

ELASTOHİDRODİNAMİK YAĞLAMADA MUYLU VE BURÇ PÜRÜZLÜLÜK MİKTARLARININ PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

Emin GÜLLÜ

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa.

ÖZET

Bu çalışmada, toplam yüzey pürüzlülük miktarının yatak performanslarını nasıl değiştirdiği incelenmektedir. Burada probleme muylunun pürüzlülük miktarı da dahil edilmiştir. Burç ve muylu pürüzleri sinüs fonksiyonları ile modellenmiş ve muylu pürüzlerinin dönme etkisi de dikkate alınmıştır. Çalışmada elde edilen performans değişiklikleri incelendiği zaman toplam yüzey pürüzlülük miktarının artması ile performanslar olumlu etkilenmiştir. Ancak yüzey pürüzlülük miktarı için bazı sınırlar göz önünde bulundurulmak zorundadır. Bu sınırların varlığı işletme şartları ile pürüz miktarları arasındaki ilişkinin, bir optimizasyon işlemiyle bulunabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elastohidrodinamik yağlama, Yatak performansı, Yatak yüzey pürüzlülüğü

EFFECT OF SHAFT AND SHELL SURFACE ROUGHNESS ON BEARING PERFORMANCE IN ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION

ABSTRACT

This study is devoted to the effect of surface roughness on bearing performance. Shaft and shell roughness are both taken into account. For both sides, surface roughness is accounted in the form of sin function and rotation effect of shell roughness involved in the model as well. Evaluation of the results leads to conclusion that increase in total roughness improves the bearing performance characteristics. But some constraints for surface roughness must be considered. Having these constraints existing, it comes out that the relation between performance parameters and surface roughness can be obtained by an optimization procedure.

Key Words : Elastohydrodynamic lubrication, Bearing performance, Bearing surface roughness.

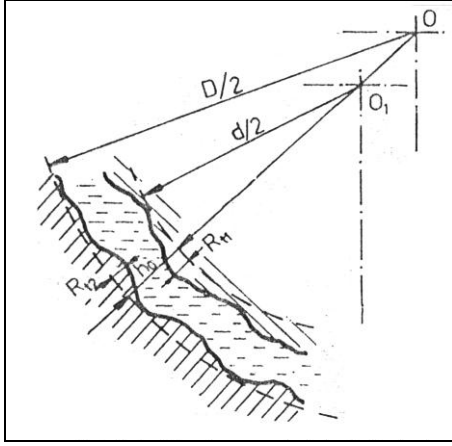
1. GİRİŞ

Yüzey düzgünlükleri ifadesinden, makro düzeyde geometrik şekilden sapmalar, mikro düzeyde ise geometri üzerinde mevcut olan pürüzler anlaşılır. Bu çalışmada yüzey düzgünlüğü denilince sadece yüzey pürüzleri anlaşılmaktadır, zira sadece pürüz etkileri dikkate alınmaktadır. Tam sıvı sürtünmenin meydana gelmesi, yani muylu ve yatak zarfının madeni pürüzlerinin birbirine değmemesi için, en ince yağ filmi h_o 'ın bu pürüzlerin toplamından biraz daha fazla olması gerekir. Şekil 1'de bir yatak zarfı ile muyludaki mevcut pürüzler görülmektedir.

Böyle bir sıvı sürtünmesinde madeni yüzeyler arasında bulunan ve belli şartlar altında oluşabilen yağ tabakasındaki basınç, dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığı takdirde, yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmış olur (Akkurt, 1980).

Reynolds diferansiyel denkleminde bulunan basınçların hesabında geçerli olan h ifadesinde, pürüzler ile ilgili olarak, h_o belirli bir değerden büyük tutulur. Böylece teorik şartları veren denklemde yüzey pürüzlülüğü gözönüne alınmış olur. Bu durum,

$$h_o \geq Rt_1 + Rt_2 \quad (1)$$



Şekil 1. Yatak pürüzlülük değerleri

bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada R_{t1} ve R_{t2} , Her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür. Geometrik bakımdan sıvı sürtünmesi (1) bağıntısı ile sağlanır ve yetinilir.

Yatak performanslarını önemli miktarda etkileyen yatak boşluğunun değişiminin incelenmesi bir çok araştırmanın esasını oluşturur. Bu değişimi imalat ve çalışma şartları meydana getirir. Zira yatak boşluğunun kama şeklinde olan teorik geometrisi aşınma, tolerans bölgesi seçimindeki hata, muylu ve burcun sehim ve deformasyonları, ısıl genleşmeleri ve yüzey düzgünlükleri ile değişime uğramaktadır. Yine montaj hataları ve dinamik ya da darbeli çalışma da yağ film kalınlığının, yani yatak boşluğunun değişmesinin diğer önemli sebepleri arasındadır.

2. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Dinamik olarak yüklü makina elemanlarında karşılaşılan elastohidrodinamik (EHD) yağlama; temas noktalarında oluşan yüksek basınçlar sebebiyle, elastik deformasyon ve yağ viskozitesinde önemli artışların meydana geldiği, bir sıvı film yağlamasıdır. Pürüzsüz yüzeyler için oldukça geliştirilen EHD yağlama teorisine göre film kalınlıkları ve basınç profilleri iyi bir doğrulukla bulunabilmektedir.

EHD yağlama teorisine göre: Minimum film kalınlığı ile, muylu ve burç yüzeylerinin pürüzlülük miktarları aynı mertebededir. Bunun anlamı bu pürüzlerin yağ film kalınlığının ve dolayısıyla da performansların değişimine çok etkili olduğu ve bunların ihmal edilemeyeceği şeklindedir.

Yüzey pürüzlük etkileri ile ilgili çalışmalar iki grupta toplanmaktadır:

1) EHD yağlama filmlerinin bozulmasında yüzey pürüzlerinin global etkilerini tahmin eden çalışmalar: Tallian ile arkadaşları (1964, 1965, 1966) ve Poon ile Hains (1966, 1967) Λ film faktörü tanımını pürüzsüz yüzeylere ait film kalınlığının, ortalama pürüz yüksekliğine oranı olarak yapmışlar ve bu film faktörünün, yuvarlanma temaslarındaki aşınma ve yorulma tavırlarını, pürüzler arası etkileşimleri karakterize eden temel bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Film faktörü tanımında geçen ortalama pürüz yüksekliği; belirli bir ölçüm uzunluğunda gerçek yüzeyin düzgünlük noktalarının, pürüzsüz yüzeyi temsil eden bir referans eksenine göre uzaklıklarının kareleri toplamının, gözönüne alınan düzgünlük noktaları sayısına bölümünün karekökü olarak tariflenir.

Johnson ve arkadaşları (1972), temastaki pürüzlerin sayısı ve pürüz basıncının, film faktörüne bağlı olarak ifade edilebildiğini gösterdiler.

Kaneta, (1992) nin, global yaklaşım tarzında verdiği sonuçlardan şu paragraf çok dikkate değerdir: Burada;

"Film kalınlığı üzerinde daha hızlı hareket eden yüzeyin etkisi hakimdir. Yani, daha hızlı hareket eden yüzey diğer yüzeye göre daha çok pürüzlü ise nominal film kalınlığında bir azalma, eğer daha az pürüzlü ise film kalınlığında bir artış söz konusudur" denilmektedir.

2) İkinci grubu çalışmalarda, belirli pürüz modellerinin incelenmesiyle sınırlı olan bu yaklaşımla, makine elemanlarının işletme performanslarının tayininde önemli sonuçlara ulaşılabilir.

Chang ve arkadaşları, (1989) ile Venner, (1991) hareketli bir yüzey düzgünlüğüyle oluşan film kalınlıklarındaki değişimlerin, yüzey ortalama hızında Hertz temas bölgesi boyunca devam ettiğini gösterdiler.

Yiv veya çıkıntı profilinin boyutlarındaki değişim film profilinde de değişime yol açmaktadır. Yağlayıcı akışkan yiv boyunca çekildiğinde ve uygun bir kama etkisi bulunmadığında, akışkan her iki yüzeyi ayırmaya yeterli olmamakta ve yağ filmi bozulmaktadır. Pürüz etkileşimleri de, bahsedilen çekmede bir artışa sebep olmaktadır (Kaneta, 1992).

Cusanu ve Wedewen, (1983), pürüzsüz yüzey değeriyle mukayese edildiğinde, yüzey kusurlarının mevcudiyetiyle çekmenin genel olarak arttığını ve enine yivler halinde, boyuna yivlere göre daha büyük bir artış gözlemlendiğini belirttiler.

Schipper ve arkadaşları, (1990), çekme ölçümleri sonunda, aşınmayı önleyen bir mikro EHD yağlamanın mevcut olduğunu vurguladılar.

Dikkat edilirse bu çalışmalar, doğrudan performanslara yönelik olmamıştır. Bu çalışmada ise pürüzlerin performans karakteristiklerini nasıl etkilediği gösterilmektedir.

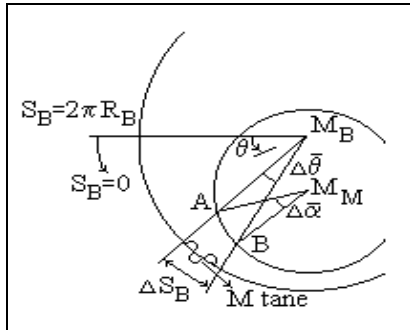
3. PÜRÜZLERİN MODELLENMESİ

Konstrüktörlerin bir çoğu, büyük ortalama yüzey basıncı (p_m) olarak riske girmek yerine yatakları hesaplanan çap ve boydan daha büyük yaparlar. Oysa bu durumda, milde büyük sehim miktarları meydana gelerek, köşeleme ihtimali artmış olacaktır. Ayrıca imalattaki geometrik düzgünlük de ihmal edilemeyecek duruma gelebilecektir. Zira işlenen parçalarda boy arttıkça tezgahların işleme hataları da artar.

Ancak burada, yüzey düzgünlüklerinden sadece yüzey pürüzlülük etkisi inceleneceği için, gerek muylu ve gerekse burcun tam yuvarlak olarak işlenmiş oldukları ve yatak tiplerinin eksen doğrultusunda otomatik olarak ayarlayabildiği kabul edilmektedir.

Pürüzlerin modellenmesi; yüzeylerin ideal daire formunu temsil eden ve referans olarak alınan bir daire etrafında, sinüs eğrileriyle yapılmaktadır. Ancak milin ω açısal hızıyla dönmesi ve pürüz ölçümlerinin burç merkezinden yapılması sebebiyle, mil için sinüs formunda yazılan denklemin, e eksantriklik mesafesinde ve ω açısal hızıyla dönen burç merkezine ötelenmesi gerekir.

O halde sabit burcun yüzey pürüzlülük ifadesi Şekil 2 yardımıyla:



Şekil 2. Burcun pürüzlülük ifadesinin geometrisi olarak yazılabilir. Burada ve konu içinde kullanılan indislerin anlamları; R_p : pürüzlü mil yarıçapı, R : pürüzsüz mil yarıçapı, R_B : burç yarıçapı, p : pürüz

indisi, M : mil indisi, B : burç indisi, R_a : pürüz genliği şeklindedir

$M=1$ için burç pürüzlülük fonksiyonu,

$$f_B(\theta) = R_{aB} \sin(N\theta), 0 < q < 2p \quad (3)$$

şekline gelir. (3) denklemi, burç pürüzlülük miktarını iyi bir şekilde verebilir, zira $M=1$ halindeki bir peryotluk sinüs dalgası üzerine istenilen sayıda ışın gönderilerek, yeterli bir pürüz değeri elde edilebilir. Bu işlem, ışınların eğriyi kestiği yerlerde θ 'ya karşılık gelen $R_{aB} \sin(n\theta)$ değerinin, pürüz yüksekliği olarak yağ filmine ilave edilmesi ve hesapların buna göre yapılması şeklindedir.

Muylu üzerindeki pürüzlülüklerin denklemini ifade etmek için, bir tam bir de yaklaşık çözüm mümkündür. Bunların her ikisi de burada verilmektedir.

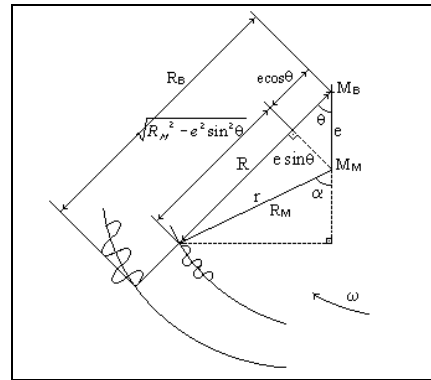
$$f_B(\theta) = R_{aB} \sin(MN\theta) \quad (2)$$

3.1 Tam Çözüm

Eğer mil dönmeseydi, burca benzer olarak muylu merkezine göre, muylunun yüzey pürüzlülük denklemini,

$$f_M(\theta) = R_{aM} \sin(N\theta) \quad (4)$$

şeklinde yazar ve daha sonra bunu burç merkezine öteledik. Yani problem, bir merkeze göre yazılmış olan bir fonksiyonun, buna e mesafede bulunan ikinci bir merkeze göre ifade edilmesine benzer bir hale gelmiş olur. O halde bu öteleme ve dönme işlemi Şekil 3 yardımıyla aşağıdaki sırada yapılabilir:



Şekil 3. Muylunun pürüzlülük ifadesi önce burç merkezinden mil geometrik olarak ifade edilir.

$$R = e \cos(\theta) + \sqrt{R_M^2 - e^2 \sin^2 \theta} \quad (5)$$

Elde edilen (5) denklemi, mil çevresinin (R_M yarıçaplı, M_M merkezli çemberin) M_B merkezli (R, θ) polar takımındaki ifadesidir.

Mil pürüzlülüğünün M_M merkezli (r, α) takımındaki denklemi:

$$r = R_M - Ra_M \sin(n\alpha) \quad (6)$$

şeklinde olur.

Her iki açı birbirine,

$$\tan(\theta) = \frac{r(\alpha) \sin \alpha}{r(\alpha) \cos \alpha + e} \quad (7)$$

denklemleri ile bağlıdır.

Mil pürüzlülüğünün M_B merkezli (R, θ) polar takımındaki denklemi, yani mil pürüzlülüğü dahil, mil yarıçapının burç merkezine göre değişimi:

$$Rp_M = e \cos(\theta) + \sqrt{r^2(\alpha) - e^2 \sin^2 \theta} \quad (8)$$

şeklinde dir. (7)'i tekrar düzenlersek,

$$[R_m - Ra_m \sin(n\alpha)][\sin \alpha - \tan \theta \cos \alpha] - e \tan \theta = 0 \quad (9)$$

olur. Bu transandantal (9) denkleminin çözümü α yı verir. Bundan sonraki işlemler şöyledir:

(9) denkleminde $\alpha = \alpha(\theta)$ bulunup (6) denkleminde yerine konur ve $r(\alpha)$ bulunur. Bu değer (8) ifadesine yerleştirilerek Rp_m bulunur. Ayrıca aynı θ için (5)'den R hesaplanarak pürüzler için aşağıdaki irdeleme yapılabilir:

$$Rp_M = R - Ra_M \sin(n\theta - \omega t) \quad (12)$$

$Rp_m > R$ ise pürüz tepe şeklinde,
 $Rp_m < R$ ise pürüz çukur şeklinde,
 $Rp_m = R$ ise pürüz yoktur.

Benzer şekilde burcun pürüzlülük ifadesi şöyle yazılabilir:

Burç çevresinin (R, θ) daki ifadesi: $Rp_B = R_B$ (sabit) şeklindedir.

Yine burç pürüzlülükleri için, yukarıdakine benzer bir irdeleme yapmak mümkündür:

$Rp_B > R_B$ ise pürüz çukur,
 $Rp_B < R_B$ ise pürüz tepe,
 $Rp_B = R_B$ ise pürüz yoktur.

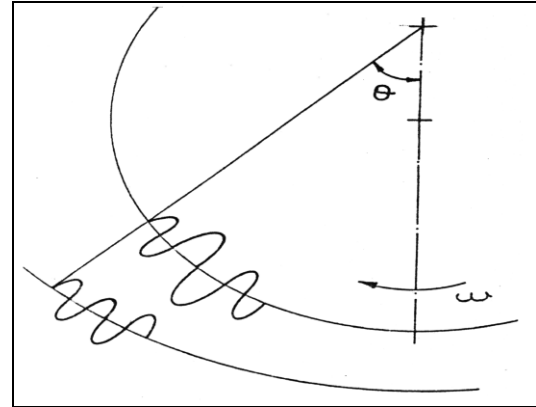
$$h = Rp_B - Rp_M \quad (daima) \quad (11)$$

Milin ω açısal hızıyla dönmesi, denklemde $n\theta$ teriminin ($n\theta - \omega t$) ile değiştirilmesiyle gözönüne alınır.

Bu tam çözüm halinde, yağ filmi kalınlığı ifadesi; şeklinde verilmektedir.

3.2 Tam Çözüme Yaklaşım

Mıyılunun denklemi burç merkezinden basit olarak da yazılabilir ve bu yeterli bir hassaslıkta çözümde kullanılabilir. Bu şekilde tam çözüme göre, genliği aynı fakat değişken periyota sahip olan bir sinüs eğrisi elde edilir. Yani dalgaların görünümünü bozulmuş olur ve bir kısa bir uzun dalga birbirini takip eder. Bu durumda burç merkezinden bakıldığı zaman mıyılı pürüzleri Şekil 4' deki gibidir.



Şekil 4. Burç merkezinden mıyılı pürüzlerinin görünümü

Bu şekilde mıyılı pürüzlerinin denklemi, mıyılunun döndüğü de dikkate alınmış olarak şöyle yazılabilir:

$$Rp_B = R_B - Ra_B \sin(n\theta) \quad (10)$$

Bu kabulün, tam çözümden elde edilecek sonuçlara çok yakın değerler vereceği söylenebilir. Zira bozulmuş yüzey pürüzlülüklerinden uygun sayıda ışınların geçirilmesiyle, uygun yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilebilir. Teorik halde yani hiçbir pürüz yokken Reynolds denklemi birinci defa çözüldükten sonra, bu pürüzler hesaplara dahil edilerek, Reynolds denklemi tekrar çözülmüşse gerçek sonuçlar elde edilmiş olur.

4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Yatak içindeki akış için geçerli olan Reynolds denklemi bazı kabuller sonucu, sonlu bir yatak için şu şekildeşekilde verilir.

$$\frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta\omega \frac{\partial h}{\partial \theta} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

Bu denklem, $p=(\eta_0 UR/c^2)/P$, $h=cH$, $z=Z/R$ ve $t=(R/U)T$ parametreleri kullanılarak, birimsiz ve boyutsuz şekilde getirilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6 \frac{\partial H}{\partial \theta} + 12 \frac{\partial H}{\partial T} \quad (14)$$

Bu denklem basıncın herhangi bir sebeple değişmesi için $H=1+\varepsilon \cos \theta$ ifadesinin ya θ yönünde, ya da zamanla değişmesi gerektiğini ifade etmektedir. Burada incelenen yüzey pürüzlük değişimi de H 'yi değiştireceğinden, basınçlar ve buna bağlı diğer değerler de değişecektir.

Bu değişimlerin etkileri, önce de bahsedildiği gibi Reynolds denklemine pürüzlerin ilavesi ve tekrar çözümlenmesiyle belirlenir. Bu, denklem (15) ile ifade edilebilir

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6 \frac{\partial (H + \sum R_a)}{\partial \theta} + 12 \frac{\partial H}{\partial T} \quad (15)$$

Bu çalışmada mil pürüzlülük değerleri, yaklaşık çözümden hesaplanmıştır. $\partial H / \partial T$ teriminin pürüzlerle değişiminin etkisi ise şöyle dikkate

alınmıştır: Milin merkezi belli bir ε konumunda sabit şekilde dönmektedir. Böylece, sanki olayın fotoğrafı çekilerek, muylu için istenilen ΔT zaman aralıklarında çözüm bulunur. Bu şekilde anlık çözümler elde edilmekte, yani mil bir tur atınca tekrar aynı konuma geliyor diye düşünülmektedir. Ancak gerçekte mil merkezi de yer değişimine uğrar ve basınç hacmi bir diyafram hareketi yapar.

Bu kabullerle muylu ve mil çevreleri yirmi eşit parçaya bölünmüş ve her bir bölmeden bir periyotluk sinüs eğrisi geçirilmiştir. Her sinüs eğrisine de sekiz ışın yollanarak, bu açılar için eğriden pürüzlülük miktarları hesaplanmış, bunlar Reynolds denklemindeki H ifadelerine ilave edilerek denklem tekrar çözülmüştür.

Reynolds denklemi, çözüm için sonlu farklar yardımıyla denklem takımı haline getirilir ve bunlar iterasyon yoluyla çözümlenir. Bu şekilde basınçlar bulunduktan sonra yatak yükü, nümerik integrasyonla; hem pürüzsüz olan teorik durum, hem de pürüzlü, yani pratik hal için bulunur. Böylelikle birbiriyle mukayese imkanı mümkün olabilir.

Bu amaçla yapılmış ve sadece burç pürüzlülüğünün dikkate alındığı Güllü, ve Karadere, (1995) çalışmasının sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Bu çalışmanın 5. bölümünde verilen burç ve muylu pürüzlülük etkilerinin bir arada dikkate alındığı hal ile adı geçen çalışma karşılaştırılabilir.

Tablo1 Sadece Burç Pürüzlülüğü ile Elde Edilmiş Boyutsuz Performans Karakteristikleri.

Eksantriklik (e)	R _{ab} (mm)	Yük (-)	Yük Açısı (-)	Maks. Bas. (-)
	0	6.43	52.88	4.48
	1	6.76	53.68	5.61
0.7	2	7.43	54.96	5.76
	3	8.41	56.23	7.01
	4	9.53	58.15	8.61
	5	10.05	60.93	9.09
	0	12.28	59.55	10.06
	1	13.21	60.84	11.41
0.8	2	16.31	63.11	16.31
	3	19.69	65.21	19.25
	4	23.77	67.82	24.53

5. ELDE EDİLEN PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ

Burç ve muylunun pürüzlülük miktarları talaşlı imalatla bitirme işleminden seçilmiştir. Bu şekilde belirli eksantriklik oranları ve yüzey pürüzleri için bulunan yatak performans değerleri Tablo.2 de verilmektedir.

Tablo 2. Burç ve Muylu Pürüzlülükleri için Boyutsuz Performans Karakteristikleri.

Eksantriklik (e)	Ra _{B+} Ra _M (mm)	Yük (-)	Yük Açısı (-)	Maks. Bas. (-)
0.7	0	6.43	52.88	4.48
	3+2	6.93	53.04-	5.28-
		10.05	60.93	9.77
	2+3	7.05-	53.30-	5.34-
		10.47	60.93	9.81
0.8	0	12.28	59.55	10.06
	1+2	13.83	61.18-	12.91-
		19.69	65.21	24.39
	2+1	14.12-	61.24-	13.16-
		19.85	65.21	23.87

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüzey düzgünlükleri açısından hem muylu, hem de burç pürüzlülük miktarlarının EHD yağlamaya ve performans karakteristiklerine etkileri gözönüne alınmıştır.

Tablolardaki belirli eksantriklik değerleri için yalnız burcun pürüzlülük değerleriyle elde edilen performanslarıyla burç ve muylu için aynı pürüzlülük değerleriyle bulunan performanslar karşılaştırıldığında yükte, maksimum basınçta ve yük açısında düşmeler tesbit edilmiştir. Bu sonuçlar yük ve maksimum basınç açısından mil pürüzlülüğü burçtan az olduğu zaman yağ film kalınlıklarında bir artma olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca, yük açısı olarak tanımlanan ve yük doğrultusu ile muylu-burç eksenler doğrultusu arasındaki açının, sadece burç pürüzlülüğüne sahip bir yatağa göre azalmasının fiziksel anlamı, yatağın basınç alanında stabilizeyi olumlu yönde etkileyen bir genişlemenin olmasıdır.

Ancak yüzey pürüzlülük yüksekliklerinin artırılmasına bir takım sınırlar vardır. Bunlar:

- 1) Yüzey pürüzlülükleri ile minimum film kalınlığı arasındaki pratik ilişkidir. Buna göre minimum film kalınlığı, muylu ve burç yüzey pürüzlükleri toplamının 2 yada 5 katı olması,
- 2) Yine hareket başlangıçları ile durmalardaki metal temasları ve rejim halinde de yağ basıncından meydana gelen, pürüzlerdeki sürekli ezilme ve kırılmanın yol açtığı mekanik yüzey hasarları,
- 3) Yüzey pürüzlülüğü sebebiyle, yağ akışında dalgalanmalar meydana gelerek, bu film dalgalanmalarının stabilize üzerinde bozucu bir etki yapma ihtimalinin bulunması şeklinde sıralanabilir.

Sonuç olarak; bütün bu etkenler gözönünde bulundurularak, her işletme şartı için uygun yüzey pürüzlülüklerinin bir optimizasyon problemiyle bulunabileceği söylenebilir.

7. KAYNAKLAR

- Akkurt, M. 1980. "Makina Elemanları", İkinci Cilt, I.T.Ü. Müh.-Mim. Fak. Sayı:134.
- Tallian, T.E., Chiu, Y.P., Huttenocher, D.F., Kamenshin, J.A., Sibley, L.B. 1964, and Sindlinger, N.E., "Lubricant Films in Rolling Contact of Rough Surfaces", ASLE Trans., Vol.7, p.109.
- Tallian, T.E., McCool, J.I. and Sibley, L.B. 1965/66. "Partial Elastohydrodynamic Lubrication in Rolling Contact", Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.180, Pt.3B, p.169.
- Poon, S. and Hains, D.J. 1966/67. "Frictional Behavior of Lubricated Rolling - Contact Elements", Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.181, Pt.1, No.16, p.363.
- Johnson, K.L., Greenwood, J.A. and Poon, S.Y. 1972. "A Simple Theory of asperity Contact in EHD Lubrication", Wear, Vol.19, p.91.
- Kaneta, M. 1992. "Effects of Surface in Roughness Elastohydrodynamic Lubrication", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol.35, No.4, p.535.
- Chang, L., Cusano, C. and Conry, T.F. 1989. "Effects of lubricant Rheology and Kinematic Conditions on Micro-Elastohydrodynamic Lubrication", Trans. ASME, J. Tribol., Vol.111, No.2, p.344.
- Venner, C.H. 1991. "Multilevel Solution of the EHL Line and Point Contact Problems", Ph. D. Thesis, Twente University, The Netherlands.
- Cusano, C. and Wedewen, L.D. 1983. "The Influence of Surface Dents and Grooves on Traction in Sliding EHD Point Contacts", ASLE Trans., Vol.26, No.3, p.306.
- Schipper, D.J., Vroegop, P.H., de Gee, A.W.J. 1990, and Bosma, R., "Micro-EHL in Lubricated Concentrated Contacts", Trans. ASME, J. Tribol., Vol.112, No.2, p.392.
- Güllü, E., Karadere, G. 1995. "Radyal Kaymalı Yataklarda Yüzey Pürüzlülüğünün Elastohidrodinamik Yağlamaya Etkileri", Üçüncü Balıkesir Mühendislik Sempozyumu, Balıkesir.