


Yuvarlanmalı Yataklarda Kirliliğin Yatak Ömrüne Olan Etkilerinin İncelenmesi

Erol Feyzullahoğlu 

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli / Türkiye

Geliş / Received: 08/04/2020, Kabul / Accepted: 24/03/2021

Öz

Yüzeyler arasındaki hareketi temin eden elemanların yuvarlanması halinde olan yataklar yuvarlanmalı yataklar (rulmanlar) olarak tanımlanmaktadır. Rulmanlar, birtakım nedenlerden dolayı çoğunlukla beklenen ömür değerlerinden daha önce hasar görürler. Rulmanlardaki hasarların yaklaşık olarak %15'inin kirlilik nedeni ile olduğu ifade edilmektedir. Rulmanların hareketli yüzeylerinin arasına çalıştıkları ortamlarda giren kum, metal talaşı, metal parçacıklar, metal karbürler vb. yabancı partiküller, rulmanlarda aşınma oluştuğundan dolayı hareketli yüzeylerin yorulmasına, kafesler arasında sıkışmalara ve hareketli parçaların yüzeylerinde derin yivlerin oluşmasına da neden olmaktadır. Ayrıca bu yabancı maddeler (sert partiküller) yuvarlanma elemanları, bilezikler ve kafeslerin yüzeyinde çevresel olarak oluklanma ve noktasal olarak yüzey karıncalanması da oluşturmaktadır. Rulmanda oluşan hasarın seviyesi yabancı partiküllerin sertliğine, büyüklüğüne ve miktarına bağlıdır. Bu çalışmada, kirlilik neticesinde yuvarlanmalı yataklarda oluşan hasarlar incelenerek kirliliğin yuvarlanmalı yatakların ömrünü nasıl etkilediği belirlenmiş ve bu durumlar için yuvarlanmalı yataklarda geliştirilmiş ömür hesabı sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yuvarlanmalı yataklar, kirlilik, ömür, hasar

Investigation of Effects of Contamination on Bearing Life in Rolling Bearings

Abstract

Bearings in which the elements providing the movement between the surfaces are rolled are defined as rolling bearings. Rolling bearings are often damaged earlier than expected life values due to a number of reasons. It is stated that approximately 15% of the failures in the rolling bearings are due to contamination. Sand, metal particles, metal carbides, etc. that enter between the moving surfaces of the rolling bearings in their working environment cause fatigue of moving surfaces, jams between the cages and deep grooves on the surfaces of the moving parts and abrasion on the bearing surfaces. In addition, these impurities (hard particles) form the circumferential grooves and spot surface tingling on the surface of the rolling elements, raceways and cages. The level of failure on the rolling bearing depends on the hardness, size and amount of foreign particles. In this study, the failures that occur in rolling bearings as a result of contamination have been investigated and determined how the contamination affects the life of rolling bearings and a modified life calculation has been presented for rolling bearings.

Keywords: Rolling bearings, contamination, life, failure

1. Giriş

Dönen, salınım hareketi yapan veya hareketsiz duran aks ve mil muylularını taşıyan makine elemanları yatak olarak tanımlanmaktadır. Yüzeyler arasındaki hareketi temin eden elemanların yuvarlanması halinde olan yataklar yuvarlanmalı yataklar (rulmanlar) olarak ifade edilmektedir. Rulmanlarda, sürtünme değerlerinin az ve enerji kaybının düşük olması, yağlamalarının basit ve yağ sarfiyatlarının az olması, standart olduklarından temin edilmelerinin kolaylığı ve hareket esnasında sürtünme değerlerinin sabit olması gibi avantajlar öne çıkmaktadır. Rulmanlarda yağlama ile sürtünme değerlerinin azaltılması hedeflenmektedir. Rulmanların yağlanmasında mineral sıvı yağlar ve gres kullanılmaktadır. Özellikle redüktörler gibi kapalı alanlarda çalışan rulmanların yağlanmasında sıvı yağlama tercih edilmektedir. Redüktörlerde sıvı yağlama ile hem dişli çarklar ve hem de yuvarlanmalı yatakların yağlanması sağlanabilmektedir.

Rulmanlar aslında uzun ömürlü ve dayanıklı olarak imal edilirler. Rulmanlar, birtakım nedenlerden dolayı çoğunlukla beklenen ömür değerlerinden daha önce hasar görürler. Rulmanların beklenilenden daha önce hasar görmelerinin nedenleri, hatalı montaj, hatalı kullanım, mil ve yatak yüzeylerinde uygun olmayan boyut ve geometrik toleranslar, depolama ve taşıma esnasında yapılan hatalar, sızdırmazlık problemleri, titreşimli çalışma, rulmanın elektrik kaçağı sonucu elektrik akımına maruz kalması, yetersiz yağlama, yabancı madde girişi ve anormal ısı oluşumu olarak tanımlanabilir (NSK, 2020). Rulmanların hasar görmesi nedeniyle üzerine takılı olduğu motor, redüktör vb. donanımlar olumsuz olarak etkilenmektedir. Rulmanda

meydana gelebilecek bir arıza, motor, redüktör vb donanımların verimini düşürerek beklenmedik bir şekilde servis dışı kalmalarına neden olacaktır.

Sadeghi ve diğ. rulmanlarda yuvarlanma yüzeylerinde oluşan hasarı kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Rulmanın düzgün şekilde yüklenmesi, iyi bir şekilde yağlanması, montajı ve yabancı kirleticilerden arındırılması durumunda, ana arıza modunun malzemede oluşan yorulma olduğu ifade edilmiştir (Sadeghi ve diğ., 2009).

Bu çalışmada, kirlilik neticesinde yuvarlanmalı yataklarda oluşan hasarlar incelenerek kirliliğin yuvarlanmalı yatakların ömrüne nasıl etkidiğinin belirlenmesi ve kirliliğin dikkate alındığı durumlarda yuvarlanmalı yataklarda ömür hesabının yapılması amaçlanmıştır.

2. Kirliliğin rulmanlarda oluşturduğu hasarlar

Yağlayıcıdaki kirliliğinin rulman ömrünü, güvenilirliğini ve performansını etkilediği uzun zamandır bilinmektedir. Yağlayıcıda iyi bir filtreleme yapılarak kirliliğin azaltılması dolayısı ile rulman ömrünün de artırılması sağlanabilmektedir (Needelman ve Zaretsky, 2015). Gres ile yağlanan hibrid (seramik bilyeli) rulmanlarda partikül halindeki kirliliğin rulmanın ömrüne etkisi Kahlman ve Hutchings tarafından incelenmiştir. Seramik bilyeler üzerinde aşınmanın oluşmadığı, kafeste standart rulmanlara göre daha az aşınmanın olduğu ve çelik bileziklerde ise diğer rulmanlara benzer aşınmanın oluştuğunu belirlemişlerdir (Kahlman ve Hutchings, 1999).

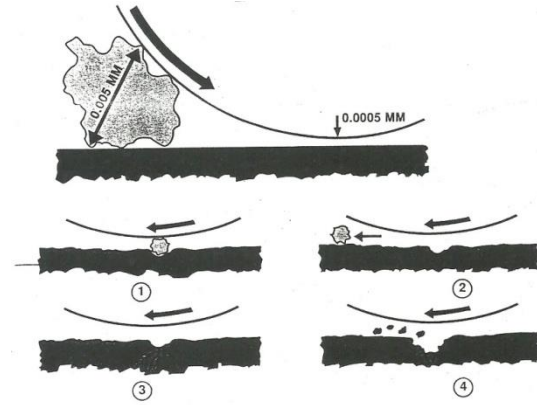
Rulmanlardaki hasarların yaklaşık olarak %15'inin kirlilik nedeni ile olduğu ifade

edilmektedir. Rulman içine yabancı partiküllerin girmesi, yetersiz temizlik, kötü yağ filtrelemesi ve sızdırmazlık elemanlarında deformasyon oluşması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bunun sonucunda rulman içinde düzenli bir yağlayıcı film teşkil edilememektedir. Bu durum rulmanın hareketli yüzeylerinde aşınma neticesinde hasar oluşmasına neden olmaktadır. Yuvarlanmalı yatağın temas yüzeylerinde aşınmanın oluşmaya başlaması; gürültüye, salgılı bir dönme, temas yüzeylerinin aşırı ısınmasına ve rulmanın kilitlemesine neden olmaktadır. Rulmanların içine çalıştıkları ortamlarda kum, metal talaşı, metal parçacıklar ve metal karbürler gibi yabancı partiküller girebilmektedir. Kirlilik oluşturan bu partiküller rulmanlarda aşınma oluşturmasının dışında hareketli yüzeylerin yorulmasına, kafesler arasında sıkışmalara ve hareketli parçaların yüzeylerinde derin yivlerin oluşmasına da neden olmaktadır (Gabelli ve diğ., 2010). Partikül tipleri, rulmanın hareketli yüzeylerinde farklı tipte hasarlar oluşturmaktadır. Yumuşak veya sünek parçacıklar (fiber veya metal) bilezik yüzeylerinde sığ girintiler oluşturmaktadır. Kırılgan, sert parçacıklar ise çok küçük parçacıklara bölünür ve yüzeyde küçük girintiler kümesi oluştururlar. Gevrek ufalabilir parçacıklar ise büyük bir yığın oluşturarak rulman yüzeylerinde keskin hasarlar oluştururlar (Morales ve Gabelli, 2012).

Toz, çamur vb dış şartlardan kaynaklanan kirlilik, rulmanların ömrüne olumsuz olarak etki etmektedir. Budurumda rulmanlar üzerinde kullanılan sızdırmazlık elemanları ve yağlama sistemlerindeki filtreler önem kazanmaktadır. Yuvarlanmalı yataklarda kirliliğin minimum seviyeye indirilebilmesi için dikkat edilmesi gereken birtakım hususlar şu şekilde sıralanabilir:

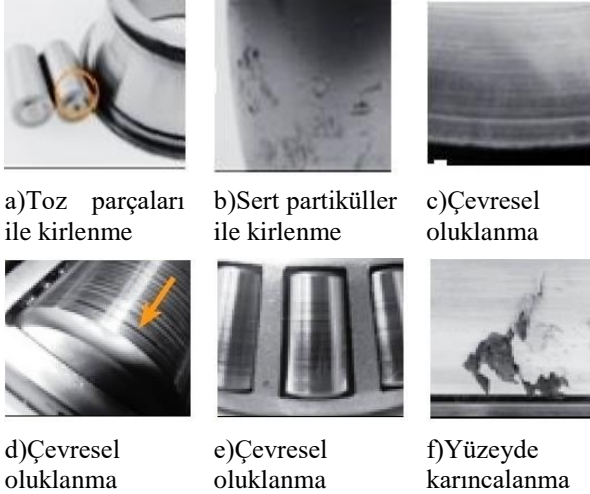
- Rulmanda kullanılacak olan yağlayıcı temizliğinin artırılması,
- Yağ değiştirme aralığının sıklaştırılması,
- Yağlayıcı filtrelerin verimliliğinin artırılması,
- Sızdırmazlık elemanlarının uygun seçimi ve veriminin artırılması,
- Rulmanın, kirlilik oluşturan dış ortamlardan mümkün olduğunca izole edilmesi.

Şekil 1'de yuvarlanmalı yatağın hareketli yüzeyleri arasında giren bir partikülün bilezik ve yuvarlanma elemanlarının yüzeylerinde oluşturduğu hasarın evreleri görülmektedir.



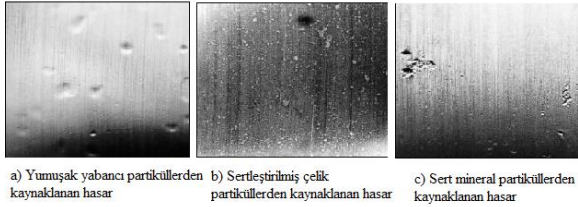
Şekil 1. Yabancı partiküllerin rulman yüzeyinde hasar oluşturma evreleri (SKF)

Şekil 2'de rulmanlarda kirlilik nedeni ile oluşan hasarların görselleri sunulmuştur. Şekilden de görüleceği gibi rulmanlar içine giren yabancı maddeler (sert partiküller) yuvarlanma elemanları, bilezikler ve kafeslerin yüzeyinde çevresel olarak oluklanma ve noktasal olarak da yüzey karıncalanması oluşturmaktadırlar.

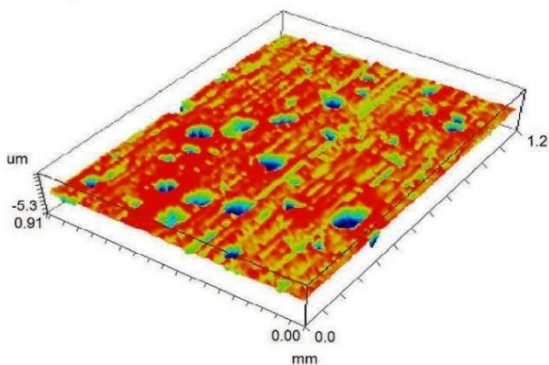


Şekil 2. Kirlilikten kaynaklanan rulman hasarları (Timken)

Kirliliği oluşturan yabancı partiküller yumuşak veya sert bir yapıda olabilirler. Şekil 3'te yumuşak, sertleştirilmiş çelik ve sert mineral yapıdaki yabancı partiküllerin rulmanların hareketli yüzeylerinde oluşturduğu hasarların örnekleri görülmektedir. Yabancı partiküller rulmanın bilezik yüzeylerinde abrazyon oluşturur.



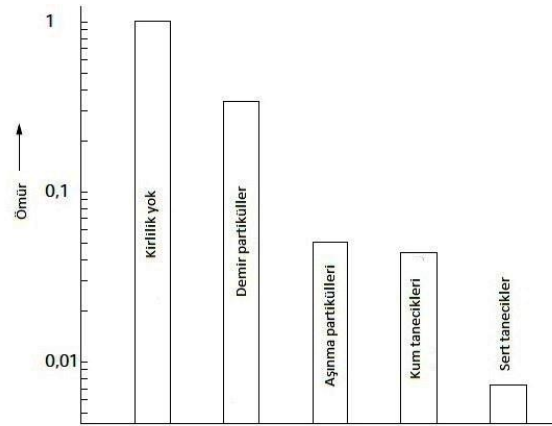
Şekil 3. Yumuşak veya sert partiküllerden kaynaklanan rulman hasarları (FAG)



Şekil 4. Kirlilik nedeniyle rulmanların bileziğinde oluşan çukurcukların 3B grafiği (Gabelli ve diğ., 2010)

Yuvarlanmalı yatağın temas yüzeylerinde çeşitli tiplerde oluşan çukurcuklardan kaynaklanan yüzeysel gerilmeleri ortaya çıkmaktadır (Gabelli ve diğ., 2010). Kirliliğin yuvarlanmalı yataklarda bilezik yüzeylerinde oluşturduğu hasarın 3 boyutlu görüntüsü Şekil 4'te sunulmuştur.

Rulmanların içine yabancı partiküllerin girmesi durumunda ömürlerinde azalma ortaya çıkmaktadır. Şekil 5'te çeşitli tipteki partiküllerin rulmanların ömrüne hangi mertebelerde olumsuz olarak etkilediği görülmektedir. Rulmanda oluşan hasarın seviyesi yabancı partiküllerin sertliğine, büyüklüğüne ve miktarına bağlıdır. Yorulma dikkate alındığında bilyeli rulmanlar, kirliliğe makaralı rulmanlardan daha hassas tepki verirler. Aynı zamanda küçük boyutlu rulmanlar büyük olanlara göre daha hassastırlar (FAG).



Şekil 5. Yumuşak veya sert partiküllerden kaynaklanan rulman hasarları (FAG)

Madencilik endüstrisinde çalışan rulmanlarda hareketli yüzeyler arasına giren Fe_3O_4 partiküllerinin rulman ömrünü olumsuz olarak nasıl etkilediği Schnabel ve diğ., tarafından yapılan bir çalışmada incelenmiştir. Bu partiküller rulmanda büyük seviyelerde titreşimlerin ve aşınmaların oluşmasına neden olmuştur (Schnabel ve diğ., 2013).

Sıvı yağlayıcı veya gres içinde süspansiyon halinde bulunan katı partiküller tarafından rulmanın hareketli yüzeylerinden koparılan aşınma parçacıklarının, rulman hasarlarının kaynağı olduğu Nelias ve Ville tarafından ifade edilmiştir (2000). Maru ve diğ. (2007) bilyeli rulmanlarda yağlayıcı içindeki katı partiküllerin aşınma ve titreşim oluşturmadaki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde farklı konsantrasyonlara ve boyutlara sahip quartz partiküller kullanılmıştır. Yağlayıcıdaki kirliliğin rulmandaki titreşim seviyesini yükselttiği (10000Hz) ve şiddetli aşınmaların oluştuğu belirlenmiştir.

3. Yuvarlanmalı yataklarda temel ömür hesabı

Bir rulmanın ömrü o yatağın doğru ve iyi bir bakımla görevini yapabilecek durumda kaldığı çalışma süresi olarak tanımlanabilir. Yuvarlanmalı yatağı oluşturan parçalardan birisi yorulma neticesi kullanılamaz duruma gelir veya yatak aşınma neticesi artık görevini yerine getiremezse o yatağın kullanma süresi sona ermiş ve ömrünü tamamlanmış demektir.

Yuvarlanmalı yatakların ömrü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Cürgül, 2020):

$$L = \left(\frac{C}{F} \right)^\varepsilon \quad (1)$$

Burada L (milyon devir) yatağın ömrünü, C (N) dinamik yük sayısını, F (N) dinamik eşdeğer yükü ve ε temas durumunu tanımlayan bir sayıdır. Burada nokta temaslı yataklarda (bilyeli yataklar) $\varepsilon = 3$, çizgi temaslı yataklarda (makaralı yataklar) $\varepsilon = 10/3$ değerinde alınmaktadır.

Dinamik yük sayısı C (N), aynı yataklardan büyük sayıda bir grubun %90'ının

yuvarlanma yüzeylerinin yorulması sebebiyle tahrip olmadan bir milyon devire ulaştığı yük olarak tanımlanmaktadır. Bu sayı her yatak türü için yatak cetvellerinde verilmiştir.

Yorulma bakımından bileşke yük gibi tesir eden dinamik eşdeğer yük F (N) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$F = X.F_r + Y.F_a \quad (2)$$

Burada F_r (N) yatağa etkien radyal yük, F_a (N) yatağa etkien eksenel yük, X - radyal faktör ve Y - eksenel faktördür. Her yatak tipi ve büyüklüğü için X ve Y faktörleri farklı değerlerdir ve genel olarak F_a/F_r oranına bağlı olarak yatak cetvellerinde verilmiştir.

Yatak ömrü (saat) cinsinden hesaplanmak isteniyorsa aşağıdaki bağıntı kullanılır:

$$L_h = \frac{10^6.L}{60.n} \quad (3)$$

Burada L_h (saat) yatak ömrünü, L (milyon devir) yatak ömrünü, n (d/d) yatak dönme sayısını ifade etmektedir.

Yuvarlanmalı yataklarda temel ömür hesabı 1940'lı yıllarda geliştirilmiştir. Rulmanların karşılaştığı bütün çalışma koşulları ile uyuşmamaktadır.

4. Yuvarlanmalı yataklarda geliştirilmiş ömür hesabı

Ioannides ve Harris (1985) ve Ioannides ve diğ. (1999) yuvarlanmalı yatakların hesabında kullanmak üzere yeni bir ömür hesap yöntemi geliştirmiştir. Bu modelde farklı yük, malzeme ve çalışma koşullarını dikkate almışlardır. Ömür hesabında kirliliğin etkisini ise hiç dikkate almamışlardır.

Gabelli ve diğ. (2010) çalışmalarında yuvarlanmalı yatakların ömrüne kirliliğinin ve yağlamanın etkisini incelemişlerdir. Onlar, yuvarlanmalı yatakların ömrüne etkisi olan kirlilik nedeni ile oluşan bölgesel gerilmelerin dikkate alındığı bir hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Deneysel olarak elde edilen veriler ile matematiksel model kullanılarak elde edilen verileri karşılaştırmışlardır.

Takemura ve diğ. (2000), bilyeli ve makaralı rulmanlarda kullanılmak üzere yeni bir ömür hesap yöntemi geliştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda yatak yükü, yağlayıcı kirliliği ve yağlayıcı viskozitesinin ömür hesabı üzerine olan etkileri yeni bir hesap modeli üzerinde kurgulanmıştır. Yatak içine giren yabancı partiküllerin sertliklerini dikkate almışlardır. Gerçek çalışma koşulları ile daha uyumlu sonuçların elde edildiği bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

Gabelli ve diğ. (2015), helisel dişli çark mekanizmalarının tasarımlarında ve güvenilirlik optimizasyonlarında kullanılmak üzere yuvarlanmalı yataklar için geliştirilmiş ömür hesabı üzerinde çalışmışlardır. Geliştirilmiş ömür hesabının sahip olduğu sakıncalar ve güvenirliliği azaltan sınırlayıcı parametrelerin neler olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Geliştirilmiş ömür hesabının kullanılması ile dişli çark mekanizmalarının ömürlerinin arttığı belirlenmiştir.

Rulmanlarda temas yüzeyleri arasında yüksek yüklerin taşınması ile var olan çatlaklar büyüyerek hasar oluşmaktadır. Ghalme ve diğ. (2013), çalışmalarında yuvarlanmalı yataklardaki yorulma ömrünün tahmini için farklı modelleri sunmuştur. Bu modellerde malzemenin mikroyapısının dikkate alınmadığını tesbit etmişlerdir. Malzemenin mikroyapısının yorulma

ömrünün tahmininde kullanılan modellerde önemli derecede etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Zaretsky (2013), yuvarlanmalı yatakların ömrünün hesabında kullanılan matematiksel modelleri bir derleme çalışmasında sunmuştur. Weibull yorulma ömrü modeli, Lundberg-Palmgren modeli, Ioannides-Harris modeli ve Zaretsky modeli tanımlanarak kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Malzemelerin, işleme parametrelerinin ve çalışma koşullarının rulmanların ömür hesabında etkili olduğu belirlenmiştir.

Morales ve Gabelli (2020), yuvarlanmalı yatakların performansının tahmininde kullanılan derecelendirme parametrelerini incelemiştir. Bu parametreleri yatağın yorulma ömrünün hesabında dikkate almışlardır. Bu parametreler ömür hesabında yağlama koşulları, sızdırmazlık etkileri, katı ve sıvı kirlilikler, değişken yükleme, statik yükleme ve hız koşulları olarak hesaba katılmıştır.

Şekercioğlu (2020), rulman ömürlerinde güvenirliliği ve etkileyen faktörleri incelemiştir. Yapılan çalışmada standartlar da dikkate alınarak yağın kirlilik seviyesi, çalışma sıcaklığı, yağlayıcı viskozitesi gibi faktörlerin rulmanların güvenirliliği ve ömrü üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır.

Uzun yıllar boyunca rulmanlarda ömür hesabı yukarıda ifade edilen temel ömür hesabı yöntemi kullanılarak yapılmıştı. Temel ömür hesabı, hassas üretim yöntemleri ve yüksek malzeme kalitesi ile geleneksel çalışma koşullarında %90 güvenilirlik ile kullanılmıştır. Fakat günümüzde birçok uygulamada farklı güvenilirlik seviyelerinde ve/veya özel yağlama ve kirlilik koşullarında daha hassas ömür hesabının yapılması istenmektedir. Temel ömür hesabında

malzeme özellikleri, yağlama şartları ve işletme koşullarının dikkate alınmaması nedeniyle ömür hesabı pratikte doğru sonuçlar vermemiştir. Bu nedenlerden dolayı rulman üretici firmalarının da katkılarıyla rulmanlarda geliştirilmiş ömür hesaplarının yapılacağı yeni bir standart (ISO 281) oluşturulmuştur. Bu yeni hesaplama yönteminde yağlayıcı içindeki katkı maddeleri, yağlayıcının kirliliği, rulmanın tipi, rulmanın yorulması, yağlayıcının temizliği, yatakta taşınan yükün büyüklüğü vb birtakım etkenler dikkate alınmıştır.

Uluslararası standartlarda rulman ömrünün sistematik hesaplanması için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu hesaplama yönteminde, birbirine bağımlı faktörlerin çeşitliliği ve etkileşiminin, rulmanların ömrü üzerindeki etkisinin, tüm etkilerin yuvarlanma elemanlarının temas noktalarında ve temas bölgelerinde ortaya çıkardıkları ilave gerilmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

ISO 281'e göre yuvarlanmalı yataklarda geliştirilmiş ömür hesabı şu şekilde yapılabilir (ISO281):

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10} \quad (4)$$

Burada L_{nm} (saat) geliştirilmiş ömrü, a_1 güvenilirlik katsayısı, a_{ISO} ömür geliştirme faktörünü ve L_{10} (saat) temel ömrü (L_h) ifade etmektedir.

4.1. Güvenirlik katsayısı (a_1)

Yuvarlanmalı yataklarda normal şartlarda kabul edilen hasar olma ihtimali %10, güvenilirlik ise %90 olarak ifade edilmektedir. Yorulma nedeniyle yuvarlanmalı yatakların ömür hesabında güvenilirlik veya hasar olma ihtimalini göz önüne almak gerekmektedir. Tablo 1'de farklı güvenilirlik değerleri için

güvenirlik katsayısı (a_1) değerleri sunulmuştur. Tablodan da görülebileceği gibi güvenilirlik değerleri arttıkça güvenilirlik katsayısı (a_1) azalmaktadır.

Tablo 1. Güvenirlik katsayısı (a_1) (ISO281)

Güvenirlik %	L_{nm}	a_1
90	L_{10m}	1
95	L_{5m}	0,64
96	L_{4m}	0,55
97	L_{3m}	0,47
98	L_{2m}	0,37
99	L_{1m}	0,25
99,2	$L_{0,8m}$	0,22
99,4	$L_{0,6m}$	0,19
99,6	$L_{0,4m}$	0,16
99,8	$L_{0,2m}$	0,12
99,9	$L_{0,1m}$	0,093
99,92	$L_{0,08m}$	0,087
99,94	$L_{0,06m}$	0,080
99,95	$L_{0,05m}$	0,077

4.2. Ömür geliştirme faktörü (a_{ISO})

Belirli bir yükün altında, yüksek kaliteli bir rulman, yeterli yağlama koşulları ve temizlik durumu söz konusu ise sonsuz bir ömre ulaşabilir. Yaygın olarak kullanılan yüksek kaliteli malzemeden üretilmiş ve iyi bir üretim kalitesine sahip rulmanlar için, yorulma sınırına yaklaşık 1500 MPa 'lık bir yüzey basıncında ulaşılmaktadır. Bu yüzey

basıncı değeri üretim toleransları ve çalışma koşulları nedeniyle oluşan gerilmeleri de kapsamaktadır. Düşük üretim hassasiyeti ve/veya malzeme kalitesi daha düşük yorulma sınırını ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte, birçok uygulamada, temas gerilmeleri (yüzey basıncı) 1500 MPa' dan daha büyüktür ve buna ek olarak çalışma koşulları ek gerilmelere yol açabilmekte ve böylece yatak ömrünü daha da azaltabilmektedir. Tüm operasyonel etkileri, uygulanan gerilmeler ve malzemenin mukavemeti ile ilişkilendirmek mümkündür.

Rulman ömrü üzerindeki farklı etkiler birbirine bağlıdır. Rulmanlarda geliştirilmiş ömür hesabında bu bağımlı faktörler dikkate alınmaktadır. Ömür geliştirme faktörünün (a_{ISO}) belirlenmesinde rulman çeliğinin yorulma dayanımı sınırı ve yağlayıcının ve kirliliğin rulman ömrüne olan etkisi dikkate alınmaktadır.

Ömür geliştirme faktörü a_{ISO} , deneysel çalışmalar ve pratik deneyimler neticesinde belirlenebilmektedir. ISO 281'e göre ömür geliştirme faktörünün a_{ISO} belirlenmesinde aşağıdaki etkiler dikkate alınmaktadır:

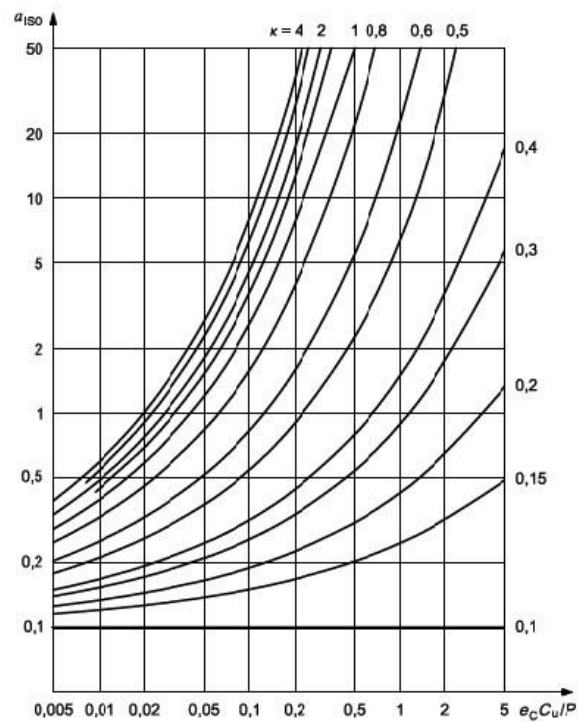
- Yağlama (yağlayıcı türü, viskozitesi, yatak hızı, yatak boyutu, yağlayıcıdaki katkı maddeleri),
- Çevre (kirlilik seviyesi, sızdırmazlık elemanları),
- Kirletici partiküller (yatak boyutu ile ilişkili partikül büyüklüğü ve sertliği, yağlama yöntemi ve filtreleme),
- Montaj (montaj sırasında temizlik).

Ömür geliştirme faktörü a_{ISO} aşağıdaki denklemde sunulmuştur (ISO 281):

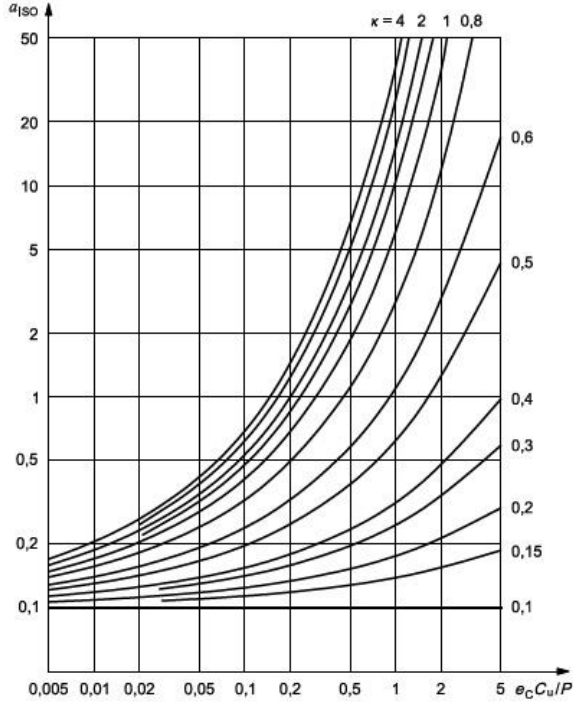
$$a_{ISO} = f \left\{ \frac{e_c C_u}{P}, \kappa \right\} \quad (5)$$

Burada e_c kirlilik faktörü ve κ viskozite oranı olarak yağlama koşullarının ve kirliliğin dikkate alındığı faktörlerdir. $P(N)$ denk. (2) de ifade edilen dinamik eşdeğer yük yani F' tir. C_u (N) yorulma yük sınırı olarak tanımlanmıştır.

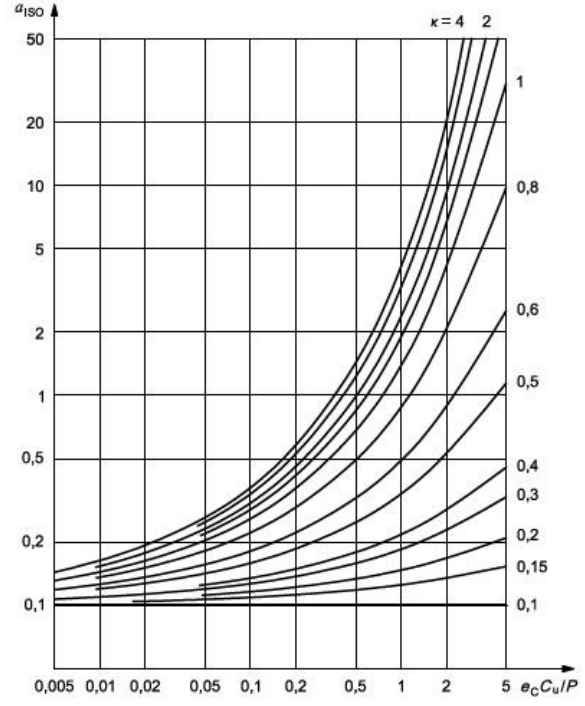
Şekil 6-9'da ömür geliştirme faktörü a_{ISO} , farklı rulman tipleri için $\left\{ \frac{e_c C_u}{P}, \kappa \right\}$ değerlerine bağlı olarak sunulmuştur (ISO 281).



Şekil 6. Radyal bilyeli rulmanlar için ömür geliştirme faktörü (a_{ISO})



Şekil 7. Radyal makaralı rulmanlar için ömür geliştirme faktörü (a_{ISO})



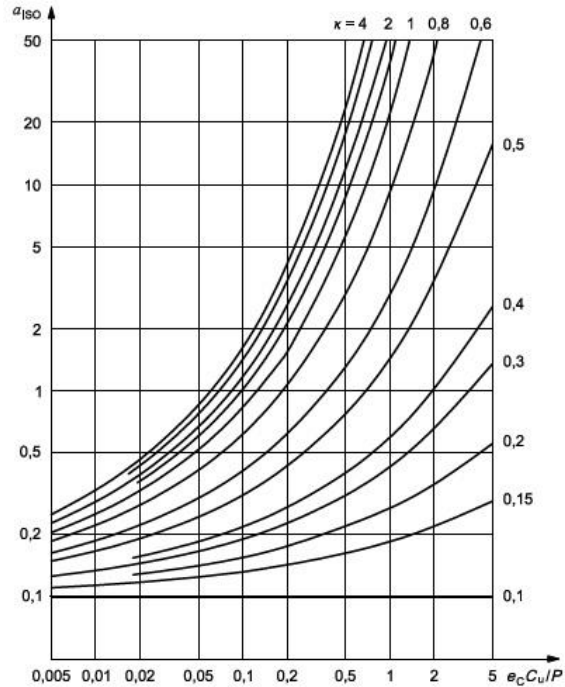
Şekil 9. Eksenel makaralı rulmanlar için ömür geliştirme faktörü (a_{ISO})

4.2.1. Kirlilik faktörü (e_C)

Yuvarlanmalı yatakta yağlayıcının katı partiküller ile kirlendiği bir durumda, bu partiküllerin yuvarlanma elemanları ve bilezikler arasında yuvarlanması neticesinde bileziklerin temas yüzeylerinde kalıcı girinti formları oluşabilmektedir. Bu girintilerde, bölgesel gerilmeler oluşarak rulman ömrü kısalmaktadır (Gabelli ve diğ., 2010). Yağlayıcı filmdeki kirlenmeye bağlı olarak rulmanın ömrünün azalması kirlilik faktörü e_C ile hesaplamalarda dikkate alınır.

Yağlayıcı filmdeki katı partiküllerin neden olduğu rulmanda ömrün azalması şunlara bağlıdır.

- Partiküllerin tipine, boyutuna, sertliğine ve miktarına,
- Yağlayıcı film kalınlığına,
- Yatak boyutuna.



Şekil 8. Eksenel bilyeli rulmanlar için ömür geliştirme faktörü (a_{ISO})

Yağlayıcıda farklı kirlilik seviyelerine göre kirlilik faktörü ec değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. Burada belirtilen değerler, katı partiküllerin oluşturduğu kirlilik için sunulmuştur. Su veya diğer sıvılar nedeniyle oluşan kirlilik ISO standartlarında dikkate alınmamıştır.

Rulmanlarda kirlilik faktörünün daha büyük değerlerden seçilebilmesi için aşağıdaki tedbirler alınabilir:

- Rulman boyutlarının artırılması,
- Yağlayıcı temizliğinin sağlanması,
- Filtre veriminin artırılması,
- Yağ değiştirme periyodunun sıklaştırılması,
- İmalattan gelen kirliliğin düşürülmesi,
- Dış ortamdan gelen kirliliğin düşürülmesi,
- Uygulamada ortaya çıkan aşındırıcı partikül miktarının düşürülmesi.

Tablo 2. Kirlilik faktörü (ec) (ISO 281)

Kirlilik seviyesi	ec	
	$D_{pw} < 100$	$D_{pw} \geq 100$
<i>Aşırı temizlik</i> Laboratuvar şartlarında, yağlayıcı film kalınlığı boyutunda partiküller	1	1
<i>Hafif temizlik</i> Çok iyi filtrelenmiş yağ, gresleme ve sızdırmazlığın sağlandığı koşullar	0,6-0,8	0,8-0,9
<i>Normal temizlik</i> İyi filtrelenmiş yağ, gresleme ve kapakla izolasyonun sağlandığı koşullar	0,5-0,6	0,6-0,8
<i>Hafif kirlilik</i> Yağlayıcıda hafif kirliliğin bulunduğu koşullar	0,3-0,5	0,4-0,6
<i>Normal kirlilik</i> Aşınma partikülleri ve çevreden gelen kirlilik, yağlayıcının kaba filtrelenmesi koşulları	0,1-0,3	0,2-0,4
<i>Aşırı kirlilik</i> Yatağın çevresinden ağır bir seviyede kirlenmesi, yetersiz sızdırmazlık koşulları	0-0,1	0-0,1
<i>Çok şiddetli kirlilik</i>	0	0

Burada D_{pw} (mm) rulmanın ortalama çapı olarak tanımlanmıştır. Rulmanın delik ve dış çapının ortalaması olarak ifade edilmektedir.

4.2.2. Viskozite oranı (κ)

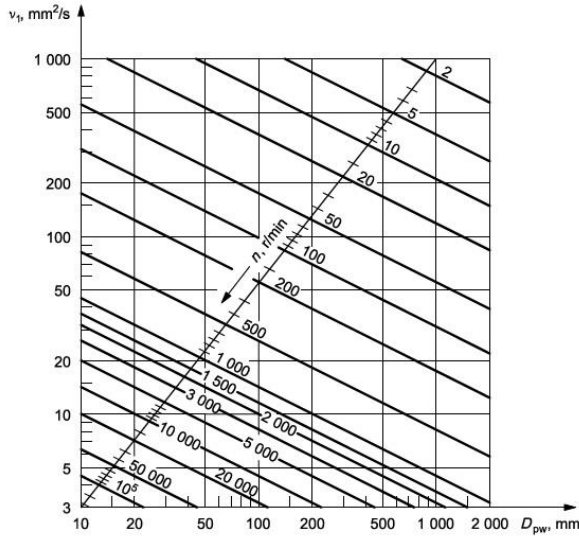
Yuvarlanmalı yatakta kullanılan mineral yağlayıcının etkinliği esas olarak temas eden

yüzeylerin birbirlerinden ayrılması olarak tanımlanabilir. Eğer temas yüzeylerini yeterince ayıran bir yağ film oluşturulursa, çalışma sıcaklığına ulaştığında yağlayıcı bir minimum viskoziteye sahip olmalıdır. Mineral yağlayıcının temas yüzeylerini birbirinden ayırma durumu viskozite oranı ile

tanımlanmaktadır. Viskozite oranı κ , aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (ISO281):

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (6)$$

Burada ν (mm^2/s) yağlayıcının çalışma sıcaklığındaki gerçek kinematik viskozitesini ve ν_1 (mm^2/s) yeterli yağlama koşulunun elde edilmesi için gerekli yağlayıcının referans kinematik viskozitesini ifade etmektedir. Yuvarlanan temas yüzeyleri arasında yeterli bir yağ filmi oluşturmak için, yağlayıcı çalışma sıcaklığında belirli bir minimum viskoziteyi korumalıdır. Yatağın ömrü yağlayıcının çalışma sıcaklığındaki gerçek kinematik viskozitesinin artırılması ile uzatılabilir.



Şekil 10. Yağlayıcının referans kinematik viskozitesi (ν_1) (ISO 281)

Yağlayıcının referans kinematik viskozitesi ν_1 Şekil 10'dan D_{pw} rulmanın ortalama çapı ve n devir sayısına bağlı olarak belirlenebilmektedir (ISO 281). Gres ile yağlama durumunda bu şekil gresin içeriğinde bulunan baz yağa denk düşünülerek kullanılabilir. Gresle yağlama durumunda, gresin zayıf yağlayıcılık kabiliyetinden ve temas yüzeylerinde oluşabilecek yetersiz yağlama neticesinde

rulmanın ömrünün azalması durumu ortaya çıkmaktadır.

4.2.3. Yorulma yük sınırı (C_u)

Yorulma yük sınırı C_u (N), rulmanlarda yorulma dayanımı sınırındaki yük olarak tanımlanmaktadır. Yorulma yük sınırının hesaplanmasında aşağıdaki parametreler göz önüne alınmaktadır.

- Yatağın tipi, büyüklüğü ve iç geometrisi,
- Yuvarlanma elemanları ve bileziklerin profili,
- Yatağın üretim kalitesi,
- Bilezik malzemesinin yorulma sınırı.

Rulmanlar, yorulma sınırının altındaki yatak yüklerinde sonsuz bir ömre sahip olmak zorunda değildirler. Rulmanların pratik uygulamalarında, sınır veya karışık yağlama ve yağlayıcının kirliliği, bilezik yüzeyinde artan gerilmelere yol açabilir. Böylece yorulma yükü sınırının altında bir yatak yükü taşınması halinde bile bilezik malzemesinin yorulma sınırı yerel olarak aşılabılır.

Yorulma yük sınırı C_u 'nun hesabında bilyeli ve makaralı rulmanlar için ortalama yatak çapına bağlı olarak basitleştirilmiş bir hesap yöntemi kullanılabilir (ISO 281).

4.2.3.1. Bilyeli rulmanlarda yorulma yük sınırı (C_u)

$D_{pw} \leq 100$ mm olması durumunda:

$$\text{Yorulma yük sınırı } C_u = \frac{C_0}{22} \quad (7)$$

$D_{pw} > 100$ mm olması durumunda:

$$\text{Yorulma yük sınırı } C_u = \frac{C_0}{22} \left[\frac{100}{D_{pw}} \right]^{0.5} \quad (8)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

4.2.3.2. Makaralı rulmanlarda yorulma yük sınırı (C_u)

$D_{pw} \leq 100$ mm olması durumunda:

$$\text{Yorulma yük sınırı } C_u = \frac{C_0}{8,2} \quad (9)$$

$D_{pw} > 100$ m olması durumunda:

$$\text{Yorulma yük sınırı } C_u = \frac{C_0}{8,2} \left[\frac{100}{D_{pw}} \right]^{0,3} \quad (10)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

Bu hesaplamalarda kullanılan $C_0 (N)$, statik yük sayısı olarak ifade edilmektedir. Bir yatağın en fazla yüklenen yuvarlanma elemanlarının her iki temas yerinden birinde, yuvarlanma elemanı çapının on binde biri kadar kalıcı bir toplam şekil değiştirme meydana getiren yük, statik yük sayısı $C_0 (N)$ olarak tanımlanmıştır. Statik yük sayısı $C_0 (N)$ her yatak tipi için yatak cetvellerinde ayrı ayrı sunulmaktadır (Akkurt, 2012).

5. Sonuç

Rulmanlardaki hasarların yaklaşık olarak %15'inin kirlilik nedeni ile olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, kirlilik neticesinde yuvarlanmalı yataklarda oluşan hasarlar incelenerek kirliliğin yuvarlanmalı yatakların ömrüne nasıl etkideği ifade edilmiştir. Yuvarlanmalı yataklarda kirliliğin dikkate alındığı durumlar için geliştirilmiş olan ömür hesabı sunulmuştur. Günümüzde ISO standartlarında sunulan bu hesap yönteminin tasarımcılar tarafından rulman hesaplarında kullanımının yaygınlaştırılması sağlanmalıdır.

6. Kaynaklar

Akkurt, M. (2012). "Makina Elemanları Cilt 1", *Birsen yayınevi*, İstanbul.

Cürgül, İ. (2020). "Makina Elemanları ve Çözümlü Problemleri Cilt 2", *Birsen yayınevi*, İstanbul.

Gabelli, A., Moreles, G., Ioannides, S. 2010. "Lubrication and contamination effects on bearing life", *Evolution*, 3, 25-31.

Gabelli, A., Doyer, A., Moreles, G. 2015. "The modified life rating of rolling bearings: A criterion for gearbox design and reliability optimization", *Power transmission engineering*, 3, 46-54.

Ghalme, S.G., Mankar, A., Bhalerao, Y. 2013. "Life Models in Rolling Contact Fatigue", *Transaction on Control and Mechanical Systems*, 2 (10), 380-384.

Ioannides, E., Harris, T.A. 1985. "A new fatigue life model for rolling bearings", *Journal of tribology*, 107, 367-377.

Ioannides, E., Bergling, G., Gabelli, A. 1999. "An analytical formulation for the life of rolling bearings", *Acta Polytech. Scand., Mech. Eng. Ser.*, 137, 58-60.

ISO 281:2007, Rolling bearings-Dynamic load ratings and rating life.

Kahlman, L., Hutchings, I.M. 1999. "Effect of particulate contamination in grease-lubricated hybrid rolling bearings", *Tribology Transactions*, 42 (4), 842-850.

Maru, M.M., Castillo, R.S., Padovese, L.R. 2007. "Study of solid contamination in ball bearings through vibration and wear analyses", *Tribology International*, 40 (3), 433-440.

Morales, G.E., Gabelli, E.A. 2012. "Damage mechanisms of indentations in raceways of rolling bearings", *Evolution*, September 17.

Morales, G.E., Gabelli, E.A. 2020. "Rolling Bearing Performance Rating Parameters Review and Engineering Assessment", *Power Transmission Engineering*, 12, 78-88.

Needelman, W.M., Zaretsky, E.W. 2015. "Recalibrated Equations for Determining Effect of Oil Filtration on Rolling Bearing Life", *Tribology Transactions*, 58 (5), 786-800.

Nélias, D., Ville, F. 2000, “Detrimental Effects of Debris Dents on Rolling Contact Fatigue,” *Journal of Tribology*, 122, 55–64.

NSK. 2020. “Bearing life-Calculating the Basic Fatigue Life Expectancy of Rolling bearings”, *Technical Insight*, TI/E/0102.

Rolling Bearing Damage, Recognition of damage and bearing inspection, Publ. No. WL 82 102/2 Esi, FAG Bearings Corporation, 1996.

Sadeghi, F., Jalalahmadi, B., Slack, T.S., Raje, N., Arakere, N.K. 2009. “A Review of Rolling Contact Fatigue”, *Journal of Tribology*, 131 (4): 041403.

Schnabel, S., Marklund, P., Larsson, R. 2013. “Study of the short term effect of Fe₃O₄ particles in rolling element bearings”, World Tribology Congress, Torino, Italy, September 8–13.

<https://www.skf.com> Son Erişim Tarihi: 01.03.2020

Şekercioğlu, T. 2020. “Rulman Ömürlerinde Güvenilirlik ve Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi”, *Mühendis ve Makina*, 61 (700), 198-207.

Takemura, H., Matsumoto, Y., Murakami, Y. 2000. “Development of a New Life Equation for Ball and Roller Bearings”, *Journal of commercial vehicles*, 109 (2), 261-267.

<https://www.timken.com/tr/products/> Son Erişim Tarihi: 01.03.2020

Zaretsky, E.V. 2013. “Rolling Bearing Life Prediction, Theory and Application”, *NASA/TP-2013-215305*, Ohio, U.S.A.