



STATİK YÜKLÜ RADYAL KAYMALI YATAKLARDA HİDRODİNAMİK YAĞLAMANIN ANALİZİ

Güler ÖNCÜ^{1*}, Ertuğrul DURAK²

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Isparta, Türkiye
² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Radyal Kaymalı Yatak, Reynolds Denklemi, Sonlu Farklar Yöntemi, Hidrodinamik Yağlama, Triboloji.</i>	Hidrodinamik yağlamalı kaymalı yataklarda basınç dağılımı, sürtünme katsayısı, yağ film kalınlığı, yağ debisi, vb. gibi değerler yatak tasarımı ve optimum enerji verimliliği açısından büyük öneme sahip tasarım kriterleridir. Bu çalışmada basınç dağılımını ifade eden Reynolds Yağlama Diferansiyel denklemi sonlu farklar metodu ile çözülerek her bir basınç noktası için iteratif çözüm yapılmıştır. Çalışmada kurgulanan algoritma ile muylu hızının değişimi ile basınç değeri, yağlayıcı katman kalınlığı, sürtünme katsayısı ve yatak kapasitesi belirlemek mümkündür. Hazırlanan MATLAB programı ile elde edilen sonuçlar benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır.

ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC LUBRICATION IN STATIC LOADED JOURNAL BEARING

Keywords	Abstract
<i>Journal Bearing, Reynolds Equation, Finite Difference Method, Hydrodynamic Lubrication, Tribology.</i>	Pressure distribution, friction coefficient, oil film thickness, oil flow rate, etc. are important design criteria in terms of bearing design and optimum energy efficiency in hydrodynamic lubricated journal bearings. In this study, pressure distribution, in every pressure point, is determined while using finite difference method with Reynolds Lubrication Differential Equation iteratively. With the algorithm designed in the study, it is possible to determine the pressure value, lubricant layer thickness, friction coefficient and bearing capacity by changing the journal speed. The results obtained with the MATLAB program prepared were compared with similar studies.

Alıntı / Cite

Öncü, G., Durak, E., (2021). Statik Yüklü Radyal Kaymalı Yataklarda Hidrodinamik Yağlamanın Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 167-175.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Öncü, 0000-0002-3139-4554
E. Durak, 0000-0001-6957-3796

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	16.11.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	08.02.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	17.02.2021
Yayın Tarihi / Published Date	30.03.2021

1. Giriş (Introduction)

Makine elemanlarının önemli bir alanını oluşturan yatakların temel amacı, hareketin sürekliliğini en az kayıp ile sağlayarak millerin desteklenmesidir. Yataklar yapılarına göre kaymalı, yuvarlanma elemanlı ve hassas cihaz yatakları; kaymalı yataklar ise yük taşıma durumlarına göre; eksenel, radyal ve eksenel-radyal kaymalı yataklar olarak incelenebilmektedir. Kaymalı yataklarda, mil ve yatak arasındaki yüzeyler bir akışkan film ile birbirinden tamamen ayrıldığı için tam sıvı sürtünme ile birlikte, herhangi bir dış etki olmaksızın yatağa gelen kuvvetin dengelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle hidrodinamik ve hidrostatik olmak üzere iki yağlamadan bahsetmek mümkündür. Hidrodinamik yağlamada; yüzeyler arasındaki boşluğun şekline ve yüzeylerin hızına bağlı, iki yüzeyi birbirinden tamamen ayıran yeterli basınca sahip bir yağ tabakası oluşturulabilmektedir.

Buna karşılık hidrostatik yağlamada, dış kuvveti dengelemek için yağ tabakasındaki basınç, bir pompa aracılığı ile oluşturulmaktadır (Kurban, 1990). Hidrodinamik yağlamanın sayısal analizi, yatak özelliklerinin tahmin

* İlgili yazar / Corresponding author: guleroncu@isparta.edu.tr, +90-246-214-6930

edilmesinde ve mühendislik için gereken problem çözümlerinde etkili olmaktadır (Nuruzzaman vd. 2010). Eksenel ve radyal kaymalı yataklarda, hidrodinamik yağ filmi içerisindeki basınç dağılımı, yağ katkı maddelerinin yatak performansına etkisi, mikro kanallı yataklarda sürtünme davranışı gibi yağlama ve yataklarla ilgili birçok deneysel ve teorik çalışmalar mevcuttur (Sun ve Changlin, 2004; Woloszynski vd., 2015; Singh vd., 2020; Salman ve Durak, 2011; Durak 2003; Adatepe ve Bıyıklıoğlu 2009). Kaymalı yatakların bilimsel araştırması, Tower'ın 1883'de yayınladığı deneysel çalışması ve aynı yıl Petroff'un yataktaki sürtünmeyi viskoz sürtünmeye bağlayan hipotezi ile başlayıp 1886'da Reynolds'un hidrodinamik yağlama genel denklemini vermesiyle genişleyerek devam etmiştir (Kurban, 1990). Hashimoto(1997) tarafından yapılan çalışmada, kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğü ve türbülansın etkileri göz önüne alınarak Reynolds denklemi modifiye edilerek çözümler sunulmuştur. Kaymalı yataklar hakkındaki pek çok çalışma bulunmakta ve çalışmalar hala devam etmektedir. Myung vd.(2000), motor yataklarındaki çevresel yağ kanallarının minimum yağ kalınlığı üzerindeki etkilerini araştırarak Reynolds diferansiyel denkleminin, sonsuz uzunluktaki yatak boyu modeline göre akışkan film basıncı hesaplanmış ve çevresel kanallı ile çevresel kanalsız yataklar için sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Wang vd. (2016) yağlayıcı olarak su kullanan radyal kaymalı yataklarda basınç dağılımını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elde etmişlerdir. Çalışmada farklı mil dönüş hızları ve malzeme Elastisite Modülü ve Poisson oranının yük taşıma kapasitesi ve elastik deformasyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Santos vd.(2012) tarafından yapılan çalışmada, integral dönüşüm teknikleri ile radyal kaymalı yataklarda hidrodinamik yağlama analizi yapılmıştır. Syfris ve Chasalevris (2012) sonlu uzunluktaki bir kaymalı yataktaki yağlayıcının basınç dağılımı için Reynolds denklemini analitik olarak çözüp, basınç profil diyagramlarını yaklaşık analitik ve sayısal çözümlerle karşılaştırmışlardır. Mane ve Soni (2013) tarafından Reynolds denklemi sonsuz kısa ve sonsuz uzun mil yatağı için teorik olarak çözülmüş ve simülasyon sonuçlarını elde etmek için Comsol yazılımı kullanılarak analitik sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Liu vd. (2010) karmaşık bir rotor yatak sisteminin elasto-hidrodinamik yağlamasını analiz etmek için Navier-Stokes denklemine ve bir akışkan-yapı etkileşimi tekniğine dayanan hesaplamalı akışkanlar dinamiğini kullanarak bu tekniklerinin, hidrodinamik ve elastohidrodinamik yağlamanın araştırılması için yararlı bir araç olduğu göstermişlerdir. Gao vd. (2014), su ile kaymalı yatağın hidrodinamik yağlama altında sayısal analizini yaparak Ansys-Fluent programı ile, Şimşek (2014), Kisoft programı ile teorik sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Tobias (2016), kaymalı yataklar için, Comsol yazılımını kullanarak, daha önceki çalışmalardan elde edilen verileri karşılaştırarak, hem statik hem de dinamik analizlerle yatak parametrelerini hesaplamıştır.

Bu çalışmada; Reynolds denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak, basınç alanını ağ yapılarına bölerek her bir basınç noktası için iteratif bir çözüm yapılarak algoritma oluşturulmuştur. Matlab'de yazılan program ile elde edilen basınç değerleri benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Literatürden seçilen örnek yatak parametreleri ile elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Hidrodinamik Yağlama Teorisi (Hydrodynamic Lubrication Theory)

Hidrodinamik yağlama, yüzeyler arasındaki boşluğun şekline ve izafi hızına bağlı olarak yüzeylerin birbirinden tamamen ayrılması için yeterli basınca sahip bir yağ tabakası oluşturan yağlama sistemidir. Hidrodinamik yağlama teorisinin amacı; yağ filmi içinde hangi koşullarda yataкта (Şekil 1) basıncın oluştuğunu ve bu basıncın nasıl değiştiğini belirlemektir. Daha sonra buna bağlı olarak yatağın yük taşıma kapasitesi başta olmak üzere gerekli yağ miktarını, minimum yağ film kalınlığını, sıcaklığı, sürtünme katsayısını ve gerekli yatak temel boyutlarını hesaplayabilmek için ihtiyaç duyulan eşitlikleri belirlemektir. Hidrodinamik yağlama denklemi, Reynolds yağlama diferansiyel denklemi olarak bilinmektedir. Bu denklemin esası Navier-Stokes hareket denklemlerine dayanıp ilave olarak da süreklilik denklemi, akışkanların hareketi ve yoğunluğu ile ilgili denklemleri de dikkate almaktadır. Reynolds diferansiyel denklemi, başlangıç koşulları belirlenerek ve bir takım ön kabuller ile çözülmektedir. (Budynas ve Nisbett, 2006).

Reynolds'un temel yağlama diferansiyel denklemi başlangıç olarak şu şekilde verilir (Frene vd. 1990);

$$\frac{\partial}{\partial x} (h^3 \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (h^3 \frac{\partial P}{\partial z}) = 6\eta U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

Uygulanan eksantriklik için; Reynolds denklemi,

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{3}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{3}{h} \frac{\partial h}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{6\eta U}{h^3} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

Sonlu farklar metodunun Reynolds denkleminde uygulanmasından sonra oluşan denklem sistemi;

$$-p(i,j)\left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta z^2}\right) + p(i+1,j)\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{2\Delta x} + \frac{3}{h}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + p(i-1,j)\left(\frac{1}{\Delta x^2} - \frac{1}{2\Delta x} + \frac{3}{h}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + p(i,j+1)\left(\frac{1}{\Delta z^2} + \frac{1}{2\Delta z} + \frac{3}{h}\frac{\partial h}{\partial z}\right) + p(i,j-1)\left(\frac{1}{\Delta z^2} - \frac{1}{2\Delta z} + \frac{3}{h}\frac{\partial h}{\partial z}\right) = \frac{6\mu U}{h^3} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (7)$$

olarak elde edilir, bu denklem sisteminin çözümde kullanılan sınır şartları ise;

$$x=0 \quad i=1 \quad j \in [1, M-1] \quad p(1,j)=p_s$$

$$x=B \quad i=N \quad j \in [1, M-1] \quad p(N,j)=p_s$$

şeklinde belirlenerek çözüm değerlerinin bulunması ile yük;

$$W=(W_r2+W_t2)1/2 \quad (8)$$

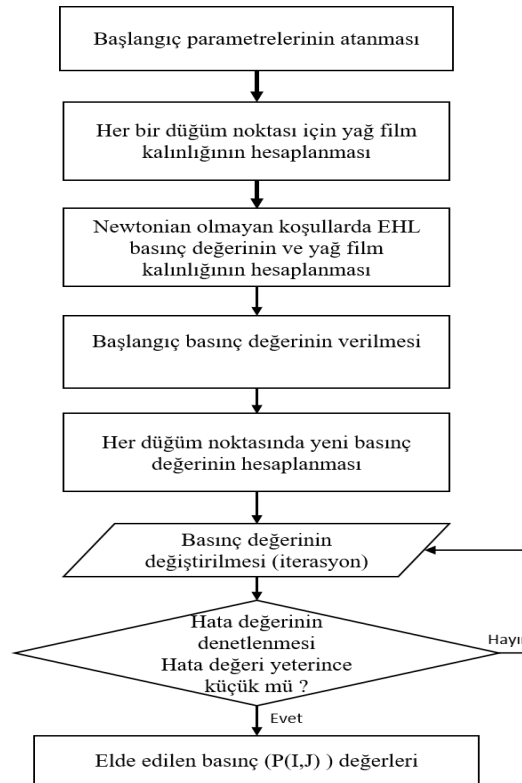
sürtünme katsayısı;

$$\mu = \frac{Ca}{R.W} \quad (9)$$

ile hesaplanabilir. Çözümde kullanılan değişkenlere ait tanımlamalar şu şekildedir;

<i>p</i> : basınç [Pa],	<i>e</i> : Eksantrisite
<i>D</i> : Yatak çapı	<i>C</i> : Radyal açıklık
<i>B</i> : Yatak Genişliği	η : Viskosite [Pas]
<i>R</i> : <i>D</i> /2 Yatağın Yarıçapı	<i>w</i> : Açısal hız
<i>L</i> : Yatak Uzunluğu	<i>U</i> : Çizgisel hız
<i>h</i> : Yağ film kalınlığı	<i>x, z</i> - Hidrodinamik film koordinatları
<i>e</i> : Eksantrisite oranı	μ : Sürtünme katsayısı
<i>W</i> : Yük taşıma Kapiliyeti	<i>ca</i> : Tork

Bilgisayar programı hazırlanırken özellikle Reynolds Diferansiyel denkleminin nümerik ve analitik çözüm algoritmaları incelenmiştir. Hazırlanan Matlab paket programı ile algoritmalar yeniden analiz edilerek farklı altı araştırma tarafından kullanılan program ve deney sonuçları kıyaslanarak benzerlik ve farklılıklar analiz edilmiştir. Temel algoritmaya ait akış şeması Şekil 3'de verilmiştir.

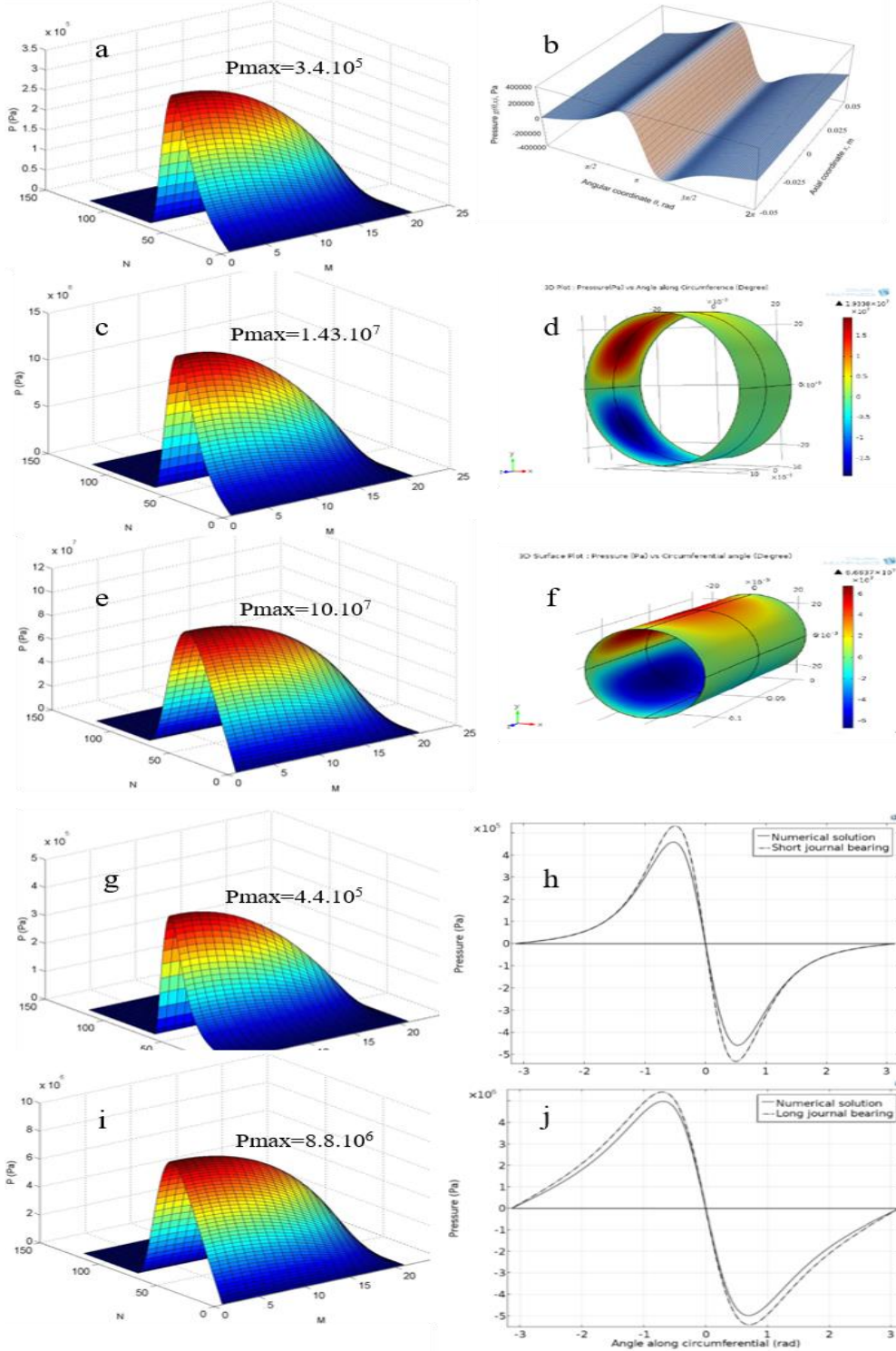


Şekil 3. Bilgisayar programı akış diyagramı (Flowchart of the implemented solution)

3. Araştırma Bulguları ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Hazırlanan Programın Doğrulanması ve Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması (Test and Verification by Reference Studies)

Yükün dikey bir eksen boyunca uygulandığı farklı araştırmacılar tarafından incelenen kaymalı yatak için geometrik parametreler ve çalışma koşulları (Tablo 1 ve 2) verilmiş olup deney sonuçları hazırlanan programla kıyaslanmıştır (Şekil 4 ve 5).



Şekil 4. Bu çalışmada hesaplanan basınç değerleri (a, c, e, g, i) ve Tablo 1’de verilen referans çalışmalara ait basınç değerleri (b, d, f, h, j). (Pressure values in this study (a,c,e,g,i) and reference study values in Table 1(b,d,f,h,i))

Tablo 1. Karşılaştırmada kullanılan yatak parametreleri (Reference journal parameters used at comparison)

Parametre	Syfris ve Chasalevis (2012) b*	Mane ve Soni (2013) (kısa yatak) d*	Mane ve Soni (2013) (uzun yatak) f*	Tobias (2016) (kısa yatak) h*	Tobias (2016) (uzun yatak) i*
Yarıçap (mm)	50	25	25	15	15
Uzunluk (mm)	100	25	125	7.5	75
Açıklık (mm)	0.5	0.025	0.025	0.03	0.03
Eksantrisite oranı	0.7	0.5	0.5	0.6	0.6
Mil hızı [d/d]	955	1000	1000	2000	2000
Viskozite [Pa s]	0.05	0.19	0.19	0.02	0.02

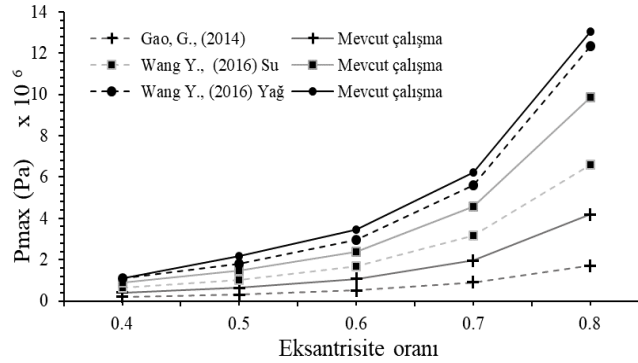
* Şekil 4’de kullanılan referans çalışmaları.

Syfris ve Chasalevis(2012) tarafından yapılan çalışmada, basınç dağılım eğrisi bu çalışmada hesaplanan basınç değeri ile uyumludur. Mane ve Soni (2013) ve Tobias (2016) tarafından yapılan çözümler Comsol ortamında yapılmıştır. Mevcut çalışma ile karşılaştırıldığında, kısa yatak için elde edilen pmax değerleri uyumlu iken, uzun yatak için hesaplanan değerler, referans çalışmaya göre, daha yüksek hesaplanmıştır (Şekil 4).

Gao vd. (2014) ve Wang vd. (2016) tarafından, Pmax hesabı için kullanılan, farklı mil hızı ve viskozite değerleri ile farklı eksantrisite oranlarına göre de (Tablo 2) denklem çözümleri yapılmıştır. Elde edilen basınç değerleri, referans çalışmalardan yüksek olmakla birlikte, değişimleri birbirine paraleldir.

Tablo 2. Farklı eksantrisite oranları (0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8) için yatak parametreleri (Journal parameters at different eccentricity ratios (0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8))

Parametreler	Gao (2014)	Wang (2016) Su	Wang (2016) Yağ
Yarıçap (mm)	40	40	40
Uzunluk (mm)	80	80	80
Açıklık (mm)	0.04	0.04	0.04
Mil hızı [d/d]	1500	2000	2000
Yağ viskozitesi [Pa s]	0.001	0.001	0,02

**Şekil 5.** Farklı eksantrisite oranları (0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8) için Pmax basınç değerlerinin karşılaştırılması (Pressure values at different eccentricity ratios (0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8))

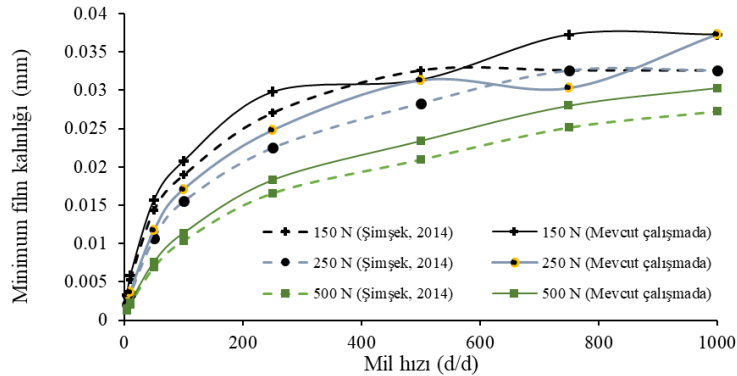
Ayrıca hem deneysel hem teorik çalışmanın birlikte yapıldığı alüminyum alaşımlı AA7075 malzemeli silindirik ve tek parça halinde 3 mm yağlama deliğine sahip bir yatağa ait veriler Tablo 3’de verilmiştir (Şimşek 2014). Statik yük altında radyal kaymalı yatakların sürtünme davranışının teorik olarak belirlenmesini içeren DIN 31652’e göre de hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen teorik minimum yağ film kalınlığı Şekil 6’da, sürtünme katsayısı da Şekil 7’de verilmiştir. Yağ film kalınlığının artmasından, mil merkezinin yatak merkezine yaklaştığı ve mil yüzeyinin yatak yüzeyinden uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca bu değişim de eksantrisite oranının azalmasına sebep olmaktadır. Düşük hızlarda sürtünme katsayısının küçük değerlerde olması Reynolds denkleminin sadece akışkan molekülleri arasındaki viskoz sürtünme esasına dayandırılmasından kaynaklanmaktadır.

Diğer yandan yağlama literatüründen (Durak 2019; Adatepe vd. 2012; Temiz 2014; Soydan ve Ulukan 2013; Koç 2008) Stribeck eğrisinde, düşük hızlarda, sürtünme katsayıları (sınır yağlama bölgesinde) çok daha büyük değerlerdedir. Çünkü bu bölgede sürtünme katsayısı yatak – mil yüzey pürüzlerinin temasında oluşan mekanik

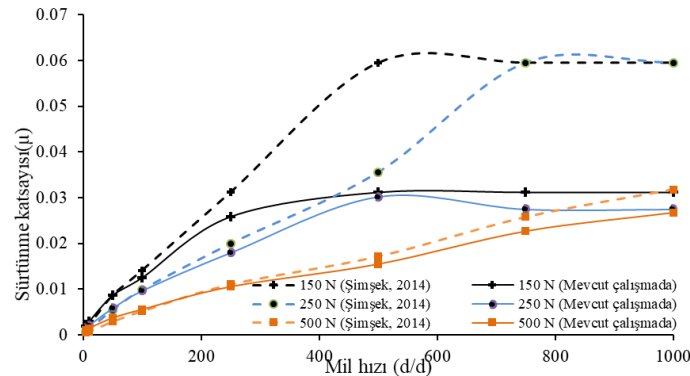
sürtünme ile yağ molekülleri arasındaki viskoz sürtünme katsayılarının toplamından oluşmaktadır. Sıvı yağlama bölgesinde ise artan hız ile sürtünme katsayısı artması kayma gerilmesi sonucundadır. Ayrıca yük taşıma kabiliyeti ve yatak yükünün mil hızı ile değişimi de Şekil 8' de verilmektedir. Bu grafikte görüldüğü gibi düşük hızlarda yağ filminin içerisindeki yağ basıncının oluşturduğu yük taşıma kabiliyeti daha yüksek değerde olup hızın artması ile yatağa uygulanan yüke göre daha fazla düşüş eğilimi göstermektedir. Bu düşüşe, hızın artması ile eksantrisite oranında oluşan azalmanın sebep olduğu açıktır. Çünkü mil merkezi yatak merkezine doğru hareket ettikçe yağ film basınç dağılımının azaldığı bunun da yük taşıma kabiliyetini azalttığı anlamına gelmektedir. Ancak yine de tüm çalışma şartlarında yük taşıma kabiliyeti yatağa uygulanan yükten daha büyüktür.

Tablo 3. Bu çalışmada kullanılan Şimşek (2014)' e ait yatak parametreleri
(Bearing parameters used in this study)

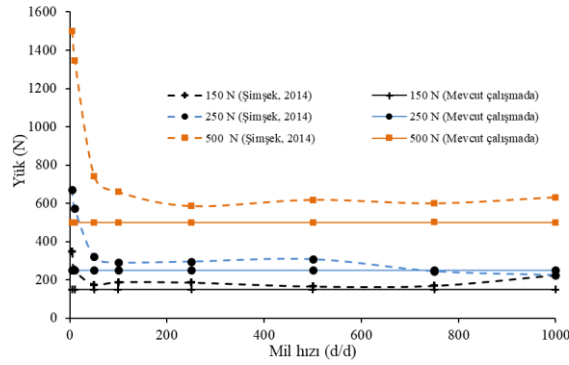
Parametre	Parametre değeri
Mil çapı d_{max} [mm]	41.935
Mil çapı d_{min} [mm]	41.9348
zYatak iç çapı D_{max} [mm]	41.9756
Yatak iç çapı D_{min} [mm]	41.975
Yatak genişliği	25 mm
Mil hızı [d/d]	5, 10, 50, 100, 250, 500, 750, 1000
Yağ sıcaklığı [°C]	40
Mil yüzey pürüzlülüğü Ra [μ m]	0.126
Yağ viskozitesi [Pa s]	0.156
Yük [N]	150, 250, 500
Ortam sıcaklığı [°C]	25



Şekil 6. Mevcut çalışmada hesaplanan minimum yağ film kalınlığı - mil hızı değişiminin Şimşek (2014) ile karşılaştırmalı grafiği (Lubricant film thickness vs journal speed comparison with Şimşek(2014))



Şekil 7. Mevcut çalışmada hesaplanan minimum sürtünme katsayısı - mil hızı değişiminin Şimşek (2014) ile karşılaştırmalı grafiği (Friction coefficient vs shaft speed comparison with Şimşek(2014))



Şekil 8. Mevcut çalışma ile hesaplanan yük taşıma kabiliyeti ve yatak yükünün mil hızı ile değişiminin Şimşek (2014) ile karşılaştırmalı grafiği (Comparison to change of the bearing capacity and load vs shaft speed with Şimşek(2014))

4. Sonuçlar (Conclusions)

Tribolojik problemlerin modellenmesi ve çözümü için bilgisayar teknolojilerinin kullanımı sayesinde hızlı sayısal hesaplamalar hidrodinamik yağlama teorisini anlamada etkili olmaktadır. Ulaşılan çözümler ve modellemeler yatak parametrelerini belirlemede önemli faydalar sağlamaktadır. Yapılan Reynolds Diferansiyel Yağlama Denklemine çözümünde yatak tasarımı için genel olarak;

- Mil hız değeri küçüldükçe basınç değerinin küçüldüğü,
- Açıklık değeri büyüdükçe basınç değerinin küçüldüğü,
- Eksantrisite oranları arttıkça basıncın arttığı,
- Vizkosite değerleri arttıkça basıncın arttığı görülmüştür.

Eksantrisite oranları arttıkça (0.8 ve 0.9 için) Gao (2014) tarafından yapılan çalışma ile kıyaslandığında, MATLAB tarafından hesaplanan sonuçlar arasındaki fark da artmıştır. Tobias (2016) ve Mane ve Soni (2013) uzun yatak deney sonuçları karşılaştırıldığında ise pmax değeri hesaplanan değerden biraz uzaklaşmıştır. Elde edilen basınç dağılımları grafik sonuçlarından da açıkça görüleceği gibi, literatürdeki altı adet çalışma, hazırlanan Matlab programı ile uyumludur. Literatürde kullanılan geçerliliği ispatlanmış Comsol, Ansys-fluent ve Kisoft gibi bilgisayar programları ile karşılaştırması yapılan programın ulaştığı yakınsak sonuçlar çalışmayı özgün kılmaktadır.

Yapılan sayısal örnek çözümünde ise mil hızının artması ile minimum yağ film kalınlığının ve sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Hızın artması ile seçilen örnek yatak parametrelerinin optimum yatak tasarım bölgesinden uzaklaştıkları görülmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Adatepe, H., Bıyıklıoğlu, A., 2009. Dinamik Yüklü Radyal Kaymalı Yataklarda Yağ Giriş Sıcaklığının Yatak Performansına Etkisi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 6, No: 4, 2009 (1-10)
- Adatepe, H., Cengil, M., Güneş, B., 2012. Statik Yük Altındaki Kaymalı Yataklarda Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 9, No: 1, 2012(25-34)
- Budynas, R., Nisbett, K., 2006. Shigley's Mechanical Engineering Design. McGraw-Hill Primis ISBN: 0-390-76487-6.
- Durak, E., 2003. Borik Asitin Katkı Maddesi Olarak Yağlama Yağında Kullanılmasının Araştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 5-1, 121-129.
- Durak, E., 2019. Kaymalı yatak tasarımı kriterleri II, Erişim Tarihi: 23.05.2019. <https://lubricant-world.com/kaymalı-yatak-tasarımı-kriterleri-ii/>
- Frêne, J., Nicola, D., Degueurce, B., Berthe, D., Godet, M., 1997. Hydrodynamic lubrication bearings and thrust bearings. In Tribology series 33 (Ed. D. Dowson), 470 p. Elsevier, London, UK.
- Frêne, J., 1998. CFD Techniques in Hydrodynamic Lubrication, Ders Notları. Boğaziçi Üniversitesi, Makina Mühendisliği, İstanbul.
- Gao, G., Yin, Z., Jiang, D., Zhang, X., 2014. Numerical analysis of Plain Journal Bearing under Hydrodynamic Lubrication by Water. Tribology International, 75, 31-38. doi:10.1016/j.triboint.2014.03.009
- Grabon' W., Smykla J., 2012. Computer Program for Simulation of Pressure Distribution in the Hydrodynamic Radial Bearing. Artif Intell Driven Solut Bus Eng Prob, pp. 176-186 ISBN: 978-954-16-0060-3.

- Hashimoto, H., 1997. Surface Roughness Effects in High- Speed Hydrodynamic Journal Bearings, *ASME Journal of Tribology*, 119, 4,776-780.
- Koç, E., 2008. Makina Elemanları Cilt 2., Adana Nobel Kitabevi, Adana.
- Kurban, A.O., 1990. Eksenel Kaymalı Yataklarda Elastohidrodinamik Yağlama ve Elastik Deformasyona Uğrayabilen Kaymalı Yatak Dizaynı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 110s, Kayseri.
- Liu, H., Xu, H., Ellison, P. J., Jin, Z., 2010. Application of Computational Fluid Dynamics and Fluid-Structure Interaction Method to the Lubrication Study of a Rotor-Bearing System. *Tribology Letters*, 38(3), 325-336. doi: 10.1007/s11249-010-9612-6.
- Mane, R.M., Soni, S., 2013. Analysis of Hydrodynamic Plain Journal Bearing, Excerpt from the Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Bangalore.
- Myung-Rae, C., Shin,H.J. ve Han,D.C., 2000. A Study On The Circumferential Groove Effects On The Minimum Oil Film Thickness In Engine Bearings *Ksme International Journal*, Vol. 14, No. 7, 737- 743.
- Nuruzzaman, D. M., Khalil, M. K., Chowdhury, M. A., Rahaman, M. L., 2010. "Study on Pressure Distribution and Load Capacity of a Journal Bearing Using Finite Element Method and Analytical Method," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, vol. 10, no. 5.
- Razavykia, A., Delprete, C., Baldissera, P., 2019. Numerical Study of Power Loss and Lubrication of Connecting Rod Big-End, *Lubricants* 7, 47; doi: 10.3390/lubricants7060047.
- Salman,Ö, Durak, E., 2011. Çevre Dostu Bitkisel Yağ Esaslı Yağlama Yağları, *YTÜ Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma 29,412-421.
- Santos, E.N., Blanco, C.J.C., Macêdo, E.N., Maneschy, C.E.A., Quaresma, J.N.N.,2012. Integral transform solutions for the analysis of hydrodynamic lubrication of journal bearings. *Tribology International*, 52 s, 161-169.
- Şimşek, M., 2014. Mikro Ark Oksidasyon İle Al2O3 Kaplanmış AA7075 Alaşımının Kuru Ve Yağlı Şartlarda Sürtünme Ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 232s, Isparta.
- Singh, A., Verma, N., Chaurasia, A., Kumar, A., 2020. Effect of TiO2 Additive Volume Fraction in Lubricant Oil on the Performance of Hydrodynamic Journal Bearing. *IOP Conf. Series:Materials Science and Engineering* 802, doi:10.1088/1757-899X/802/1/012005.
- Soydan Y., Ulukan L., 2013. Temel Triboloji. Sürtünme- Aşınma Yağlama Bilimi ve Teknolojisi. Sakarya.
- Sun, J., Changlin, G., 2004. Hydrodynamic Lubrication Analysis of Journal Bearing Considering Misalignment Caused by Shaft Deformation, *Tribology International*, Volume 37, Issue 10, Pages 841-848, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.05.007>
- Syfris D., Chasalevris A., 2012. An Exact Analytical Solution of the Reynolds Equation for the Finite Journal Bearing. *Tribology International*. 55(1), pp. 46-58. doi:10.1016/j.triboint.2012.05.011.
- Temiz, V. 2014. Makina Elemanları 1 Triboloji Genel Bilgiler, Ders notları. Erişim tarihi: 15.05.2019. <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Triboloji.pdf>.
- Tobias H., 2016. Journal Bearing Design Tool: Time-dependent Analysis of Bearing Film Thickness, Power Loss and Load Response, Master of Science in Engineering Technology, Mechanical Engineering, Luleå University of Technology.
- Wang Y., Yin Z., Jiang D., Gao G., Zhang X., 2016. Study of the lubrication performance of water-lubricated journal bearings with CFD and FSI method. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68(3) pp. 341-348. doi: 10.1108/ILT-04-2015-0053.
- Woloszynski, T., Podsiadlo P., Stachowiak, G.W., 2015. Efficient Solution to the Cavitation Problem in Hydrodynamic Lubrication, *Tribology Letters* volume 58, 18.