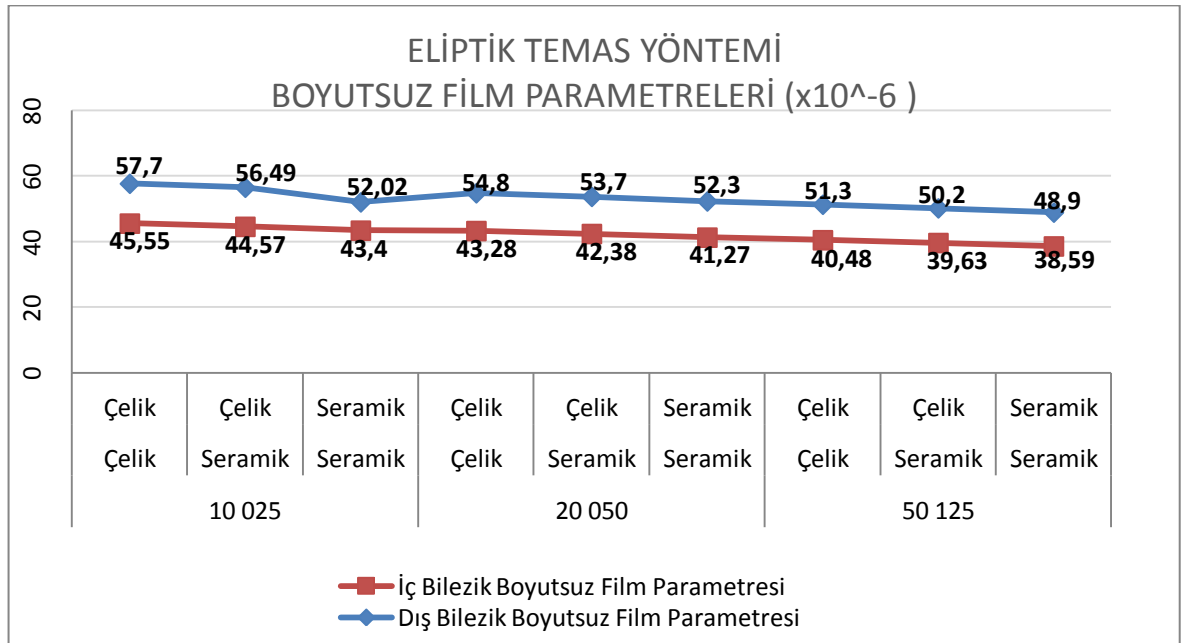
Orijinal yüzey pürüzlülüğü $0,05 \mu m$ olduğundan, film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne oranı yaklaşık 10'dur. Bu oran, yatağın tam film yağlama(sıvı film yağlaması) durumunda olmasını ve adhezyon aşınmasının yorulma aşınmasından çok daha düşük olmasını sağlar.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

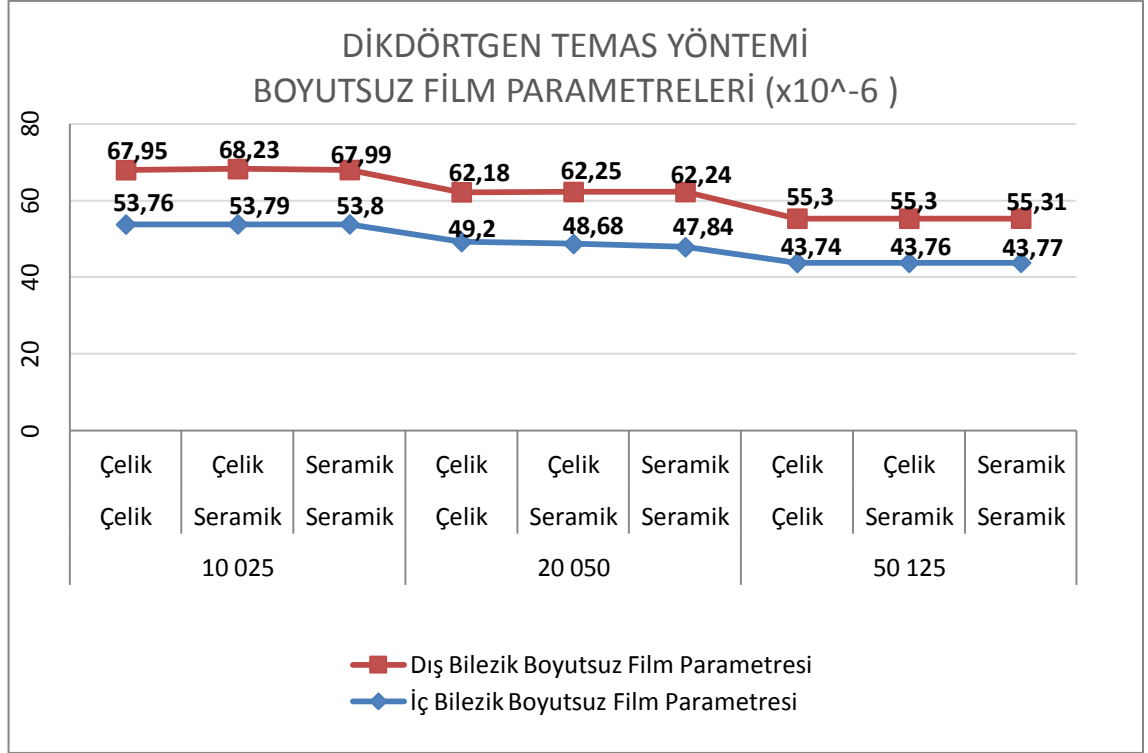
3 farklı malzeme kombinasyonu ve 3 farklı yük altında yapılan boyutsuz film kalınlığı hesaplamaları ve minimum film kalınlığı hesaplamaları Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 de verilmiştir.

Çizelge 5.1. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Boyutsuz Film Parametreleri

Uygulanan Yük (N)	Makara Malzemesi	Bilezik Malzemesi	Boyutsuz Film Parametreleri (Eliptik Temas Yöntemi)		Boyutsuz Film Parametreleri (Dikdörtgen Temas Yöntemi)	
			$[(H_{min})_i]$	$[(H_{min})_o]$	$[(H_{min})_i]$	$[(H_{min})_o]$
10 025	Çelik	Çelik	$57,7 \times 10^{-6}$	$45,55 \times 10^{-6}$	$67,95 \times 10^{-6}$	$53,76 \times 10^{-6}$
	Seramik	Çelik	$56,49 \times 10^{-6}$	$44,57 \times 10^{-6}$	$68,23 \times 10^{-6}$	$53,79 \times 10^{-6}$
	Seramik	Seramik	$52,02 \times 10^{-6}$	$43,40 \times 10^{-6}$	$67,99 \times 10^{-6}$	$53,8 \times 10^{-6}$
20 050	Çelik	Çelik	$54,8 \times 10^{-6}$	$43,28 \times 10^{-6}$	$62,18 \times 10^{-6}$	$49,2 \times 10^{-6}$
	Seramik	Çelik	$53,7 \times 10^{-6}$	$42,38 \times 10^{-6}$	$62,25 \times 10^{-6}$	$48,68 \times 10^{-6}$
	Seramik	Seramik	$52,3 \times 10^{-6}$	$41,27 \times 10^{-6}$	$62,24 \times 10^{-6}$	$47,84 \times 10^{-6}$
50 125	Çelik	Çelik	$51,3 \times 10^{-6}$	$40,48 \times 10^{-6}$	$55,3 \times 10^{-6}$	$43,74 \times 10^{-6}$
	Seramik	Çelik	$50,2 \times 10^{-6}$	$39,63 \times 10^{-6}$	$55,3 \times 10^{-6}$	$43,76 \times 10^{-6}$
	Seramik	Seramik	$48,9 \times 10^{-6}$	$38,59 \times 10^{-6}$	$55,31 \times 10^{-6}$	$43,77 \times 10^{-6}$



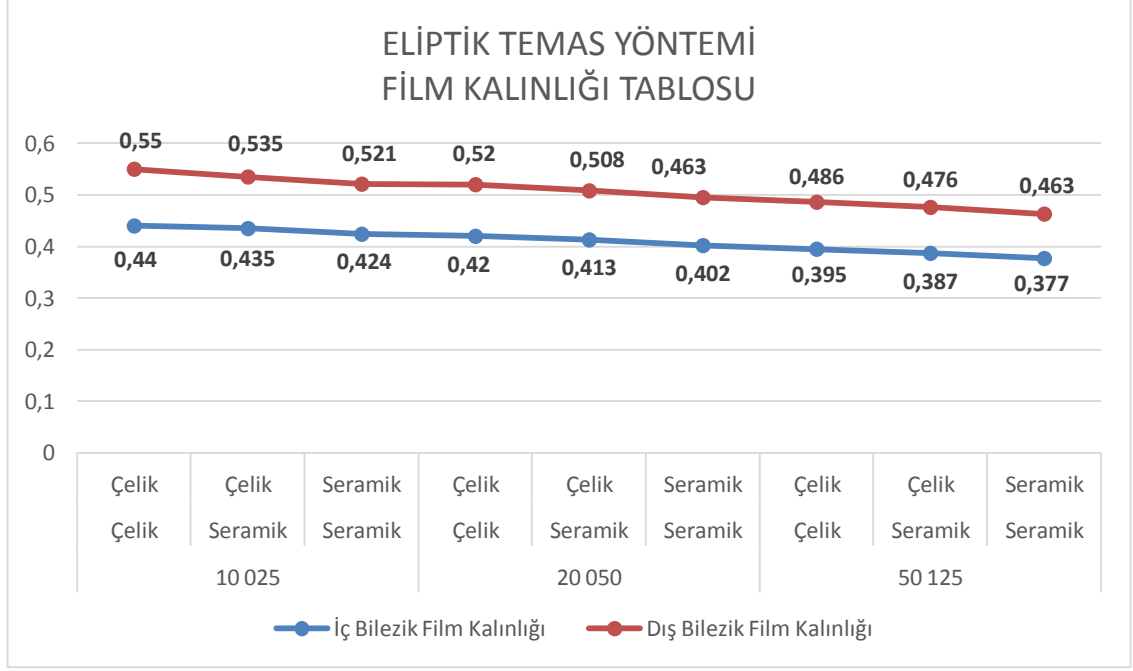
Şekil 5.1. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Boyutsuz Film Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Eliptik Temas Yöntemi)



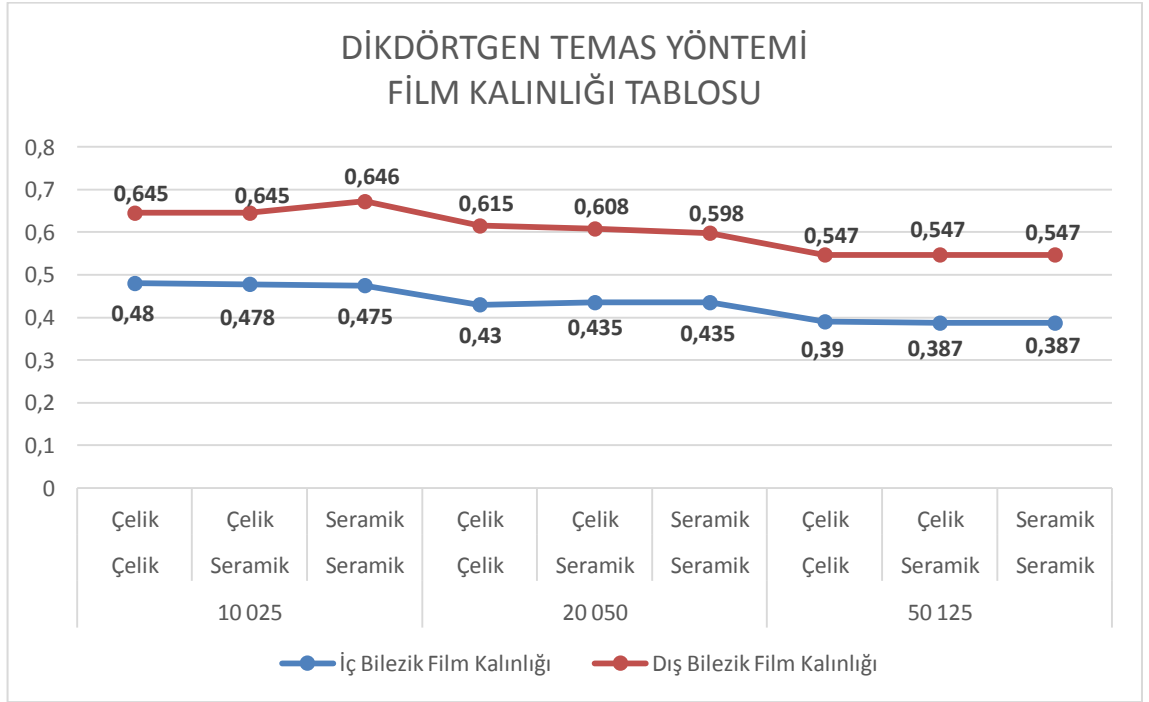
Şekil 5.2. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Boyutsuz Film Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Dikdörtgen Temas Yöntemi)

Çizelge 5.2. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı

Uygulanan Yük (N)	Makara Malzemesi	Bilezik Malzemesi	Film Kalınlığı (Eliptik Bağlanma Yöntemi)		Film Kalınlığı (Dikdörtgen Bağlanma Yöntemi)	
			İç (μm)	Dış (μm)	İç (μm)	Dış (μm)
10 025	Çelik	Çelik	0,44	0,55	0,48	0,645
	Seramik	Çelik	0,435	0,535	0,478	0,645
	Seramik	Seramik	0,424	0,521	0,475	0,646
20 050	Çelik	Çelik	0,42	0,52	0,43	0,615
	Seramik	Çelik	0,413	0,508	0,435	0,608
	Seramik	Seramik	0,402	0,495	0,435	0,598
50 125	Çelik	Çelik	0,395	0,486	0,39	0,547
	Seramik	Çelik	0,387	0,476	0,387	0,547
	Seramik	Seramik	0,377	0,463	0,387	0,547



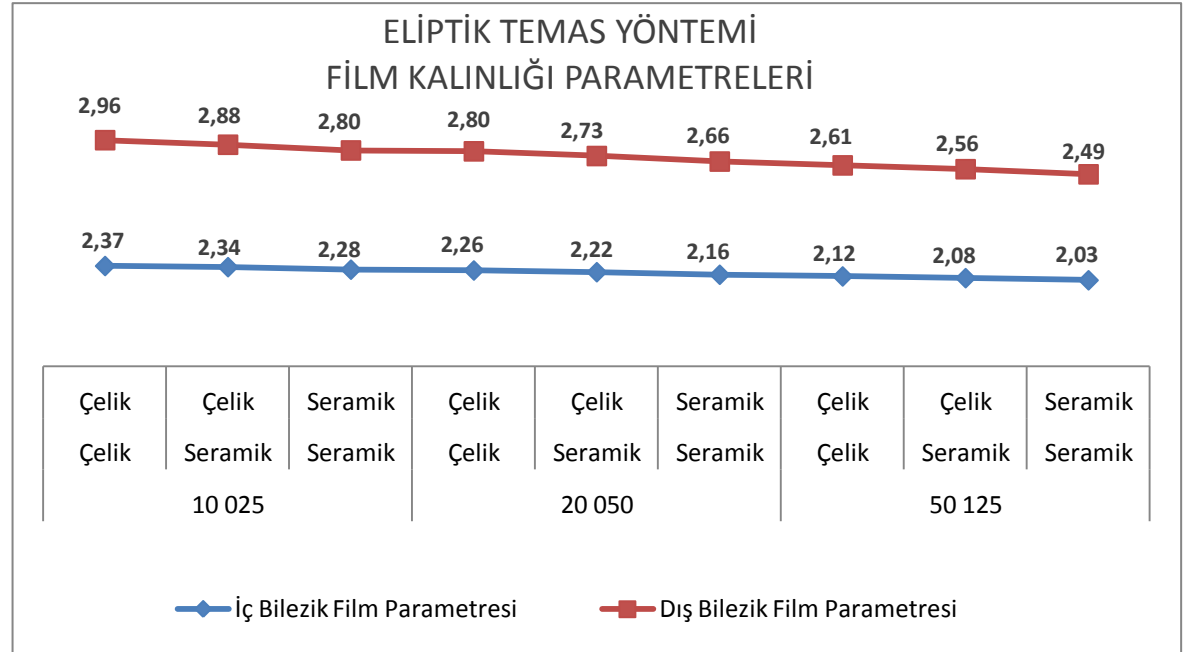
Şekil 5.3. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığının Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Eliptik Temas Yöntemi)



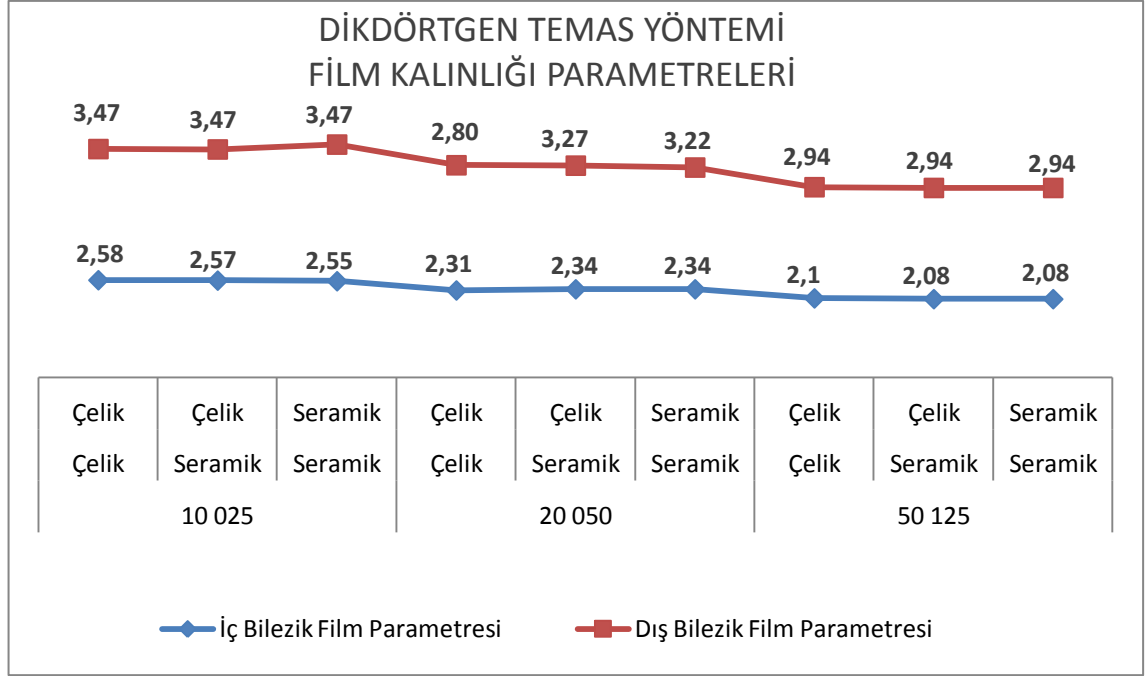
Şekil 5.4. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığının Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Dikdörtgen Temas Yöntemi)

Çizelge 5.3. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı Parametreleri

Uygulanan Yük (N)	Makara Malzemesi	Bilezik Malzemesi	Film Kalınlığı Parametreleri (Eliptik Temas Yöntemi)		Film Kalınlığı Parametreleri (Dikdörtgen Temas Yöntemi)	
			$\lambda_{İç}$	$\lambda_{Dış}$	$\lambda_{İç}$	$\lambda_{Dış}$
10 025	Çelik	Çelik	2,37	2,96	2,58	3,47
	Seramik	Çelik	2,34	2,88	2,57	3,47
	Seramik	Seramik	2,28	2,80	2,55	3,47
20 050	Çelik	Çelik	2,26	2,80	2,31	3,31
	Seramik	Çelik	2,22	2,73	2,34	3,27
	Seramik	Seramik	2,16	2,66	2,34	3,22
50 125	Çelik	Çelik	2,12	2,61	2,10	2,94
	Seramik	Çelik	2,08	2,56	2,08	2,94
	Seramik	Seramik	2,03	2,49	2,08	2,94



Şekil 5.5. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Eliptik Temas Yöntemi)



Şekil 5.6. İç ve Dış Bilezik Yüzeylerindeki Film Kalınlığı Parametrelerinin Malzeme Kombinasyonu ve Radyal Yüke Göre Değişimi (Dikdörtgen Temas Yöntemi)

Elastohidrodinamik koşullarda çalışan makine elemanlarında yağlayıcı film kalınlığının değerlendirilmesi, bu elemanların mukavemetlerini ve oluşturdukları sistemlerin performanslarını iyileştirme amaçlı tasarımlar için önemlidir.

Bu makalede üç farklı radyal yüke maruz kalan ve üç farklı malzeme kombinasyonuna sahip olan silindirik makaralı rulmanların dikdörtgen ve eliptik temas metodlarına göre yuvarlanma yüzeylerindeki boyutsuz ve boyutlu minimum film kalınlığı hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Çalışmamda ilk olarak makara ve bilezikler arası iç ve dış temas geometrilerinin temel özellikleri hesaplanarak yuvarlanma yüzeylerindeki hız, malzeme ve yük parametreleri bulunmuştur. Boyutsuz minimum film kalınlığı bağıntısının kullanılmasıyla da EHD minimum film kalınlığı hesaplanmıştır. Film kalınlığının kompozit yüzey pürüzlülüğüne bölünmesiyle boyutsuz film parametresi bulunmuştur.

Boyutsuz film kalınlığı hesaplamalarına bakıldığında eliptik temas metodu hesaplamalarına göre en düşük boyutsuz film kalınlığı maximum yük değerinde (50 125 N) ve seramik-seramik malzeme kombinasyonunda olduğu görülmüştür. Dikdörtgenel temas yönteminde elde edilen sonuç ise, malzeme kombinasyonuna göre değişmeksizin

en küçük boyutsuz minimum film kalınlığı değeri yine maximum yük uygulandığında elde edilmiştir. Boyutsuz film kalınlığı tablosunda olduğu gibi iç-dış bilezik film kalınlığında görülen sonuç yine benzerdir. Yani en küçük minimum film kalınlığı, eliptik temas metodu hesaplamalarına göre maximum yük uygulandığında seramik-seramik malzeme kombinasyonunda elde edilmektedir. Dikdörtgen temas yönteminde ise, malzeme kombinasyonuna göre ayırım yapmak mümkün değildir.

Malzeme gözetmeksizin radyal yük yaklaşık 2 kat artırıldığında eliptik temas yöntemine göre, iç bilezik minimum film kalınlığı yaklaşık %5,18 oranında,dış bilezik minimum film kalınlığı yaklaşık %5 oranında azalmaktadır. Dikdörtgen temas yöntemine göre ise bu oran iç bilezik minimum film kalınlığında%8,5 ve dış bilezik film kalınlığında yaklaşık %7,3 oranındadır.

Malzeme gözetmeksizin radyal yük yaklaşık 2,5 kat artırıldığında eliptik temas yöntemine göre,iç bilezik minimum film kalınlığı yaklaşık %6,2 oranında,dış bilezik minimum film kalınlığı yaklaşık %6,5 oranında azalmaktadır. Dikdörtgen temas yöntemine göre ise bu oran iç bilezik minimum film kalınlığında %11 ve dış bilezik film kalınlığında yaklaşık %8,5 oranındadır.

Malzeme kombinasyonundan bağımsız olarak, eliptik temas ve dikdörtgenel temas yöntemine göre, iç temas yüzeyindeki boyutsuz minimum film kalınlığı dış temas yüzeyindekinden yaklaşık % 21 küçük bulunmuştur.

Malzeme kombinasyonundan bağımsız olarak, eliptik temas yöntemine göre; iç temas yüzeyindeki boyutsuz film parametresi dış temas yüzeyindekinden yaklaşık % 18 küçük bulunmuştur. Dikdörtgen temas yönteminde bu oran yaklaşık %27 olarak hesaplanmıştır.Dolayısıyla rulmanlı yatakta EHD yağlama açısından iç temas yüzeylerinin kontrolü yeterlidir.Seçilen koşullarda iç bilezik yuvarlanma yüzeylerinde hesaplanan minimum EHD film kalınlıkları kompozit yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık üç katı olduğundan yatak yağlamaları tatmin edici olarak kabul edilmiştir.

KAYNAKLAR

Bana, E.,Byoung, H.R., Kyung, W.K. 2005, A Study on The Sound of Roller Bearings Operating Under RadialLoad”, TechwinCo. Ltd.,Sangdaewon, Republic of Korea,Received

Doç. Dr. Kaptı O., 2016, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Elemanları II Ders Notu

Ghezzi, I.;Komba, E.W.H.; Bouscharain, N.; Massi, F.; Tonazzi, D.; Le Jeune, G.; Coudert, J.-B. 2018, Damage evolution and contact surfaces analysis of high-loaded oscillating hybridbearings, *Wear*, 406–407, 1–12.

Hamrock, B.J.,Schmid, S.R., Jacobson, B.O. 2006, *Fundamentals of Machine Elements*, Mc Graw-Hill, International Edition, Singapore. (13. Bölüm)

Jablonka, K.;Glovnea, R.; Bongaerts, J. 2018, Quantitative measurements of film thickness in a radially loaded deep-groove ballbearing, *Tribology International*, 119, 239–249.

Kaneta, M., 1992, "Effects of surface Roughness in Elastohydrodynamic Lubrication", *Trans. Jpn. Soc.Mech. Eng.*, 35 (4), 535.

Karadere G.,Tosun C. 2019, Farklı Malzeme Kombinasyonlarına Sahip Radyal Bilyalı Rulmanlarda Toplam Lokal Ezilme Miktarlarının ve Boyutsuz Film Parametrelerinin Karşılaştırılması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 2, 2019

Marko Matthew D. 2018, *The Impact of Lubricant Film Thickness and BallBearings Failures*, Naval AirWarfare Center Aircraft Division, Joint-Base McGuire-Dix-Lakehurst, Lakehurst, NJ 08733, USA

Mohamed Guessasma * and Charles Machado 2018, *Three-Dimensional DEM Modelling of BallBearing with Lubrication Regime Prediction*, Campus Universitaire—LTI-EA3899, 48 rue d'Ostende, 02315 Saint-Quentin, France; charles.machado@u-picardie.fr

Nazir, M. H.;Khan, Z. A.; Saeed, A. 2018, Experimental analysis and modelling of c-crack propagation in silicon nitride ballbearing element under Rolling contact fatigue, *Tribology International*, 126, 386–401.

Poon , S. AndHains, D. J., 1966-67 , "Frictional Behavior of Lubricated Rolling – Contact Elements", Proc. Inst. Mech. Eng.,Vol. 181, Pt.1, No.16, p. 363.

Rende, H. ve Hanyaloğlu, C. 2012, Rulmanlarda ve Kaymalı Yataklarda Seramiklerin Kullanımı, TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 633, 28-35

Sarıgöz K. 2018, Kauçuk Esaslı Rulman Sızdırmazlık Kapaklarının Sıkılıklarının Rulman Performansına Etkisinin Teorik Ve Deneysel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Steven R. Schmid, Bernard J. Hamrockb, Bo O. Jacobson 2014, *Fundamentals of Machine Elements*, SI Version, Third Edition(13. Bölüm)

Tevrüz, T. 2015, *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*, Cilt 2, Çağlayan Kitabevi, 1.ci baskı, İstanbul.

Tosun, C. 2002, Rulmanlı Yatakların Tribolojik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Uysal A. 2005, Tek Sıra Sabit Makaralı Yataklarda Sürtüme Kaybının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

XiaolanAi, Charles A. Moyer 2001, Modern Tribology Handbook, Rolling Element Bearing, 28. Bölüm

Zaretsky, E.V. 1989, Ceramicbearings foruse in gasturbineengines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Trans. ASME 111 (1) 146–157.

İnternet: <https://tr.bearing-news.com/rulman-yapiminda-kullanilan-malzemeler/>(Son erişim tarihi:12.09.2019)

İnternet: <https://www.odeysel.com/biyoloji/4720/yaglama-teknikleri.html>(Son erişim tarihi: 12.09.2019)

İnternet : <http://www.ismakinalari.org.tr/tr/article.asp?id=146>(Son erişim tarihi: 12.09.2019)

İnternet : <http://www.yedas.com.tr/tr/sayfa/rulman-nedir>(Son erişim tarihi: 12.09.2019)

İnternet : <http://www.muhendislikbilgileri.com/?Bid=1192902>(Son erişim tarihi: 12.09.2019)

İnternet : <http://guvenrulman.com.tr/images/files/nsk%20kataloggg.pdf>(Son erişim tarihi: 12.09.2019)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hatice AKSU

Doğum Yeri ve Tarihi : Kars – 30.07.1992

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Hüsnü M. Özyeğin Anadolu Lisesi - KARS

Lisans : Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği - ERZURUM

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi - BURSA

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Evinoks Servis Ekipmanları A.Ş.
Kapimsan Otomotiv A.Ş.

İletişim (e-posta) : htcaxu36@gmail.com

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	Hatice AKSU
Tez Adı	SİLİNDİRİK MAKARALI RULMANLARDA ELASTOHİDRODİNAMİK FİLM KALINLIĞININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ
Enstitü	FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Anabilim Dalı	MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ KONSTRÜKSİYON VE İMALAT ANABİLİM DALI
Tez Türü	YÜKSEK LİSANS TEZİ
Tez Danışman(lar)ı	Doç.Dr. Gültekin KARADERE
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni	<input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input checked="" type="checkbox"/> Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama izni	<input type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Bursa Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 07. 11. 2019

İmza : 