

DUDAKLI SIZDIRMAZLIK ELEMANLARINDA SIZDIRMAZLIK ANALİZİ

Metin AKKÖK

ÖZET

Dönen miller için kullanılan sentetik kauçuktan yapılmış dudaklı sızdırmazlık elemanlarında yağ kaçağının nedenlerinin anlaşılması ve kaçak miktarının belirlenmesi için sızdırmazlık mekanizmasının incelenmesi ve sızdırmazlık performansını belirleyen parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Sızdırmazlık elemanı dudağı ile dönen mil yüzeyi arasındaki hidrodinamik yağ basıncı dudak üzerinde elastik deformasyona ve yağ filmindeki kayma gerilmesi kayma deformasyonuna neden olmaktadır. Bu nedenle hidrodinamik basınç dağılımı ile birlikte dudak üzerindeki deformasyonun birlikte çözümünün yapıldığı elastohidrodinamik analiz yönteminin uygulanması gereklidir. Bu çalışmada dönen mil yüzeyi katı ve pürüzsüz bir yüzey olarak, sızdırmazlık elemanı dudağı ise sabit duran, ondülasyonlar içeren pürüzlü ve elastik bir yüzey olarak alınmıştır. Radyal elastik deformasyonları dikkate alarak belirlenen yağ film kalınlığı dağılımı için Reynolds denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümlenerek basınç dağılımı hesaplanmış ve yağ kaçak miktarı belirlenmiştir. Yağ filmindeki kayma gerilmesi nedeniyle kayma deformasyonu sonucu oluşan yağ film şekli dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda ondülasyon üzerindeki kayma deformasyonunun yağ kaçağını azalttığı gösterilmiştir.

GİRİŞ

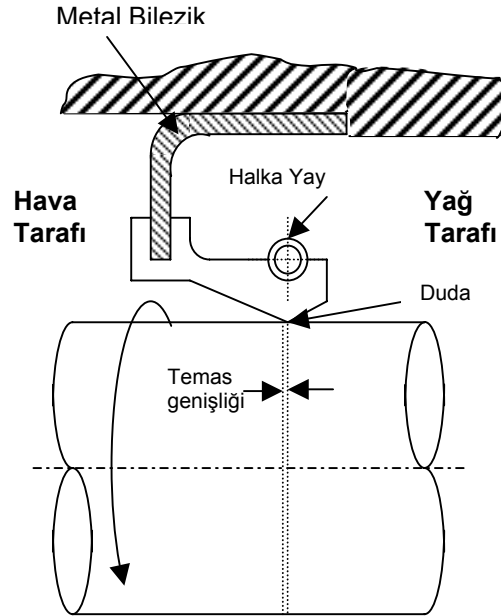
Dudaklı sızdırmazlık elemanları yağ ile çalışan mekanik sistemlerde yağ içeren taraftan dış çevreye yağ kaçağını önlemek ve dış çevreden yağ tarafına kirlilik oluşturacak parçacıkların girmesini engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Sızdırmazlık elemanı bir metal gövde ile bu gövde üzerine kaplanmış sentetik kauçuktan yapılmış manşet ve mil ile temas eden dudaktan oluşmaktadır. Sızdırmazlık elemanının gövdesi makina parçasındaki yuva içine ve sızdırmazlık dudağı ise dönen mil üzerine yerleştirilerek kullanılmaktadır. Şekil 1'de gövde ve mil üzerine yerleştirilmiş bir sızdırmazlık elemanı gösterilmektedir. Dudak ile dönen mil baskı uygulamak amacıyla kauçuk dudak arkasına yerleştirilen bir halka yay ile mil yüzeyine çepeçevre bir radyal baskı uygulanmaktadır. Bu tip sızdırmazlık elemanları bir çok uygulamada yaklaşık 50 yıldır kullanılmakta olmasına rağmen sızdırmazlık mekanizması üzerine yapılan deneysel sonuçları açıklayan temel kuramsal çalışmalar halen yetersizdir. Bu kapsamda radyal sızdırmazlık elemanlarında hidrodinamik yağlama mekanizması ve bunun sonucu oluşan yağ kaçağı miktarının açıklanmasına yönelik olarak yapılmış çalışmalar da vardır [1-7].

Sızdırmazlık elemanları üzerinde yapılan deneysel çalışmalar temas yükü ve sızdırmazlık mekanizmasının mil yüzeyi ile temas durumundaki dudaklar üzerindeki mikro-geometri ile çok yakından etkilenmektedir. Uygulamada sızdırmazlık elemanın dudak yüzeylerinde çok farklı tipte mikro geometriler kullanılmaktadır. Bunlar küçük ölçekte mikro pürüzler olabileceği gibi büyük ölçekte de olabilmekte ve mikro ondülasyonlar olabilmektedir [2].

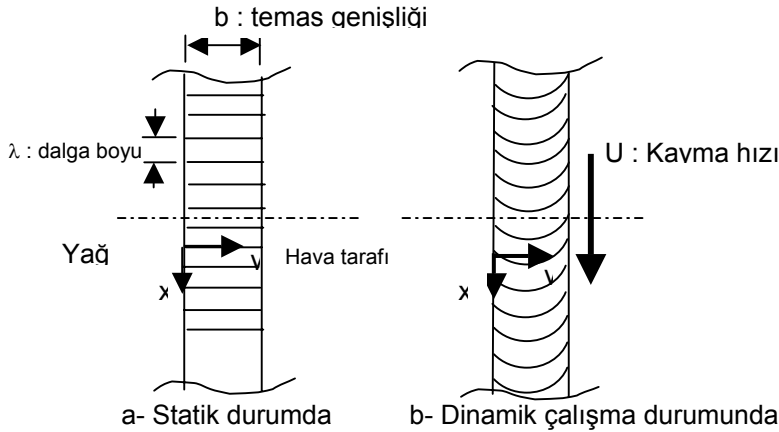
Şekil 2.a'da dudak üzerindeki mil eksenine paralel ondülasyonların statik durumdaki şekli verilmiş ve koordinat sistemi gösterilmiştir. Şekil 2.b'de dinamik çalışma durumunda çevre yönünde kayma nedeniyle yağ filminde oluşan kayma gerilmeleri sonucunda şekil değiştiren ondülasyonlar gösterilmiştir.

Dönen mil ile dudak yüzeyi arasında oluşan yağ akımı filmdeki basınç dağılımını, kayma gerilmesini ve kaçak oranını belirler. Yağ film basıncı dudağın radyal deformasyonuna, kayma gerilmesi de dudak yüzeyinin mil dönme yönünde deforme olmasına neden olur. Dudağın elastik deformasyonu mil yüzeyi ile dudak arasında oluşacak yağ film kalınlığını ve şeklini belirleyeceğinden, elastik deformasyon ve hidrodinamik basınç karşılıklı olarak etkilendiği sızdırmazlık dudağının analizi tümüyle elasto-hidrodinamik bir problemidir.

Bu çalışmada dönen pürüzsüz bir mil yüzeyi ile temas halinde olan pürüzlü bir radyal dudaklı sızdırmazlık elemanın hidrodinamik analizi yapılmıştır. Bunlar; bir boyutlu ve mil eksenine paralel sinusoidal pürüzlü dudak yüzeyi ile mil eksenine paralel sinusoidal pürüzlü dudak yüzeyinin kayma yönünde deforme olması ile oluşan bir boyutlu pürüzlerdir. Bu çalışmanın amacı belirtilen bu iki yüzey pürüzünü içeren radyal sızdırmazlık elemanında yağ kaçak miktarının belirlenmesidir.



Şekil 1. Mil ve yuvaya yerleştirilmiş bir dudaklı radyal sızdırmazlık elemanı



Şekil 2. Sızdırmazlık elemanı yüzeyi üzerindeki ondülasyonlar

YAĞ FİLM KALINLIĞI

Dudak yüzeyinde milin dönmesi ile oluşan yağ film basıncının belirlenmesi için yağ film geometrisinin bilinmesi gereklidir. Dudak yüzeyindeki kayma yönündeki pürüzlülük, aksenal yöndeki dudak profili ve kayma gerilmesi nedeniyle deformasyon sonucu oluşan yağ geometrisi aşağıda verilmiştir.

Yüzey Pürüzlülüğü Geometrisi

Ondülasyon genliği h_1 olan dudak profilinin mil yüzeyinin kayma yönündeki değişimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$h_r(x, y) = h_1 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - d(y)) \right] \quad (1)$$

Burada $d(y)$ dudaklardaki ondülasyonların yağ filmindeki kayma gerilmesi nedeniyle mil çevresi yönündeki deformasyonudur. Deforme olmamış durumda ondülasyonlar Şekil 2.a'da gösterildiği gibi mil eksenine paraleldir. Ancak dinamik çalışma durumunda mil eksenine paralel olan ondülasyonlar yağ filminin dudak yüzeyi üzerinde mil dönme yönünde oluşturduğu kayma gerilmesi nedeniyle deforme olmaktadır. Radyal sızdırmazlık elemanı yüzeyinde mil dönüşü ile birlikte mil dönme yönünde oluşan teğetsel deformasyon deneysel olarak ölçülmüş ve kuramsal olarak da incelenmiştir [1,3]. Bu çalışmada sızdırmazlık elemanının Şekil 2.b'de gösterildiği gibi teğetsel deformasyonunun aksenal pozisyona göre değiştiği ve dudağın hava tarafına göre en fazla deformasyonun ondülasyon genliğine oranı 1 ile 2 arasında değiştiği belirlenmiştir. En fazla radyal deformasyonun olduğu nokta, yağ filmi en ince olduğu noktada olmakta ve sızdırmazlık elemanının geometrisi gereği bu nokta yağ tarafına yakın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yağ tarafındaki kayma deformasyonunun hava tarafındaki deformasyona göre daha fazla olduğu da bulunmuştur. Bu çalışmada belirtilen özellikleri içeren teğetsel deformasyon olarak alınmıştır. Bu eşitlikle verilen deformasyon göreceli olarak tanımlanmıştır. Sızdırmazlık elemanı üzerindeki sinüzoidal pürüzlerdeki deformasyonlar birbirinin aynısı olacağından tüm pürüzlerde aynı deformasyon şekli oluşmaktadır. Bu nedenle bu deformasyonlar mutlak deformasyonlar olmayıp göreceli olarak tanımlanmıştır. Burada D katsayısı deformasyonun ondülasyon periyoduna göre en fazla değerini belirlemektedir. Bu değer deforme olmamış pürüzler için 0 ve deforme olmuş pürüzler için 1 olarak alınmıştır. $D_{yağ}$ katsayısı yağ tarafındaki deformasyonun en fazla deformasyona oranını belirlemektedir ve bu değer yaklaşık 0.25'dir. Bu durumda ondülasyon genliği ile boyutsuzlaştırılmış yüzey pürüzlülüğünün dağılımı olarak ifade edilir.

$$\delta(Y) = \frac{d(y)}{\lambda} = \begin{cases} D \cos \left[\frac{-(Y - Y_{min})}{Y_{min}} \cos^{-1}(D_y) \right] & 0 \leq Y \leq Y_{min} \\ D \cos \left[\frac{\pi}{2(1 - Y_{min})} (Y - Y_{min}) \right] & Y_{min} \leq Y \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$H_r(X, Y) = \frac{h_r(x, y)}{h_1} = \cos 2\pi (X - \delta(Y)) \quad (3)$$

Film Kalınlığının Aksenal Yöndeki Değişimi

Sızdırmazlık elemanı mile belirli miktarda sıkı geçirilerek yerleştirilir. Elemanın temas noktasındaki dudağı elastik deformasyon ile ve rodaj süresince oluşan aşınma ile düzleşmektedir. Sızdırmazlık dudağının yağ tarafındaki açı hava tarafındaki açıdan büyüktür ve dudak bölgesinde oluşan deformasyon sonucunda dudak ile mil yüzeyi arasında oluşan yağ film kalınlığı simetrik olmamaktadır [4]. Bu bir çok araştırmacı tarafından deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenen dudak üzerinde gösterilmiştir. Bu çalışmada boyutsuz olarak yağ filminin aksenal yöndeki değişimi aşağıdaki şekilde alınmıştır.

$$H_2(Y) = \begin{cases} H_a \left[1 - \cos \left[\frac{\pi}{2Y_{\min}} (Y - Y_{\min}) \right] \right] & 0 \leq Y \leq Y_{\min} \\ H_a \left[1 - \cos \left[\frac{\pi}{2(1 - Y_{\min})} (Y - Y_{\min}) \right] \right] & Y_{\min} \leq Y \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

Burada H_a dudağın aksel yöndeki profil yüksekliğinin ondülasyon genişliğine oranını, Y_{\min} dudak ile mil yüzeyi arasında oluşan yağ filminin aksel yönde en ince yerinin yağ tarafına olan uzaklığının temas genişliğine oranını göstermektedir. Bir çok uygulamada bu değer 0.2 ile 0.3 arasında değişmektedir [1, 4] ve bu çalışmada 0.3 olarak alınmıştır.

Dudak ile mil yüzeyi arasında ortalama yağ film kalınlığı üzerindeki aksel yöndeki radyal deformasyon ve kayma yönündeki teğetsel deformasyon ile tanımlanan toplam yağ film kalınlığı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$H(X, Y) = H_0 + H_r(X, Y) + H_2(Y) \quad (5)$$

BASINÇ OLUŞUMU

Kayan düz bir yüzey ile sabit duran bir yüzey arasında tanımlanan bir yağ film kalınlığı içinde oluşan basınç dağılımı Reynolds denklemi ile belirlenir. Sızdırmazlık elemanı dudağı ile dönen mil yüzeyi arasında oluşan yağ film kalınlığı mil çapına göre çok küçük olduğu için mil yüzeyinin eğri yüzeyi ihmal edilerek düz bir yüzey olarak alınmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (Uh) \quad (6)$$

Burada μ yağın çalışma sıcaklığındaki viskozitesi, U yüzeyin x yönündeki kayma hızıdır. Bu denklemin çözümü verilen bir film kalınlığı için sayısal yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Çözümün boyutsuz parametreler kullanılarak genelleştirilebilmesi amacıyla aşağıdaki boyutsuz parametreler tanımlanabilir.

$$X = \frac{x}{\lambda}, \quad Y = \frac{y}{b}, \quad H = \frac{h}{h_1}, \quad P = \frac{p}{6\mu U\lambda/h_1^2} \quad (7)$$

Bu boyutsuz parametreler ile Reynolds deklemini aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \left(\frac{\lambda}{b} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = \frac{\partial H}{\partial X} \quad (8)$$

Sızdırmazlık elemanı yüzeyi birbirini tekrarlayan pürüzlerden oluştuğu için sadece bir pürüzün tanımlandığı bölge için çözüm yapılmıştır. Sızdırmazlık dudağını temas genişliği gösteren iki yan kenarda atmosfer basıncı olarak sıfır alınmıştır.

$$P(X,0) = P(X,1) = 0, \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (9)$$

Sızdırmazlık elemanı çevresince periyodik olan sinuzoidal yüzey pürüzlülüğünün hidrodinamik analizinde sadece bir periyodun incelenmesi yeterlidir. Bu nedenle bir periyot içinde oluşan basınç dağılımı birbirinin tekrarı olacağından periyot başlangıcında ve sonunda periyodiklik sınır şartı kullanılmıştır.

$$\left. \begin{aligned} P(0, Y) &= P(1, Y) \\ \frac{\partial P}{\partial X} \Big|_{X=0} &= \frac{\partial P}{\partial X} \Big|_{X=1} \end{aligned} \right\} \quad 0 \leq Y \leq 1 \quad (10)$$

Mil yüzeyi ile temas eden dudağın her iki tarafının atmosfer basıncıta yağ ile dolu olduğu düşünülerek, dudak temas bölgesi içinde ondülasyonların genişleyen bölümünde oluşan kaviteye yağın atmosferik basıncıta girdiği kabul edilmiştir. Reynolds kaviteye şartı olarak bilinen bu şart yağ basıncı ve basınç değişiminin sıfır olarak alınması ile uygulanmıştır.

$$P(X, Y) = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial P(X, Y)}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

Reynolds kaviteye sınır şartı Reynolds denkleminin ardışık tekrar yöntemi ile çözümü sırasında düğüm noktalarındaki basınç değerlerinin atmosfer basıncının altında olması durumunda bu basınç değerlerinin atmosfer basınç değerine eşitlenmesi ile kaviteye bölgesi belirlenmiştir.

YAĞ KAÇAĞI HESABI

Sızdırmazlık elemanının temas genişliği içinde oluşan basınç dağılımı sonucunda dudağın kenarından aksel yönde hava tarafına yağ kaçağı oluşmaktadır. Bu kaçağın hesaplanmasında birim genişlik için h kalınlığındaki bir yağ filminden y (aksel) yönünde oluşan akım miktarı

$$q = - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=b} \quad (12)$$

olarak verilir. Bu akım dudak kenarındaki dx genişliğindeki küçük bir eleman için

$$dq = - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=b} dx \quad (15)$$

olarak yazılır. Dudak kenarında bir dalga boyu genişlik için integrali ile ve yukarıda tanımlanan boyutsuz parametreler kullanılarak sızdırmazlık elemanında oluşan boyutsuz yağ kaçağı

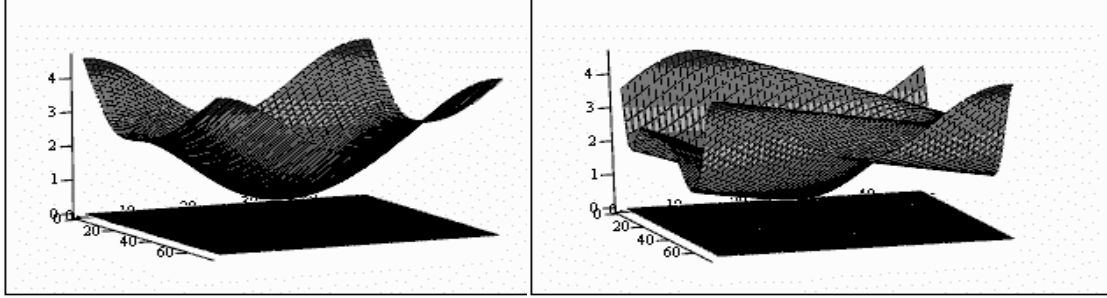
$$Q = \frac{q}{h_1 \lambda U / 2} = - \int_0^1 H^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \Big|_{Y=1} dX \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir.

TEMAS DUDAĞINDA KAÇAK ANALİZİ

Tanımlanan hidrodinamik problem tipik bir sızdırmazlık elemanı için çözülmüştür. Bu analizde dudak temas genişliği $b = 100 \mu\text{m}$, ondülasyonların genliği $h_1 = 0.25 \mu\text{m}$, dalgaboyu $\lambda = 10 \mu\text{m}$, ortalama yağ film kalınlığı $h_0 = 0.40 \mu\text{m}$, dudağın aksel yöndeki profil yüksekliğinin ondülasyon genliğine oranı $H_a = 2$ olarak alınmıştır. Bu değerler ile yukarıdaki bölümde tanımlanan boyutsuz yağ film geometrisi Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3.a'da kayma deformasyonu olmayan dudaktaki film geometrisi ile $D = 1$ durumu için film geometrisi verilmiştir.

Şekil 4'te dudak üzerindeki pürüzlerin mil eksenine paralel olma durumunda dudak ile mil arasında oluşan basınç dağılımı ve kavitasyon bölgesi bir dalgaboyu için gösterilmiştir. Kavitasyon bölgesi yaklaşık olarak mil eksenine paralel olmakta ve yüksek basınç bölgesinden dudağın hava tarafındaki kenarına doğrudan yağ akımı oluşmaktadır. Bu durum için boyutsuz yağ kaçağı yaklaşık 6.0 olarak hesaplanmıştır.

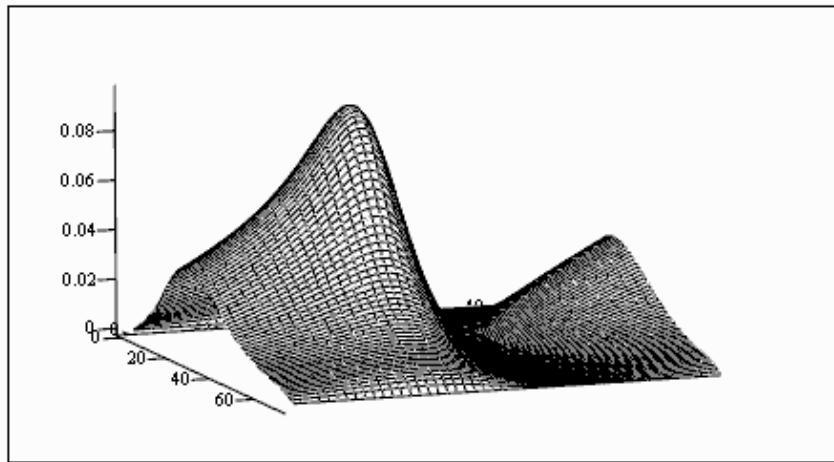


H, HS

H, HS

a. Kayma deformasyonu olmaması durumu (D = 0) b. Kayma deformasyonu olması durumu (D = 1)

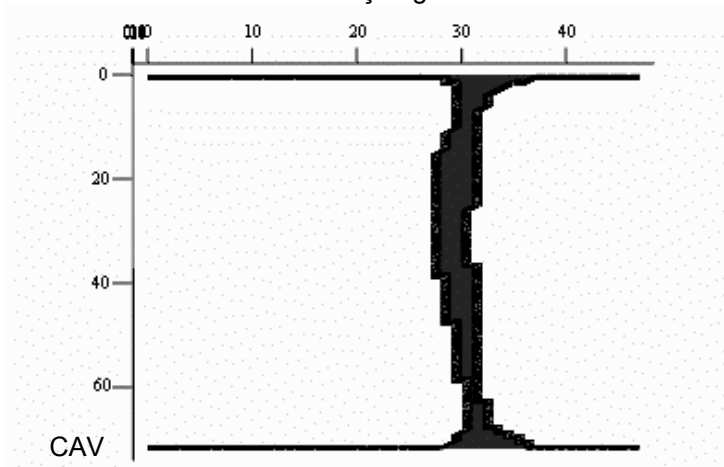
Şekil 3. Sızdırmazlık elemanı dudağı ile mil arasındaki yağ film şekli



$\mu = 0.01$ Pa.s
 $U = 4$ m/s
 $b = 1 \times 10^{-4}$ m
 $h_1 = 2.5 \times 10^{-7}$ m
 $\lambda = 1 \times 10^{-5}$ m
 $H_0 = 1.6$
 $Y_{min} = 0.3$ $Ha = 2$
 $D = 0$ $Dy = 0.25$
 $Q_{air} = 6.025$

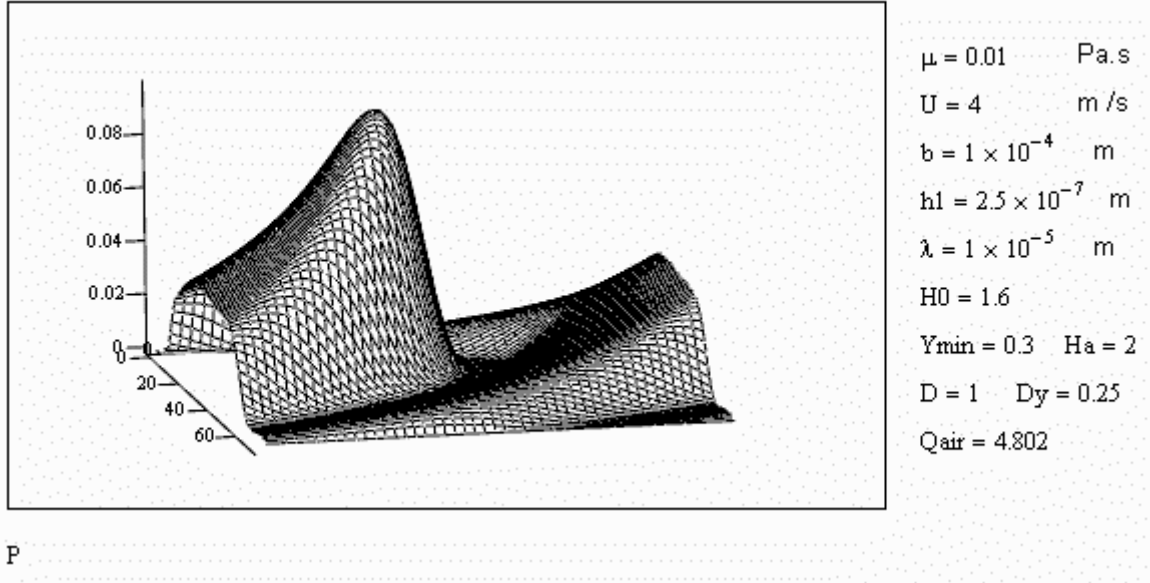
P

a. Basınç dağılımı

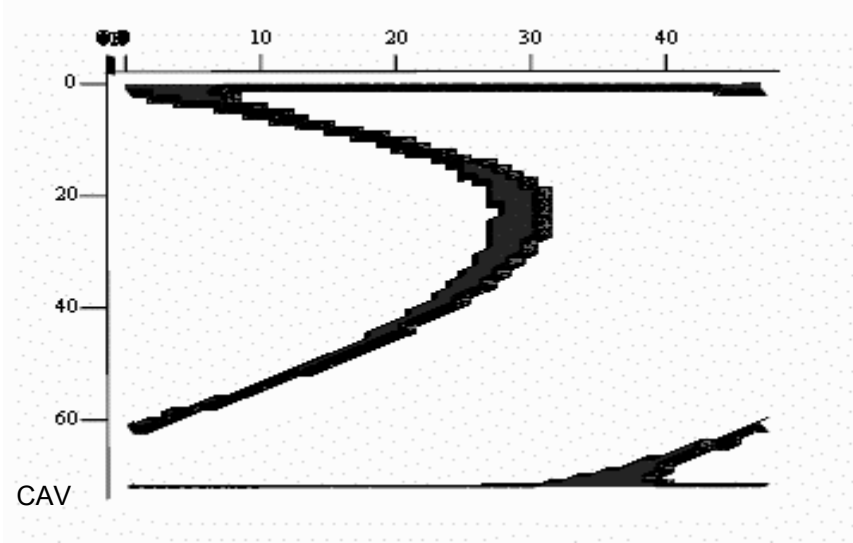


b. Kavitasyon bölgesi

Şekil 4. Sızdırmazlık elemanı dudağındaki ondülasyonlarda kayma deformasyonu olmaması durumu (D = 0)



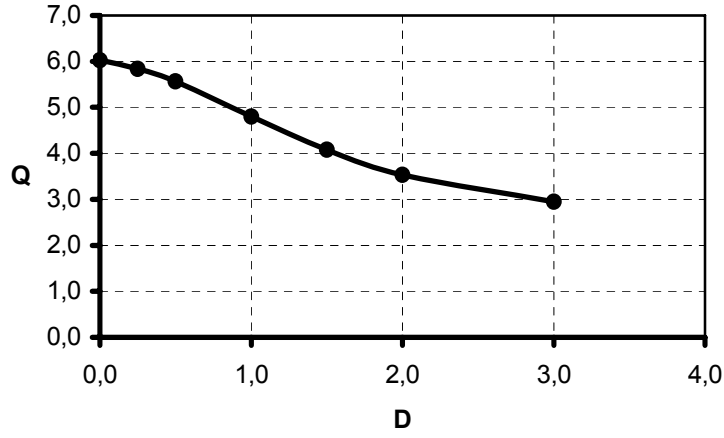
a. Basınç Dağılımı



b. Kaviteasyon Bölgesi

Şekil 5. Sızdırmazlık Elemanı Dudağındaki Ondülasyonlarda Kayma Deformasyonu Olması Durumu ($D = 1$)

Şekil 5'te ise aynı çalışma koşullarındaki sızdırmazlık elemanının dudaklarındaki pürüzlerin kayma gerilmesi sonucunda deforme olması sonucunda oluşan basınç dağılımı ve kaviteasyon bölgesi gösterilmiştir. Bu durumda yüksek basınç bölgesi etrafında oluşan kaviteasyon bölgesi yağın sızdırmazlık elemanı kenarından doğrudan hava tarafına kaçmasını önlenmektedir. Bu durum için yaklaşık % 20 azalma ile boyutsuz yağ kaçağı 4.8 olarak hesaplanmıştır. Bir dalga boyu için boyutsuz yağ kaçak debisinin dudaktaki kayma deformasyonuna göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Kayma deformasyonunun ondülasyon dalga boyunun 3 katı olması durumunda yağ kaçağının yarı yarıya azaldığı gösterilmiştir.



Şekil 6. Boyutsuz yağ kaçağının ondülasyonlardaki kayma deformasyonu ile değişimi

SONUÇ

Bu çalışmada sızdırmazlık dudağı ile dönen mil yüzeyi arasında oluşan yağ film kalınlığı çeşitli şekillerde alınarak yağ kaçak mekanizması incelenmiştir. Dudak yüzeyi üzerindeki pürüz genliği yaklaşık olarak ortalama film kalınlığı kadar olan pürüzler üzerinde oluşan basınç dağılımı hidrodinamik yağlama denkleminin sonlu farklar yöntemi ile çözümlenerek bulunmuştur. Yüzeydeki pürüzleri gösteren sinüzoidal pürüzlerin mil eksenine paralel olması durumunda film kalınlığının genişleyen bölümünde oluşan kavitasyon bölgesi nedeniyle yüksek basınç bölümünden aksel yönde oluşan yağ kaçağı belirlenmiştir. Mil dönme yönünde oluşan kayma gerilmesi nedeniyle dudak üzerindeki mikro-ondülasyonlarda oluşacak deformasyon nedeniyle kanatçık şeklini alan pürüzlerde genişleyen film bölümünün de şekil değiştirmesi nedeniyle yüksek basınç bölümünden doğrudan dudağın yanına yağ kaçağı olmamaktadır. Yağ filminin genişleyen bölümünün temas genişliğinin yanlarına doğru ilerlemesi ile yüksek basınç oluşan bölümü ile dudağın yan tarafı arasında kavitasyon bölgesi oluşmakta ve bunun da yağ kaçağının azalmasına neden olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Salant, R.F., Flaherty, A.L., "Elastohydrodynamic Analysis of Reverse Pumping in Rotary Lip Seals with Microundulations", Trans. ASME, Jour. of Tribology, 1994, V.116, p.56-62.
- [2] Salant, R.F., Flaherty, A.L., "Elastohydrodynamic Analysis of Reverse Pumping in Rotary Lip Seals with Microasperities", Trans. ASME, Jour. of Tribology, 1995, V.117, p.53-59.
- [3] Salant, R.F., "Elastohydrodynamic Model of the Rotary Lip Seal", Trans. ASME, Jour. of Tribology, 1996, V.118, p.292-296.
- [4] Van Bavel, P.G.M., Ruiji, T.A.M., Van Leeuwen, H.J., Mujiderman, E.A., "Upstream Pumping of Radial Lip Seals by Tangentially Deforming, Rough Seal Surfaces", Trans. ASME, Jour. of Tribology, 1996, V.118, p.266-275.
- [5] Kim, C.K., Shim, W.J., "Analysis of Contact Force and Thermal Behaviour of Lip Seals", Tribology International, 1997, V.30, p.113-119
- [6] Shi, F., Salant, R.F., "A Mixed Soft Elastohydrodynamic Lubrication Model with Interasperity Cavitation and Surface Shear Deformation", Trans. ASME, Jour. of Tribology, 2000, V.122, p.308-316.
- [7] Shi, F., Salant, R.F., "Numerical Study of a Rotary Lip Seal with a Quasi-Random Sealing Surface", Trans. ASME, Jour. of Tribology, 2001, V.123, p.517-524.

ÖZGEÇMİŞ

Metin AKKÖK

1952 yılında Ankara’da doğdu. ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümünden 1973 yılında “Lisans”, 1976 yılında “Yüksek Lisans” derecelerini aldı. 1980 yılında Imperial College’den “Doktora” derecesini alarak ODTÜ Makina Mühendisliği bölümünde öğretim üyeliği görevine başladı. 1983 yılında “Doçent” ve 1989 yılında “Profesör” oldu. Rensselaer Polytechnic Institute’da triboloji konularında ziyaretçi öğretim üyesi olarak araştırmalar yaptı. ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümünde Makina Elemanları ve Triboloji konularında dersler vermekte mekanik sistemlerin tasarımı ve analizi, sürtünme konularında araştırmalar yapmaktadır. Hidrodinamik yağlama ve sürtünme konularında çok sayıda yayını vardır.