
FARKLI MALZEME KOMBİNASYONLARINA SAHİP RADYAL BİLYALI RULMANLARIN TOPLAM LOKAL EZİLME MİKTARLARI VE BOYUTSUZ FİLM PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

*Gültekin KARADERE**
*Cenk TOSUN***

Alınma: 20.09.2018 ; düzeltme:08.04.2019 ; kabul: 09.04.2019

Öz: Bu makalede üç farklı malzeme kombinasyonu için üç farklı radyal yükün uygulandığı radyal bilyalı rulmanların yuvarlanma yüzeylerindeki toplam lokal ezilme miktarları ve boyutsuz film parametreleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. İncelenen yük sahasında herhangi bir malzeme kombinasyonu için radyal yük iki kat artırıldığında toplam ezilme miktarları yaklaşık %58 artmıştır. Aynı yük için malzeme kombinasyonlarını karşılaştırdığımızda, yükün değerinden bağımsız olarak, tamamen seramik olan yataktaki toplam ezilme miktarının hibrid seramik yatağına göre yaklaşık %15, tamamen çelik olanına göre %25 daha az olduğu bulunmuştur. Herhangi bir malzeme kombinasyonu için radyal yük iki kat artırıldığında boyutsuz film parametresi yaklaşık % 5 azalmaktadır. Malzeme kombinasyonundan bağımsız olarak iç bilezik-bilya temasındaki film parametresi dış bilezik-bilya temasındakinden yaklaşık % 16 daha küçük bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Radyal bilyalı rulman, toplam lokal ezilme miktarı, boyutsuz film parametresi, seramik yatak, hibrid yatak.

Comparison of total local compressions and dimensionless film parameters of radial ball bearings with different material combinations

Abstract: In this article, the total local compressions and the dimensionless film parameters of the rolling surfaces of radial ball bearings, in which three different radial loads are applied for three different material combinations, are calculated and compared. When the radial load was doubled for any material combination in the examined load area, the total local compressions increased by about 58%. When we compare material combinations for the same load, it was found that the total local compressions on the completely ceramic bearing, irrespective of the value of the load, were about 15% less than that of the hybrid ceramic bearing and 25% less than that of the completely steel bearing. When the radial load is doubled for any material combination, the dimensionless film parameter is reduced by about 5%. The film parameter in the inner ring-ball contact, regardless of material combination, was found to be about 16% smaller than that of the outer ring-ball contact.

Keywords: Radial ball bearing, total local compression, dimensionless film parameter, ceramic bearing, hybrid bearing.

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059 Nilüfer/Bursa

** Cevher Jant Sanayii A.Ş., Ege Serbest Bölgesi, Kürşad Sokak, No:10, 35411 Gaziemir/İzmir

İletişim Yazarı: G. Karadere (karadere@uludag.edu.tr)

1. GİRİŞ

Mühendislik mekanizmalarında millerin dönme hareketine izin vermek için kullanılan bilyalı rulmanlar sürtünmenin azaltılmasının önemli olduğu birçok uygulamada yuvarlanma elemanlı yatakların başka herhangi bir tipinden daha fazla kullanılmaktadır. Yuvarlanma elemanlı yataklarda temas yüzeyleri arasında elastik deformasyonun önemli olduğu elastohidrodinamik (EHD) yağlama söz konusudur (Hamrock ve ark., 2006). Ayrıca rulmanlı yataklarda temas alanı çok küçük olduğundan yuvarlanma yüzeylerinde yüksek Hertz basınçları oluşmaktadır. Diğer taraftan rulmanlı yataklarda ekseriya 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 (Tevrüz, 2015).

Konvansiyonel uygulamalar için çoğu rulmanlı yataklar, AISI 52100 gibi yüksek karbonlu, yüksek kromlu, sertleştirilmiş rulman çeliğinden yapılmıştır. Daha zorlu havacılık uygulamaları için, önemli ölçüde geliştirilmiş yorulma ve aşınma ömrüne sahip rulmanlar VIMVAR (vakumlu indüksiyonla ergitilmiş, vakumlu ark ile yeniden ergitilmiş) M50 takım çeliğinden imal edilebilirler (Wang ve ark., 2000).

Çelik malzemeden imal edilmiş standart rulmanların kullanımı bir takım problemler çıkardığında, seramik bilyalar ve çelik bileziklerden oluşan hibrid 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 yalıtıcılık 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).

Lundberg ve Palmgren teorisine göre yuvarlanma temasında yorulma ömrü $L = (C/F)^{n/3}$ olarak ifade edilebilir. L milyon devir cinsinden yatak yorulma ömrü; C %90 güvenilirlikte bir milyon devir ömre karşılık gelen yük değeri olarak rulman kataloğunda verilen dinamik yük sayısı, F rulman eşdeğer dinamik yükü ve n üssü malzemeye ve yuvarlanma elemanı şekline bağlı bir sabittir. Tek sıralı çelik bilyalı rulmanlar için $n = 9$; tek sıralı çelik makaralı rulmanlar için $n = 10$ iken silisyum nitrür bilyalı rulmanlar için $n = 16$ 'lık bir ortalama değer kullanılmıştır (Zaretsky, 1989).

Tamamen seramik malzemeden yapılmış bilyalı rulmanlarda bilezikler ve bilyalar yüksek tribolojik özellikler gösteren Silisyum Nitrür (Si_3N_4), Zirkonyum Oksit (ZrO_2) veya Silisyum karbürden (SiC) 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/>).

Düşük salınım hızlı, yüksek yüklü silisyum nitrür bilyalara sahip hibrid yatakların hasar evriminin incelendiği bir çalışmada, özellikle ilerleyici hasarın, hibrid 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. (Ghezzi ve ark., 2018).

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

ZrO_2 bilezikler arasında Si_3N_4 bilyalarından oluşan tamamen seramik Y-TZP zirkonyadan (Yttria-Tetragonal Zirconia Polycrystal) yapılmış bir seramik bilya yatağının hasar analizinin

incelendiği bir çalışmada, uygulama sırasında yatakta oluşan ilave mekanik yüklemenin ve muhtemelen yanlış montajın, dengesizliğe yol açtığı ve bunun da, Si_3N_4 bilyalar üzerinde zirkonyum aşınma ürünlerini biriktirdiği ve böylece hasar sürecini hızlandırdığı belirtilmiştir (Harrer ve ark., 2014).

SiC yüksek sertlik ve mukavemet (aşınma ve kimyasal korozyona yüksek direnç), yüksek termal iletkenlik ve düşük termal genleşme katsayısı (mükemmel termal stabilite) gibi faydalı özelliklerinden dolayı tribolojik uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. (Xia ve ark., 2013).

Milisaniye aralığında darbe süresi ile darbeleri-periyodik lazer işlemi kullanılarak SiC seramik yüzeyinin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi olasılığının araştırıldığı bir çalışmada yüzeyin ortalama sürtünme katsayısının lazer işleminden sonra % 15 azaldığı gösterilmiştir (Murzin ve ark., 2015).

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 (Jablonka ve ark., 2018).

Bu makalede üç farklı radyal yatak yüküne maruz kalan ve üç farklı malzeme kombinasyonuna sahip olan radyal bilyalı rulmanların yuvarlanma yüzeylerindeki toplam ezilme miktarları ve yorulma ömürlerinin tayininde önemli rol oynayan boyutsuz film parametreleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Radyal Bilyalı Rulmanlarda Yağ Film Kalınlığının Hesaplanması

Elastohidrodinamik olarak yağlanmış eliptik temaslar için eğri uydurma sonuçlarından bulunan boyutsuz minimum film kalınlığı bağıntısı aşağıda verilmiştir (Hamrock ve Dowson, 1981; Hamrock, 1994).

$$\tilde{H}_{e,min} = \frac{\tilde{h}_{min}}{R_x} = 3,63 \cdot U^{0,68} \cdot G^{0,49} \cdot W^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k}) \quad (1)$$

Bu bağıntıdaki \tilde{h}_{min} [m] eğri uydurma sonuçlarından bulunan minimum film kalınlığı, x eliptik temas yüzeyinde yuvarlanma hareketi yönündeki yatay eksen olmak üzere R_x [m] x yönündeki efektif yarıçap, $U = \eta_0 \cdot \tilde{u} / E' \cdot R_x$ boyutsuz hız parametresi, η_0 [Pa.s] p=0 ve sabit sıcaklıktaki mutlak viskozite, $\tilde{u} = (u_a + u_b) / 2$ [m/s] x yönündeki ortalama yüzey hızı,

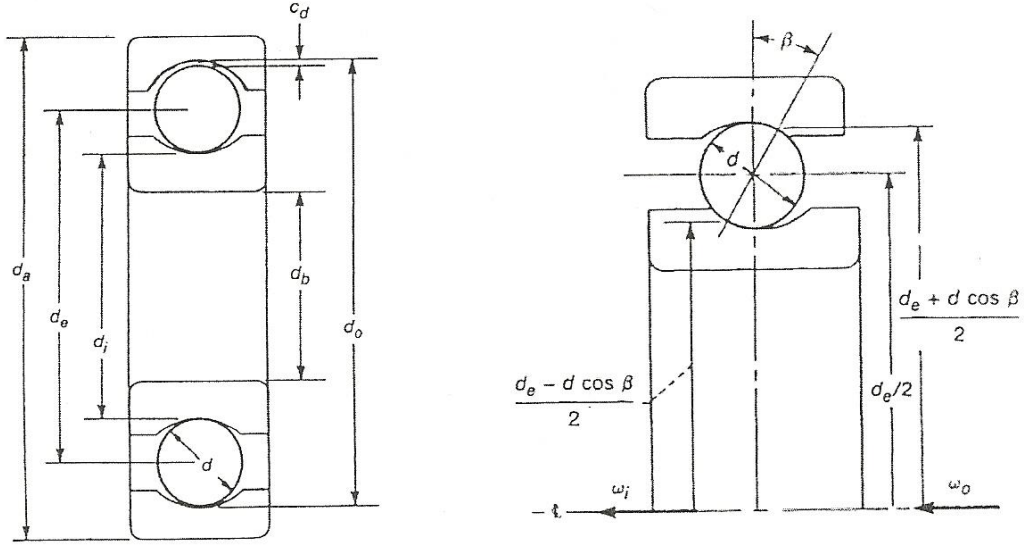
$$E' = \frac{2}{\frac{(1-\nu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\nu_b^2)}{E_b}} \text{ [Pa] efektif elastiklik modülü, } E_a \text{ [Pa] bileziklerin elastiklik modülü,}$$

ν_a [-] bileziklerin Poisson oranı, E_b [Pa] bilyaların elastiklik modülü, ν_b [-] bilyaların Poisson oranı, $G = \xi \cdot E'$ boyutsuz malzeme parametresi, ξ [Pa⁻¹] basınç-viskozite katsayısı,

$W = w'_z/E' \cdot R_x$ boyutsuz yük parametresi, z radyal yük eksen, w'_z [N/m] birim genişlikteki

normal yük, $k = D_y/D_x$ eliptiklik parametresi, y yuvarlanma hareketi yönüne dik yatay eksen,

D_y ve D_x [m] sırasıyla eliptik temas yüzeyinin y ve x eksenindeki uzunluklarıdır.



Şekil 1:

Tek sıralı radyal bilyalı rulman boyutları (Hamrock, 1994)

Radyal bilyalı rulmanların farklı radyal yüklerdeki ezilme miktarlarını ve oluşan yağ film kalınlığını hesaplayabilmek için rulman geometrisinin bilinmesi gerekir. Şekil 1' de tek sıralı radyal bilyalı rulman kesitlerinde radyal boşluk (c_d), bilya çapı (d), dış bilezik dış çapı (d_a), iç bilezik iç çapı (d_b), dış bilezik maksimum temas çapı (d_o), iç bilezik minimum temas çapı (d_i), dış ve iç bileziklerin ortalama temas çapı (d_e), β temas açısında bilya ve bileziklerin iç ve dış temas noktalarındaki yarıçapları gösterilmiştir (Hamrock, 1994).

Öncelikle uygun işletme koşulları için bilya ve bilezikler arası iç ve dış temas geometrilerinin temel özellikleri hesaplanarak yuvarlanma yüzeylerindeki maksimum lokal elastik ezilme miktarlarının toplamı bulunmuştur. Daha sonra 5 adımlı iterasyon sonucunda en çok zorlanan bilyaya gelen radyal yük değeri kesinleştirilmiştir. Daha sonraki işlemlerde salt yuvarlanma halinde iç ve dış temas yüzeylerindeki boyutsuz hız, malzeme ve yük parametrelerinin bulunması ve yukarıdaki (1) bağıntısının kullanılmasıyla EHD minimum film kalınlığı hesaplanmıştır. Film kalınlığının kompozit yüzey pürüzlülüğüne bölünmesiyle boyutsuz film parametresi bulunmuştur.

2.2. Sayısal Hesaplamalar

Bu çalışmada üç farklı radyal yük ve üç farklı malzeme kombinasyonu için toplam dokuz adet hesaplama yapılmıştır. Hesaplamalar aynı şekilde yapıldığından örnek olarak sadece bir tanesi detaylı olarak gösterilecek, diğer hesaplamalara ait sonuçlar toplu halde bir tabloda verilecektir. Örnek hesaplama orta seviyede bir radyal yüke maruz kalan seramik bilyalar ve çelik bileziklerden oluşan radyal bilyalı hibrid rulman için yapılacaktır. Bu rulmana ait büyüklükler ve çalışma koşulları aşağıda verilmiştir (Tosun, 2002).

$$\begin{aligned}d_i &= 52,291 \text{ mm (iç bilezik minimum temas çapı)}, \\d_o &= 77,706 \text{ mm (dış bilezik maksimum temas çapı)}, \\d &= 12,700 \text{ mm (bilya çapı)}, \\n &= 9 \text{ (rulmandaki toplam bilya sayısı)}, \\R_i = R_o = r &= 6,604 \text{ mm (iç ve dış bilezik yuvası yuvarlatma yarıçapları)} \\ \beta &= 0^\circ \text{ (temas açısı)} \\ R_{q,b} &= 0,0625 \mu\text{m (bilyaların rms yüzey pürüz yüksekliği)} \\ R_{q,a} &= 0,175 \mu\text{m (bilezik yuvalarının rms yüzey pürüz yüksekliği)} \\ w_z &= 17.800 \text{ N (radyal yük)}, \\ \omega_i &= 400 \text{ rad/s (iç bilezik açısal hızı)}, \\ \omega_o &= 0 \text{ rad/s (dış bilezik açısal hızı)}, \\ \eta_0 &= 0,040 \text{ Pa.s (} p = 0 \text{ ve yatak efektif işletme sıcaklığındaki mutlak viskozite)}, \\ \xi &= 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \text{ (basınç-viskozite katsayısı)}, \\ E_a &= 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa (çelik bileziklerin elastiklik modülü)}, \\ \nu_a &= 0,3 \text{ (çelik bileziklerin Poisson oranı)}, \\ E_b &= 3,2 \cdot 10^{11} \text{ Pa (seramik bilyaların elastiklik modülü)}, \\ \nu_b &= 0,26 \text{ (seramik bilyaların Poisson oranı)},\end{aligned}$$

Bilya ve bilezikler arası iç ve dış temas geometrilerinin temel özellikleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

Ortalama temas çapı

$$d_e = 0,5 \cdot (d_o + d_i) = 65 \text{ mm}$$

Radyal boşluk

$$c_d = d_o - d_i - 2 \cdot d = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

Yuvarlanma yüzeylerinin uygunluk oranları tavsiye edilen değerdedir:

$$R_{r,i} = R_{r,o} = \frac{r}{d} = \frac{6,604}{12,700} = 0,52$$

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

$$R_{x,i} = \frac{d \cdot (d_e - d \cdot \cos\beta)}{2 \cdot d_e} = 5,110 \text{ mm}; R_{x,o} = \frac{d \cdot (d_e + d \cdot \cos\beta)}{2 \cdot d_e} = 7,590 \text{ mm}$$

$$R_{y,i} = \frac{R_{r,i} \cdot d}{2 \cdot R_{r,i} - 1} = 165 \text{ mm}; R_{y,o} = \frac{R_{r,o} \cdot d}{2 \cdot R_{r,o} - 1} = 165 \text{ mm}$$

İç bilezik-bilya ve dış bilezik-bilya temaslarının eğrilik toplamları

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{x,i}} + \frac{1}{R_{y,i}} = 201,76; \frac{1}{R_o} = \frac{1}{R_{x,o}} + \frac{1}{R_{y,o}} = 137,81$$

bağıntılarından $R_i = 4,956 \text{ mm}; R_o = 7,256 \text{ mm}$ bulunur.

Böylece iç ve dış temaslardaki yarıçap oranları sırasıyla aşağıdaki değerlerde olacaktır.

$$\alpha_{r,i} = \frac{R_{y,i}}{R_{x,i}} = 32,35 ; \alpha_{r,o} = \frac{R_{y,o}}{R_{x,o}} = 21,74$$

Şimdi Hertzian temas şartlarının tabiatı belirlenebilir. Eliptiklik parametreleri:

$$\bar{k}_i = \alpha_{r,i}^{2/\pi} = 9,15 ; \bar{k}_o = \alpha_{r,o}^{2/\pi} = 7,09 ; q_a = \frac{\pi}{2} - 1$$

Eliptik integraller:

$$\bar{\epsilon}_i = 1 + \frac{q_a}{\alpha_{r,i}} = 1,0176 ; \bar{\epsilon}_o = 1 + \frac{q_a}{\alpha_{r,o}} = 1,0263$$

$$\bar{F}_i = \frac{\pi}{2} + q_a \cdot \ln \alpha_{r,i} = 3,555 ; \bar{F}_o = \frac{\pi}{2} + q_a \cdot \ln \alpha_{r,o} = 3,3284$$

Efektif elastiklik modülü:

$$E'_{\text{çelik-seramik}} = 2 \cdot \left(\frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)^{-1} = 2,6796 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$$

Emniyetli bir tasarım oluşturmak amacıyla iterasyon başlangıcında $Z_w = 5$ değerini seçmek rutin bir uygulamadır.

1. Adım: En çok yüklenen bilyaya gelen yük kabaca

$$(w_z)_{\max} = \frac{Z_w \cdot w_z}{n} = \frac{5 \cdot 17800}{9} = 9888,9 \text{ N}$$

İç ve dış temas yüzeylerindeki maksimum lokal elastik ezilme miktarları:

$$\delta_i = \bar{F}_i \cdot \left[\frac{9}{2 \cdot \bar{\epsilon}_i \cdot R_i} \left(\frac{(w_z)_{\max}}{\pi \cdot k_i \cdot E'_{\text{çelik-seramik}}} \right)^2 \right]^{1/3} = 4,0428 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$\delta_o = \bar{F}_o \cdot \left[\frac{9}{2 \cdot \bar{\epsilon}_o \cdot R_o} \left(\frac{(w_z)_{\max}}{\pi \cdot k_o \cdot E'_{\text{çelik-seramik}}} \right)^2 \right]^{1/3} = 3,9401 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Lokal ezilme miktarlarının toplamı:

$$\delta = \delta_i + \delta_o = 7,983 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

olup aşağıdaki bağıntıda $c_d/2 \cdot \delta = (1,5)/2 \cdot (7,983) = 9,395 \cdot 10^{-2}$ yerine konulursa

$$Z_w = \frac{\pi \cdot (1 - c_d/2 \cdot \delta)^{3/2}}{2,491 \cdot \left\{ \left[1 + \left(\frac{1 - c_d/2 \cdot \delta}{1,23} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\}} \quad (2)$$

$Z_w = 4,4942$ bulunur. Bu değer kullanılarak ikinci iterasyon adımına devam edilir.

2. Adım:

$$(w_z)_{max} = \frac{Z_w \cdot w_z}{n} = \frac{4,4942 \cdot 17800}{9} = 8888,48 \text{ N}$$

Maksimum lokal elastik ezilme miktarları:

$$\delta_i = \bar{F}_i \cdot \left[\frac{9}{2 \cdot \bar{\epsilon}_i \cdot R_i} \left(\frac{(w_z)_{max}}{\pi \cdot k_i \cdot E'_{\text{çelik-seramik}}} \right)^2 \right]^{1/3} = 3,7653 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$\delta_o = \bar{F}_o \cdot \left[\frac{9}{2 \cdot \bar{\epsilon}_o \cdot R_o} \left(\frac{(w_z)_{max}}{\pi \cdot k_o \cdot E'_{\text{çelik-seramik}}} \right)^2 \right]^{1/3} = 3,6696 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Lokal ezilme miktarlarının toplamı:

$$\delta = \delta_i + \delta_o = 7,4349 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$c_d/2 \cdot \delta = (1,5) / 2 \cdot (7,4349) = 0,1009$ değeri (2) bağıntısında yerine konulursa $Z_w = 4,5047$

bulunur.

Benzer şekilde iterasyon adımlarına devam edilirse Tablo 1' deki sonuçlara ulaşılır.

Tablo 1. Hibrid yatakta $w_z = 17.800 \text{ N}$ için iterasyon adımları

İterasyon Adımları	Z_w [-]	$(w_z)_{max}$ [N]	δ_i [μm]	δ_o [μm]	δ [μm]	$c_d/2 \cdot \delta$ [-]
3. Adım	4,5047	8909,39	37,712	36,754	74,466	0,10072
4. Adım	4,5045	8908,91	37,710	36,752	74,463	0,10072
5. Adım	4,5045	8908,92	37,710	36,752	74,463	0,10072

Sonuçta $Z_w = 4,5045$ ve en çok yüklenen bilyaya gelen yük $(w_z)_{max} = 8908,92 N$ olarak bulunmuştur. EHD minimum film kalınlığı salt yuvarlanma halinde aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\tilde{u} = \frac{|\omega_o - \omega_i|. (d_e^2 - d^2)}{4. d_e} = 6,252 \text{ m/s}$$

Hız sadece yuvarlanma yönünde ($\tilde{v} = 0$) olduğunda sırasıyla iç ve dış temas alanları için boyutsuz hız (U), malzeme (G) ve yük (W) parametreleri aşağıdaki şekilde bulunacaktır.

$$U_i = \frac{\eta_o \cdot \tilde{u}}{E'_{\text{çelik-seramik}} \cdot R_{x,i}} = \frac{0,04 \cdot 6,252}{(2,6796 \cdot 10^{11}) \cdot (5,11 \cdot 10^{-3})} = 1,8264 \cdot 10^{-10}$$

$$G_i = \xi \cdot E'_{\text{çelik-seramik}} = (2,3 \cdot 10^{-8}) \cdot (2,6796 \cdot 10^{11}) = 6163$$

$$W_i = \frac{(w_z)_{max}}{E'_{\text{çelik-seramik}} \cdot (R_{x,i})^2} = \frac{8908,92}{(2,6796 \cdot 10^{11}) \cdot (5,11 \cdot 10^{-3})^2} = 1,2732 \cdot 10^{-3}$$

$$U_o = \frac{\eta_o \cdot \tilde{u}}{E'_{\text{çelik-seramik}} \cdot R_{x,o}} = \frac{0,04 \cdot 6,252}{(2,6796 \cdot 10^{11}) \cdot (7,59 \cdot 10^{-3})} = 1,2296 \cdot 10^{-10}$$

$$G_o = \xi \cdot E'_{\text{çelik-seramik}} = (2,3 \cdot 10^{-8}) \cdot (2,6796 \cdot 10^{11}) = 6163$$

$$W_o = \frac{(w_z)_{max}}{E'_{\text{çelik-seramik}} \cdot (R_{x,o})^2} = \frac{8908,92}{(2,6796 \cdot 10^{11}) \cdot (7,59 \cdot 10^{-3})^2} = 5,7713 \cdot 10^{-4}$$

Bilya ve iç bileziğin boyutsuz minimum EHD film kalınlığı

$$\frac{(\tilde{h}_{min})_i}{R_{x,i}} = 3,63 \cdot U_i^{0,68} \cdot G_i^{0,49} \cdot W_i^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k_i}) = 1,0122 \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

$R_{x,i} = 5,110 \text{ mm}$ olduğundan $(\tilde{h}_{min})_i = 0,5172 \mu\text{m}$ bulunur.

Kompozit yüzey pürüzlülüğü $R_q = (R_{q,a}^2 + R_{q,b}^2)^{1/2} = 0,1858 \mu\text{m}$ olduğundan bu halde iç temastaki boyutsuz film parametresi

$$\Lambda_i = \frac{(\tilde{h}_{min})_i}{R_q} = \frac{0,5172}{0,1858} = 2,78$$

Bilya ve dış bileziğin boyutsuz minimum EHD film kalınlığı ise

$$\frac{(\tilde{h}_{min})_o}{R_{x,o}} = 3,63 \cdot U_o^{0,68} \cdot G_o^{0,49} \cdot W_o^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k_o}) = 8,144 \cdot 10^{-5} \quad (4)$$

$R_{x,o} = 7,590 \text{ mm}$ olduğundan $(\tilde{h}_{min})_o = 0,6181 \mu\text{m}$ bulunur.

Bu halde dış temastaki boyutsuz film parametresi

$$\Lambda_o = \frac{(\tilde{h}_{min})_o}{R_q} = \frac{0,6181}{0,1858} = 3,33$$

olacaktır. Görüldüğü gibi minimum film kalınlıklarının en küçüğü iç bilezik ile en ağır yüklenmiş bilya 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.

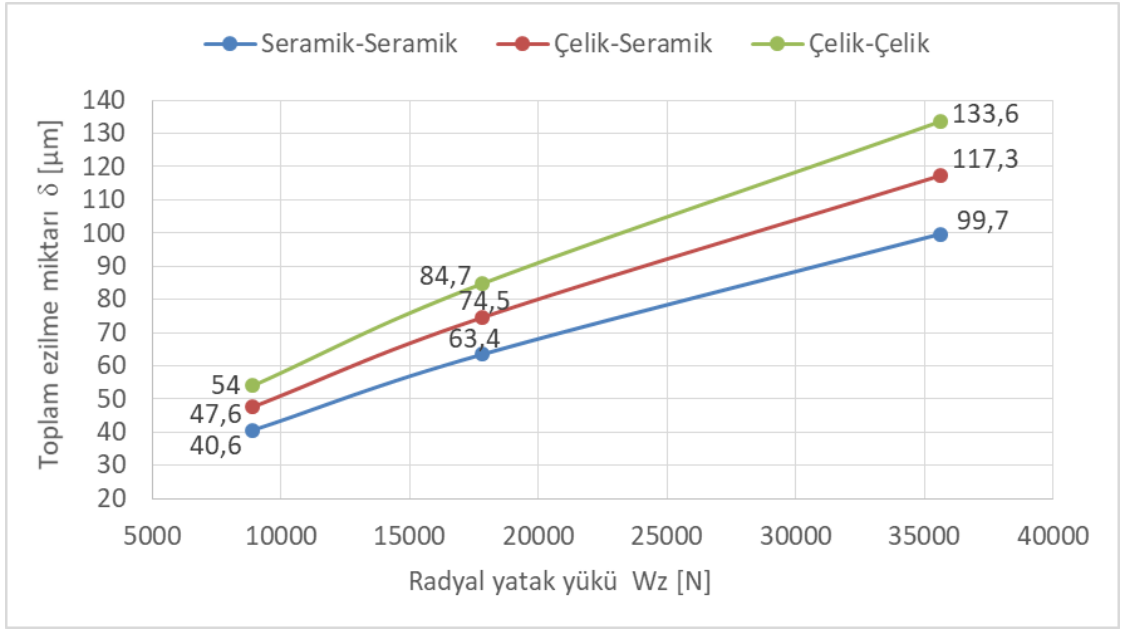
3. SONUÇLAR

Üç farklı radyal yük ve üç farklı malzeme kombinasyonu için yuvarlanma yüzeylerinde hesaplanan maksimum lokal elastik ezilme miktarlarının toplam değerleri Tablo 2' de gösterilmiştir (Tosun, 2002).

Tablo 2. Maksimum lokal elastik toplam ezilme miktarları

	Bilezik Malzemesi	Bilya Malzemesi	w_z		
			8.900 N	17.800 N	35.600 N
Ezilme Miktarı			$\delta_{w1} [\mu\text{m}]$	$\delta_{w2} [\mu\text{m}]$	$\delta_{w3} [\mu\text{m}]$
$\delta_{\text{çç}} [\mu\text{m}]$	Çelik	Çelik	54,022	84,749	133,60
$\delta_{\text{çs}} [\mu\text{m}]$	Çelik	Seramik	47,561	74,463	117,25
$\delta_{\text{ss}} [\mu\text{m}]$	Seramik	Seramik	40,616	63,396	99,661

Şekil 2' de üç farklı radyal yatak yüküne (8.900, 17.800 ve 35.600 N) maruz kalan çelik bilezik-çelik bilya, çelik bilezik-seramik bilya ve seramik bilezik-seramik bilya çiftlerinin yuvarlanma yüzeylerindeki toplam ezilme miktarlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2:

Toplam ezilme miktarlarının bilezik-bilya malzemesi kombinasyonu ve radyal yüke göre değişimi

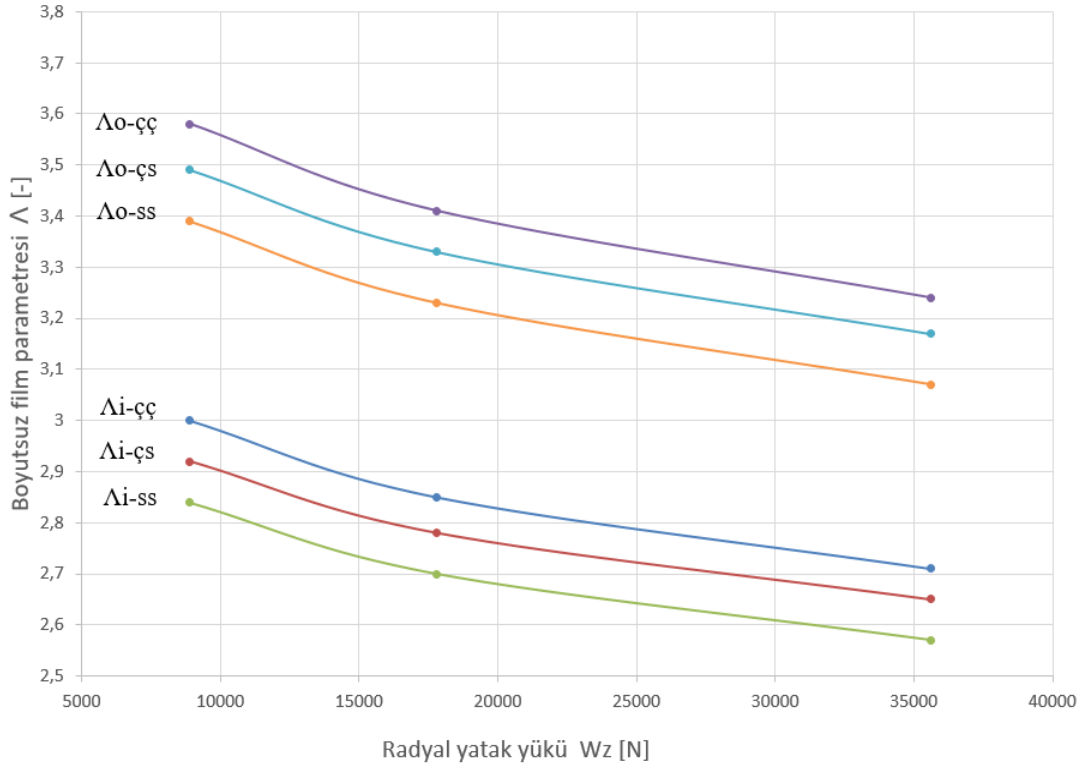
İncelenen yük sahasında herhangi bir malzeme kombinasyonu için radyal yük iki kat artırıldığında toplam ezilme miktarları %55-60 aralığında yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. Aynı yük için malzeme çiftlerini karşılaştırdığımızda, yükün değerinden bağımsız olarak, tamamen seramik olan yataktaki toplam ezilme miktarının hibrid yatağına göre yaklaşık %15, tamamen çelik olanına göre %25 daha az olduğu bulunmuştur. Hibrid yataktaki ezilme miktarı ise tamamen çelik olanına göre yaklaşık %12 daha az gerçekleşmiştir.

Üç farklı radyal yük ve üç farklı malzeme kombinasyonu için iç ve dış bilezik yuvarlanma yüzeylerinde hesaplanan boyutsuz film parametreleri Tablo 3' de gösterilmiştir (Tosun, 2002).

Tablo 3. İç ve dış bilezik yuvarlanma yüzeylerindeki boyutsuz film parametreleri

	Bilezik Malzemesi	Bilya Malzemesi	w_z Radyal Yatak Yüğü		
			8.900 N	17.800 N	35.600 N
$(\Lambda_i / \Lambda_o)_{\text{çç}}$	Çelik	Çelik	3,00 / 3,58	2,85 / 3,41	2,71 / 3,24
$(\Lambda_i / \Lambda_o)_{\text{çs}}$	Çelik	Seramik	2,92 / 3,49	2,78 / 3,33	2,65 / 3,17
$(\Lambda_i / \Lambda_o)_{\text{ss}}$	Seramik	Seramik	2,84 / 3,39	2,70 / 3,23	2,57 / 3,07

Şekil 3' te üç farklı radyal yüke maruz kalan çelik bilezik-çelik bilya (çç indisli), çelik bilezik-seramik bilya (çs indisli) ve seramik bilezik-seramik bilya (ss indisli) çiftlerinin iç ve dış bilezik yuvarlanma yüzeylerindeki boyutsuz film parametrelerinin (Λ_i ve Λ_o) değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3:
İç ve dış bilezik yuvarlanma yüzeylerindeki boyutsuz film parametrelerinin malzeme kombinasyonu ve radyal yüke göre değişimi

Herhangi bir malzeme kombinasyonu için w_z radyal yatak yükü iki kat artırıldığında Λ boyutsuz film parametresi yaklaşık % 4,8 azalmaktadır. Sabit bir radyal kuvvet için maksimum Λ değeri çelik-çelik çiftinde, minimum Λ değeri ise seramik-seramik çiftinde oluşmaktadır. Sabit bir radyal kuvvet ve belirli bir malzeme kombinasyonunda iç yuvarlanma yüzeyindeki boyutsuz film parametresi her zaman dış yuvarlanma yüzeyindekinden küçük olmaktadır. Malzeme kombinasyonundan bağımsız olarak Λ_i değeri Λ_o değerinden yaklaşık % 16,3 küçük bulunmuştur. Böylece tüm sistem için maksimum Λ değeri (3,58) minimum kuvvete maruz çelik-çelik çiftinde, minimum Λ değeri (2,57) ise maksimum kuvvete maruz seramik-seramik çiftinde oluşmaktadır. Λ değerleri kompozit yüzey pürüzlülüğü ile çarpıldığında h_{min} değerlerini verdiğinden yukarıda belirtilen sonuçlar minimum film kalınlıkları için geçerlidir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Elastohidrokinamik 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 radyal bilyalı rulmanların yuvarlanma yüzeylerindeki toplam ezilme miktarları ve boyutsuz film parametreleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

Öncelikle bilya ve bilezikler arası iç ve dış temas geometrilerinin temel özellikleri hesaplanarak yuvarlanma yüzeylerindeki maksimum lokal elastik ezilme miktarlarının toplamı bulunmuştur. İterasyonlar sonucunda en çok zorlanan bilyaya gelen radyal yük değeri kesinleştirilip salt yuvarlanma halinde iç ve dış temaslardaki boyutsuz 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.

İncelenen yük sahasında herhangi bir malzeme kombinasyonu için radyal yük iki kat arttırıldığında toplam ezilme miktarları yaklaşık %58 artmıştır. Aynı yük için malzeme kombinasyonlarını karşılaştırdığımızda, yükün değerinden bağımsız olarak, tamamen seramik olan yataktaki toplam ezilme miktarının hibrid yatağına göre yaklaşık %15, tamamen çelik olanına göre %25 daha az olduğu bulunmuştur.

Herhangi bir malzeme kombinasyonu için radyal yük iki kat arttırıldığında boyutsuz film parametresi yaklaşık % 5 azalmaktadır. Malzeme kombinasyonundan bağımsız olarak, iç temas yüzeyindeki boyutsuz film parametresi dış temas yüzeyindekinden yaklaşık % 16 küçük bulunmuştur. Dolayısıyla rulmanlı yatakta EHD yağlama açısından iç temas yüzeylerinin kontrolü yeterlidir. Seçilen işletme koşullarında iç bilezik yuvarlanma yüzeylerinde hesaplanan minimum EHD film kalınlıkları kompozit yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık üç katı olduğundan yatak yağlamaları tatmin edici olarak kabul edilmiştir.

Seramik rulmanlar alanında son kırk yılda gerçekleştirilen sürekli araştırma ve geliştirme sonucunda kazanılan tecrübeler, seramik rulmanların gelecekteki zorlu şartlardaki uygulamaları için mühendislere sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bundan sonraki çalışmalarda üretim maliyetlerinin elde edilebilecek performans yararını haklı çıkaracak bir düzeye indirilmesi, malzeme iyileştirmeleri, verimli üretim, hibrid yataklarda bilya ve bileziklerin optimize edilmiş yüzey işlemleri / kaplamalar, yağlama ve titreşim gibi bazı özel problemler üzerinde araştırmacıların yoğunlaşması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. 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 hybrid bearings, *Wear*, 406–407, 1–12.
2. Hamrock, B.J. (1994) *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill, New York.
3. Hamrock, B.J. and Dowson, D. (1981) *Ball Bearing Lubrication – The Elastohydrodynamics of Elliptical Contacts*, Wiley-Interscience, New York.
4. Hamrock, B.J., Schmid, S.R., Jacobson, B.O. (2006) *Fundamentals of Machine Elements*, McGraw-Hill, International Edition, Singapore.
5. Harrer, W.; Deluca, M.; Morrell, R. (2014) Failure analysis of a ceramic ball race bearing made of Y-TZP zirconia, *Engineering Failure Analysis*, 36, 262–268.
6. <https://www.ortechceramics.com/product-category/ceramic-bearings/>(Erişim Tarihi: 30.08.2018)
7. Jablonka, K.; Glovnea, R.; Bongaerts, J. (2018) Quantitative measurements of film thickness in a radially loaded deep-groove ball bearing, *Tribology International*, 119, 239–249.
8. Murzin, S.P.; Balyakin, V.B.; Melnikov, A.A.; Vasiliev, N.N.; Lichtner, P.I. (2015) Determining ways of improving the tribological properties of the silicon carbide ceramic using a pulse-periodic laser treatment, *Computer Optics*, 39 (1), 64–69.
9. Nazir, M. H.; Khan, Z. A.; Saeed, A. (2018) Experimental analysis and modelling of c-crack propagation in silicon nitride ball bearing element under rolling contact fatigue, *Tribology International*, 126, 386–401.

10. Rende, H. ve Hanyaloğlu, C. (2012) Rulmanlarda ve Kaymalı Yataklarda Seramiklerin Kullanımı, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt 53, sayı 633, 28-35.
11. Tevrüz, T. (2015) *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*, Cilt 2, Çağlayan Kitabevi, 1.ci baskı, İstanbul.
12. Tosun, C. (2002) Rulmanlı Yatakların Tribolojik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
13. Xia, H.; Qiao, G.; Zhou, S.; Wang, J. (2013) Reciprocating friction and wear behavior of reaction-formed SiC ceramic against bearing steel ball, *Wear*, 303 (1-2), 276–285.
14. Wang, L.; Snidle, R.W.; Gu, L. (2000) Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research, *Wear*, 246, 159–173.
15. Zaretsky, E.V. (1989) Ceramic bearings for use in gas turbine engines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Trans. ASME 111 (1) 146–157.

