

## ARAŞTIRMA MAKALESİ/RESEARCH ARTICLE

# PTFE İÇERİKLİ KATKI MADDELERİ İLE SABİT YÜKLÜ KAYMALI YATAKLARDAKİ SÜRTÜNME KATSAYISININ AZALTILMASI

Ertuğrul DURAK<sup>1,2</sup>, Cahit KURBANOĞLU<sup>1,3</sup>, Aydın BIYIKLIOĞLU<sup>4</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, sabit yüklü radyal kaymalı yataklarda yükün, kayma hızının, ve yağa çeşitli oranlarda ilave edilen PTFE esaslı katkı maddelerinin yatakta oluşan sürtünmeye etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu tip yataklardaki sürtünme durumu teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Baz yağ için pratikte oldukça yaygın kullanılan Petroff, Vogelpohl gibi yaklaşık çözümlerle, teorik sürtünme katsayıları karşılaştırılmıştır. Söz konusu katkı maddesinin sürtünmeye etkisi; farklı yük ve kayma hızlarında deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca kullanılan katkı maddesinin optimum konsantrasyon oranı araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yağlama, Sürtünme, PTFE Esaslı Katkı Maddeleri.

## DECREASE IN COEFFICIENT OF FRICTION WITH PTFE ADDITIVES IN STEADILY LOADED JOURNAL BEARINGS

### ABSTRACT

In this work, study of the effects of normal load, sliding speed, PTFE based additives on the friction behaviour in steadily loaded journal bearings is aimed. Effects of states of friction in steadily loaded journal bearings are studied theoretically and experimentally. Additives with PTFE on friction in the journal bearings are investigated experimentally. Optimum concentration ratios of additives are also researched.

**Key Words:** Lubrication, Friction, PTFE Based Additives.

## 1. GİRİŞ

Yağlarda katkı maddesi ilk defa 1920'li yıllardan itibaren kullanılmaktadır. Günümüzde, yağların bütün tipleri bir veya birden fazla katkı maddesi içermektedir. Hidrodinamik yağlama bölgesinde (İçingür, 1988, Wills, 1980, Radom, 1990) sürtünmenin azaltılması için viskozite indeksini (VI) iyileştirici, yağın yüzeye yapışma kabiliyetini artırıcı, birbiriyle çalışan yüzeyleri artıklardan temizleyici deterjan ve dağıtıcı, köpük önleyici vb. katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bunlardan viskozite indeksini iyileştirici katkı maddeleri, uzun zincirli yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir. Bu tip

katkı maddeleri yağın düşük sıcaklıklardaki viskozitesi ni daha yüksek sıcaklıklarda da muhafaza etmesini sağlamaktadırlar.

Karışık ve sınır yağlama bölgelerindeki sürtünmenin düşürülmesi için, oluşturulan ince yağ tabakasının kopma mukavemetini artırmak ve/veya kayma mukavemetini de küçültmek gerekmektedir. Organik yağların yüzeye tutunma kabiliyetleri yüksek olduğundan mineral yağlarda katkı maddesi olarak belli oranlarda oldukça yaygın kullanılmaktadır. Sınır ve karışık yağlama şartları altında, katkı maddesinin konsantrasyonunun artmasıyla sürtünme katsayısı azalmaktadır.

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta.

<sup>2</sup> E-posta: edurak@mmf.sdu.edu.tr.

<sup>3</sup> E-posta: kurban@mmf.sdu.edu.tr.

<sup>4</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon.

**Geliş:** 04 Temmuz 2000; **Düzeltilme:** 20 Ekim 2000, 12 Şubat 2001; **Kabul:** 09 Nisan 2001.

Sürtünmeyi azaltan katkı maddeleri (Radom, 1990) yağ filminin mukavemetini artıran kimyasal maddelerdir. Katkı maddeleri genellikle O<sub>2</sub>, Ni, S, Mo, Cu ve diğer elementleri içermektedir. Bu katkı maddeleri genellikle fiziksel adsorbsiyonla yağ filmi mukavemetini artırmak suretiyle sürtünmeyi azaltmaktadır. Sürtünmeyi azaltan katkı maddeli motor yağlarının (Tung vd., 1987), aşınma ve sürtünmeyi nasıl azalttıkları, katkı maddesi ile baz yağ arasında nasıl bir etkileşimin meydana geldiği incelenmiştir. Yapılan deneylerde sürtünmeyi azaltan katkı maddelerinin verimliliği, yağ ve katkı karışımının yapısına, sıcaklığa, temas geometrisine, temas yüküne, test frekansına ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu, ayrıca sürtünmeyi azaltan katkı maddelerinin aşınmanın azaltılmasında da başarılı oldukları gözlemlenmiştir.

Fullerene adıyla (Gupta ve Bhushan, 1994) sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan sıvı ve gres yağlar için yeni bir katkı maddesi geliştirilmiştir. Deneysel sonuçları; katkı maddesi olarak grafit ve MoS<sub>2</sub> içeren yağ karışımları ile elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Katkı maddelerinin sürtünmeyi % 20 oranında azalttığı deneylerle tespit edilmiştir. Ayrıca, oluşan yağ filmi üzerinde küçük katkı maddesi partiküllerin birer küçük kürecik gibi yuvarlanarak sürtünmeyi azalttığı tespit edilmiştir.

Baoyu vd. (1996) tarafından yağlama yağının ve katkı maddelerinin yorulma ömrüne etkisi deneysel olarak incelenmiş ve PTFE tozu içeren yağ karışımında, katkı maddesi konsantrasyon oranının artmasıyla yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, sabit yüklü radyal kaymalı yataklarda katkı maddesinin sürtünmeye etkisi; iki yük örneğinde ve farklı kayma hızlarında deneysel olarak incelenerek kullanılan katkı maddesinin optimum konsantrasyon oranı araştırılmıştır.

## 2. SEMBOLLER

- B : Yatak genişliği [mm]  
 C : Yatak boşluğu [mm]  
 d : Mil çapı [mm]  
 D : Yatak çapı [mm]  
 e : Eksantriklik miktarı [mm]  
 F : Yatağa uygulanan yük [N]  
 F<sub>s</sub> : Sınır filmin taşıdığı yük [N]  
 F<sub>f</sub> : Hidrodinamik filmin taşıdığı yük [N]  
 F<sub>g</sub> : Geçiş noktasındaki filmin taşıdığı yük [N]  
 F<sub>s</sub> : Sürtünme kuvveti [N]

- F<sub>y</sub> : Uzama çubuğunu eğmeye zorlayan kuvvet [N]  
 k : Geçiş katsayısı (Normal işletme durumu için k=1)  
 n : Hız (devir/dakika) [d/d]  
 n<sub>kr</sub> : Kritik hız [d/d]  
 P<sub>ort</sub> : Yatak ortalama basıncı [N/mm<sup>2</sup>]  
 R : Yatak yarıçapı [mm]  
 r : Mil yarıçapı [mm]  
 S : Alman literatüründe kullanılan Sommerfeld sayısı  
 S<sub>g</sub> : Geçiş (kritik) hızındaki Sommerfeld sayısı  
 S<sub>o</sub> : Sommerfeld sayısı  
 Y : Moment ölçüm levhasının yatak merkezine olan mesafesi [mm]  
 z : Eksenel koordinat  
 β : Eksantrisite çizgisi ile yatağın düşey eksenindeki açı  
 ε : Eksantrisite oranı  
 η : Dinamik viskozite [Pa.s]  
 φ : Yatağın çevresel açısı  
 μ : Sürtünme katsayısı  
 μ<sub>f</sub> : Sıvı film sürtünme katsayısı  
 μ<sub>g</sub> : Geçiş hızındaki sürtünme katsayısı  
 μ<sub>k</sub> : Karışık sürtünme katsayısı  
 μ<sub>s</sub> : Sınır film sürtünme katsayısı  
 τ : Kayma gerilmesi [N/mm<sup>2</sup>]  
 ω : Milin açısal hızı (1/s)  
 ψ : Rölatif yatak boşluğu

## 3. KAYMALI YATAKLARDAKİ SÜRTÜNMENİN TEORİK İNCELENMESİ

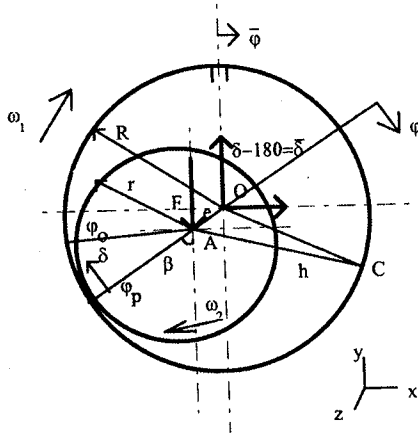
Silindirik bir radyal kaymalı yatağın geometrisi Şekil 1.'de verilmiştir. Radyal kaymalı yatakta hidrodinamik yağlama bölgesinde sürtünme kuvveti (Cameron, 1966, Lang ve Steinhilper, 1978);

$$F_s = \int_{-B/2}^{B/2} \int_0^{2\pi} \tau R d\phi dz \quad (1)$$

şeklinde dir.

Sommerfeld sayısı S<sub>o</sub>,

$$S_o = \frac{\eta n}{P_{ort} \psi^2} \quad (2)$$



Şekil 1. Yatak Geometrisi.

şeklindedir. Genellikle Alman literatüründe Sommerfeld sayısı  $n = \omega / 2\pi$  eşitliği kullanılarak aşağıdaki formda kullanılmaktadır (Akkurt, 1980). Yani  $S = 1/(2\pi S_0)$  şeklindedir. Sommerfeld sayısı S,

$$S = \frac{P_{ort} \psi^2}{\eta \omega} = \frac{F \psi^2}{BD \eta \omega} \quad (3)$$

dir. Sunulan çalışmada bu literatürdeki tablolardan yararlanıldığı için Sommerfeld sayısı olarak denklem (3) 'te tanımlanan (S) formül kullanılmıştır. Rölatif sürtünme parametresi ve sürtünme katsayısı (Lang ve Steinhilper, 1978);

$$\frac{\mu}{\psi} = \frac{\epsilon}{2} \sin \beta + \frac{\pi}{S \sqrt{1 - \epsilon^2}}$$

ve

$$\mu = \psi \left( \frac{\epsilon \sin \beta}{2} + \frac{\pi}{S \sqrt{1 - \epsilon^2}} \right) \quad (4)$$

şeklindedir. Vogelpohl tarafından (Lang ve Steinhilper, 1978) sunulan ve pratikte sık kullanılan ampirik rölatif sürtünme parametresi;

$$S > 1 \Rightarrow \frac{\mu}{\psi} = \frac{\pi}{\sqrt{S}} \quad S < 1 \Rightarrow \frac{\mu}{\psi} = \frac{\pi}{S} \quad (5)$$

şeklindedir.

Düşük yüklerde ve yüksek hızlarda geçerli olan Petroff eşitliği (Cameron, 1966, Lang ve Steinhilper, 1978, Hamrock, 1994) ise;

$$\frac{\mu}{\psi} = \frac{\pi}{\psi^2} \left( \frac{\omega \eta}{P_{ort}} \right) \quad (6)$$

şeklindedir.

Vogelpohl, karışık yağlama bölgesi bitimi, hidro-dinamik yağlama bölgesi başlangıcı olan kritik devir sayısını (Lang ve Steinhilper, 1978, Bıyıklıoğlu, 1987),

$$n_{kr} = \frac{F}{\eta k \left( \frac{\pi D^2}{4} B \right)} 10^{-5} \quad (7)$$

şeklinde tarif etmiştir. Yatağın normal şartlarda emniyetli olarak çalışması için işletme hızının  $n_{kr}$  hızından daima büyük olması gerekmektedir.

Karışık yağlama bölgesinde sürtünme katsayısı ( $\mu_k$ ) (Kaneko ve Hashimoto, 1995), sınır film sürtünmesi ( $\mu_s$ ) ve hidrodinamik film sürtünmesinin ( $\mu_f$ ) toplamına eşittir.

$$\mu_k = X_s \mu_s + X_f \mu_f \quad (8)$$

Burada  $X_s = F_s / F$ ,  $X_f = F_f / F$  ve yatağın taşıdığı toplam yük  $F = F_s + F_f$  olduğundan,

$$X_s + X_f = 1 \quad (9)$$

$$\mu_k = (1 - X_f) \mu_s + X_f \mu_f \quad (10)$$

şeklinde elde edilmektedir. Sınır film sürtünme katsayısı 0.1 - 0.3 arasında verilmektedir (Lang ve Steinhilper, 1978, Durak, 1998). Bu çalışmada  $\mu_s = 0.1$  seçilmiştir.  $\mu_f$  değerinin tayini için, ilk önce her bir hız ve yük için Sommerfeld sayıları (S) belirlenmiştir. Daha sonra sonlu genişlikteki yatak için Reynolds Denkleminin çözümünden elde edilen literatürdeki tablolardan (Lang ve Steinhilper, 1978, Butenschön, 1976, Durak, 1998) bu Sommerfeld Sayılarına (S) ve genişlik / çap (B/D) oranına göre eksantrisite oranları ( $\epsilon$ ) ve rölatif sürtünme parametreleri ( $\mu_f / \psi$ ) belirlenmiştir. Teorik hesaplar da, sınır ve/veya karışık yağlama bölgesindeki sürtünme katsayılarını görebilmek için  $n = 1 \text{ d/d} - 1200 \text{ d/d}$  hız aralığı seçilmiştir. Küçük hızlarda Sommerfeld Sayısı (S) büyük değerler almaktadır. Bu büyük S değerlerinde sınır filmin taşıdığı yükün ( $F_s$ ) değeri toplam yatak yüküne (F) yaklaştıkça sınır film ağırlık kazanmaktadır. Kaneko ve Hashimoto (1995), hidrodinamik bölge bitimi ve karışık bölgenin başlangıcındaki geçiş noktasında  $S = S_g$ ,  $F_g = F_f$  ve  $\mu_g = \mu_f$  şeklinde bir yaklaşımda bulunmuştur. Sonuç olarak da karışık yağlama bölgesindeki sürtünme katsayısı;

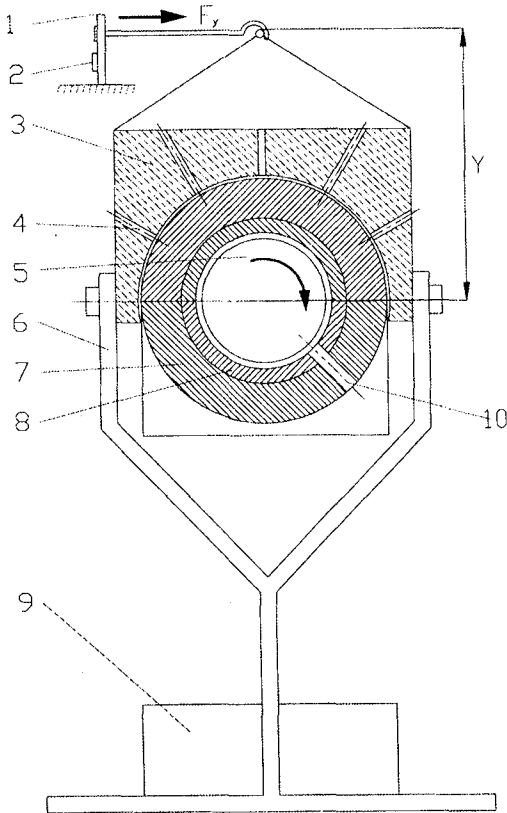
$$\mu_k = \left( 1 - \frac{S_g}{S} \right) \mu_s + \left( \frac{S_g}{S} \right) \mu_f \quad (11)$$

şeklinde elde edilmiştir. Teorik çalışmada her iki yük için kritik hızlar (7) numaralı denklemle hesaplanmıştır. Kritik hızdan küçük hızlar için karışık yağlama bölgesindeki sürtünme katsayısı (11) numaralı denklem ile, kritik hızdan büyük hızlar için ise hidrodinamik yağlama bölgesindeki sürtünme katsayısı (4) numaralı denklem ile hesap edilmiştir. Sürtünme katsayısı için pratik hesaplamalarda ise Vogelpohl için (5) numaralı denklem, Petroff için ise (6) numaralı denklem kullanılmıştır.

#### 4. DENEY DÜZENEGİ

Bu çalışmada, sabit yüklü radyal kaymalı yataklarda, uygulanan yükün, mil hızının, yatak boşluğunun, yağın ve yağa çeşitli oranlarda ilave edilen katkı maddelerinin yatakta oluşan sürtünmeye etkisi ve sürtünme durumları deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan deney düzeneğinin (G. Cussons Ltd., Handbook of 5013 Hydrodynamic Lubrication Unit, İngiltere, 1980) şematik resmi Şekil 2.'de verilmiştir (Çuvalcı, 1996).

Söz konusu deney düzeneği, basınçlı yağlama sistemi, hız kontrol ünitesi, moment ölçme devresi, kaymalı yatak yuvası, yatak mili, hidrostatik yastık, DC motoru ve yük askısı gibi elemanlardan oluşmaktadır. Yatak yuvası dökme demirden imal edilmiş olup, ince cidarlı kaymalı yatak burcunun yerleştirilmesi için yatak deliği hassas bir şekilde honlanmıştır. İki parçalı olarak imal edilmiş olan yatak yuvası, mil ile yatak arasında oluşan sürtünme kuvvetinin etkisiyle serbestçe dönebilecek şekilde hidrostatik yataklarla desteklenmiştir. Yatağın yüklenmesi, yatak yuvası üzerindeki honlanmış yüzeye oturan hidrostatik yastığa bağlı yük askı koluna ağırlık asılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Hidrostatik yastık, yatak yuvasının serbestçe dönmeye izin vermekte ve yuvanın hareketi sırasında, yükün radyal olarak yuvaya iletilmesini sağlamaktadır. Bunun için hidrostatik yastık ile yatak yuvası arasında-



Şekil 2. Deney Düzeneği.

ki oturma yüzeylerine sürekli olarak 8 bar'lık basınçta yağ gönderilmiştir. Uygulanan yük, bu basınçlı yağ vasıtasıyla yük yastığından deney yatak zarflarının bulunduğu yatak yuvasına iletilmektedir. Sistemde yağ debisi ise 4 litre / saat olarak seçilmiştir.

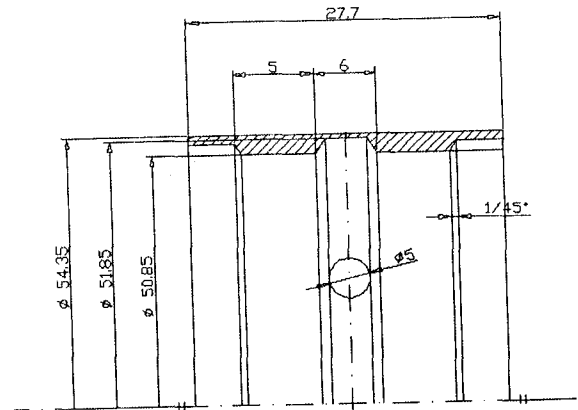
Deney milleri, C105 W1 (SAE W1) soğuk iş takım çeliğinden imal edilerek, 800 VSD değerine kadar sertleştirilmiştir. Deney milinin çapı 50.76 mm'dir. Rölâtif yatak boşluğu ( $\psi$ )  $1.77 \cdot 10^{-3}$ ' dir. Milin yüzey pürüzlüğü  $5 \mu\text{m}$ , yatağın yüzey pürüzlüğü ise  $9 \mu\text{m}$ 'dir. Deney mili iki adet yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiştir. Test milinin devir sayısı, doğru akım hız kontrol ünitesi vasıtasıyla ancak 30 - 1200 d/d aralığında ayarlanabilmektedir. Cihaz üzerindeki ibrelî göstergeden devir sayısı okunmaktadır. Bu düzenekteki test yatağının yağlama işlemi, yatak zarfının alt kısmındaki delikten düşük basınçla (0.1 bar) gönderilen yağ vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kaymalı yatak ve yükün asıldığı hidrostatik yastıktan sızan yağ, toplama tablası vasıtasıyla yağ tankına gönderilmekte ve toplanan yağ, tekrar bir pompa vasıtasıyla sisteme verilerek yağın sürekli sirkülasyonu sağlanmaktadır.

#### 4.1. Test Yatağının Özellikleri

Deneylerde kullanılan kaymalı yataklar ZnAl esaslı alaşımlıdır. Talaşlı imal edilen ince cidarlı yatağın şekli ve ölçüleri Şekil 3.'de verilmiştir. Test yatağında 5 mm genişliğinde çevresel bir yağ kanalı mevcuttur.

#### 4.2. Deneylerde Kullanılan Yağ ve Katkı Maddesinin Özellikleri

Dupont Firması, düz molekül zincirli, kısaca PTFE olarak adlandırılan "Polytetrafluoroethylene"ni keşif edip, geliştirmiştir. Kimyasal formülü  $[\text{C}_2\text{F}_4]\text{N}$ 'dir. Ticari ismi Teflon'dur. PTFE doymuş alifatik fluorokarbon'dur. Hemen hemen tümüyle inerttir. PTFE düşük



Şekil 3. Test Yatağı Boyutları.

Tablo 1. Baz Yağ ve PTFE İçerikli Katkı Madde İleveli Yağ Karışımın Özellikleri.

Spesifik yoğunluk (27 °C)	0.858
Akma noktası(°C)	-30
Baz yağın dinamik viskozite (mPa.s)(22°C)	83
Baz yağın dinamik viskozite (mPa.s)(27°C)	62.7
Baz yağın dinamik viskozite (mPa.s)(30°C)	50
Viskozite İndeksi (VI)	175
Baz Yağ + %10 Katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozitesi (mPa.s) (22°C)	87
Baz Yağ + %10 Katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozitesi (mPa.s) (27°C)	63.5
Baz Yağ + %10 Katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozitesi (mPa.s) (30°C)	54
Baz Yağ + %15 Katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozitesi (mPa.s) (22°C)	91.2
Baz Yağ + %15 Katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozitesi (mPa.s) (27°C)	69.6
Baz Yağ + %15 Katkı madde ilaveli karışımın dinamik viskozitesi (mPa.s)(30°C)	60.92
Baz Yağ + %15 Katkı madde ilaveli karışımın spesifik yoğunluğu (27°C)	0.862

yüzey enerjisine sahip bir malzemedir. PTFE, endüstride 250°C sıcaklığın altında asitlerden, bazlardan ve çözücülerden normalde etkilenmemektedir. Gamma radyasyonu PTFE'nin dayanımını, X ışınları da dielektriğini etkilemektedir. Dispersiyon polimerizasyon ile üretilen PTFE partikülleri yaklaşık 0.5mm büyüklüğe sahiptirler. Daha sonra bu büyüklükteki PTFE partikülleri taneli polimerizasyon metodu ile mikron mertebesine küçültülmektedir. Küçültülmüş bu PTFE partikülleri yaklaşık 425°C'de eritilmektedir (Anonim, 2000).

PTFE içerikli yağ katkı maddelerinin yağlama mekanizması ise, metal yüzeylere yapışarak kayıcı bir yüzey oluşturmaktır. PTFE içerikli yağ ile yağlanmış iki yüzeyde kayma esnasında lokalize olmuş ısı, pürüz tepelerinde kimyasal reaksiyon oluşturmaktadır. Bu kimyasal reaksiyonlar da yüzey metalurjisini değiştirmektedir. Böylece mikroskobik yüzey seviyesi daha düşük olmakta ve yüzeylerde sürtünme ve aşınma özellikleri iyileştirilebilmektedir.

PTFE içerikli yağ katkı maddeleri genellikle beş bileşimden oluşmaktadır:

1. Modife edilmiş ve elektriklenmiş mikroskobik PTFE partikülleri. Bu partiküllerin büyüklükleri üretici firmalara göre farklılık gösterebilmektedir. Piyasadaki yağ katkı maddelerindeki PTFE partiküllerin boyutları 2-3 µm'e kadar inebilmektedir. Deneylerimizde kullandığımız üründe ise PTFE partikülleri 5 µm'yi geçmemektedir.

2. Taşıyıcı yağ olarak ise çok dereceli kalitedeki bir motor yağı kullanılmaktadır. A.B.D.'de 10W-30 viskozite dereceli yağlar kullanılırken, İngiltere'de daha yüksek motor hızlarının sebep olduğu yüksek motor sıcaklıklarında motor yağının daha az buharlaşmasını sağlamak için 15W-40 dereceli yağlar tercih edilmektedir.

3. Taşıyıcı yağda PTFE 'yi süspansiyon halinde tutmak için bir dispersant katığı.

4. Metal yüzeylere PTFE 'nin bağlanmasına yardımcı olacak kimyasal maddeler.

5. PTFE partikülleri ve metal yüzeyleri arasındaki etkileşime yardımcı olan proses destekleyici kimyasal maddeler (Wilson, 1995).

Deneylerde kullanılan baz yağ ve katkı madde ilaveli yağ karışımının özellikleri Tablo 1.'de verilmiştir. Ticari olarak satılmakta olan motor yağ katkı maddesi, içerisinde mikronlaştırılmış tane boyutundaki pozitif elektrik yüklü PTFE parçacıkları bulunduran sıvı bir yağdır. Motor yağ katkı maddesi içerisindeki PTFE parçacıkları 5 µm'den daha küçük boyutlara sahiptirler. Pozitif elektrik yüklü bu parçacıklar yüzeylere yapışmaktadır. Yüzeylerde bu katkı maddesi kayganlaştırıcı bir film tabakası oluşturmaktadır. Gerçekleşen bu film tabakası sayesinde sürtünme ve aşınma minimum olmaktadır (Anonim, 1997).

Şekil 2.'de yatak yuvasını (7) döndürmeye zorlayan kuvvet ( $F_y$ ) ve sürtünme moment ölçüm levhasının (1) yatak merkezine olan mesafesi  $Y$ , sürtünme kuvveti  $F_s$  ve mil yarıçapı  $r$  ise,

$$F_y \cdot Y = F_s \cdot r \quad (12)$$

yazmak mümkündür. Sürtünme katsayısı, sürtünme kuvvetinin normal kuvvete yani yatak yüküne oranı olduğundan;

$$\mu = \frac{F_s}{F} \quad (13)$$

dir.

## 5. DENEYLERİN YAPILIŞI

Alaşımlı ince cidarlı yataklar önce, yatak gövdesine kayar geçme olarak monte edilmiştir. Daha sonra yatak yuvası üzerindeki saplamalar sıkılarak, yatak yuvası tespit edilmiştir. Test yatağının orta kısmında yağın iyice dağılmasını sağlayan çevresel bir yağ kanalı bulunmaktadır. Yağın yatağı terk ettiği bölgede yağ sıcak-

lığı deney süresince bir termometre ile ölçülmüş ve yağ deposuna yerleştirilen bir soğutma aparatı ile deneylerin 26 - 28 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmesine özen gösterilmiştir.

Sürtünme momenti, uzama ölçerlerden kurulan Wheatstone köprüsü devresinden yararlanılarak ölçülmüştür. Bunun için 5x50x2 mm boyutlarındaki yay çeliğinden imal edilen ölçüm levhasının alt ve üst yüzeylerine iki adet strain gauge yapııştırılmıştır. Tam Wheatstone köprü oluşturmak için iki adet strain gauge de pasif olarak devreye bağlanmıştır.

Test yatağına gönderilen yağın besleme basıncı 0.1 bar'a ayarlanmıştır. Yatak yuvasının serbestçe dönmesini sağlamak ve sürtünme kuvvetini mümkün olduğunca doğru ölçmek için, yatak yuvası ile yük yastığı birbirinden ayırmak gerekmektedir. Bunu sağlamak içinde bu iki parça arasında hidrostatik bir yağ filmi oluşturulmuştur. Buradaki hidrostatik yastık yağ basıncı ise 8 bar'a ayarlanmıştır. Milin devir sayısı 30 d/d'dan (0.079 m/s) başlayarak, kademeli olarak 1200 d/d'ya (3.15 m/s) kadar artırılmıştır. Oluşan sürtünme momentine ait sinyaller kaydedilerek, daha önceden elde edilen kalibrasyon doğrusu yardımı ile alınan bu sinyal değerleri sürtünme momentine çevrilmiştir.

Deneylere başlarken mili tahrik etmeden önce test yatağına ve yükü taşıyan yük yastığına yağ gönderilmiştir. Böylece yatak yuvası ile yük yastığı arasındaki metalik temas önlenmiştir. Ayrıca mil ile yatak yüzeyi arasında da bir yağ filmi oluşturulmuştur. Böylece tahrik başlangıcındaki ve/veya bitimindeki büyük aşınmalar önlenmiştir. Ayrıca deney setine monte edilen elektrik devresi ile test süresince, test yatağı ile mil arasında ve yatak yuvası ile yük yastığı arasında herhangi bir metalik temasın olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Yatakta oluşan ortalama basıncın sürtünme katsayısına etkisini belirlemek (*Stribeck basıncı kullanılarak dolaylı olarak*) için, yatak boşluğu sabit tutularak 153 N ve 253 N (yatak gövdesinin ağırlığı dahil olmak üzere) iki yük büyüklüğünde sürtünme deneyleri yapılmıştır.

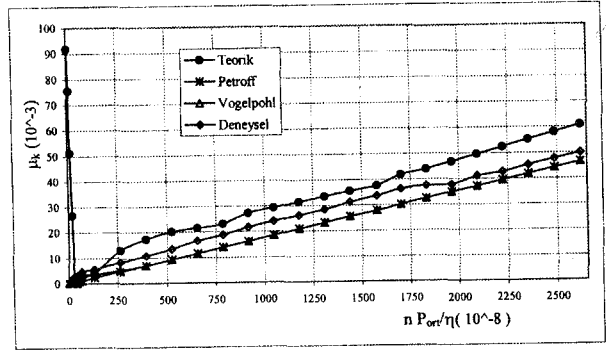
Sunulan çalışmada teorik hesaplarda,  $F=153$  N yatak yükünde  $n_{kr} \cong 12.015$  d/d,  $S_g=11.98$  ve  $F=253$  N için ise  $n_{kr} \cong 19.869$  d/d,  $S_g = 11.98$  olarak hesap edilmiştir. Deneylerde yağın yatak içerisindeki sıcaklığı ölçülemediği için teorik hesaplarda yağ çıkış sıcaklığı kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi yağ çıkış sıcaklıkları 26-28 °C arasında ölçülmüştür. Teorik hesaplarda 27 °C'deki baz yağın viskozite değeri ( $\eta=62.7$  mPa.s) alınmıştır. Baz yağ için 4,5,6 ve 11 numaralı eşitlikler ile elde edilen teorik sonuçlar Şekil 4.ve Şekil 5.'de verilmiştir.

Deneylere önce referans baz yağı ile başlanılmıştır. Her iki yük örneği için çeşitli hız aralıklarında sürtünme katsayıları ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra piyasa-

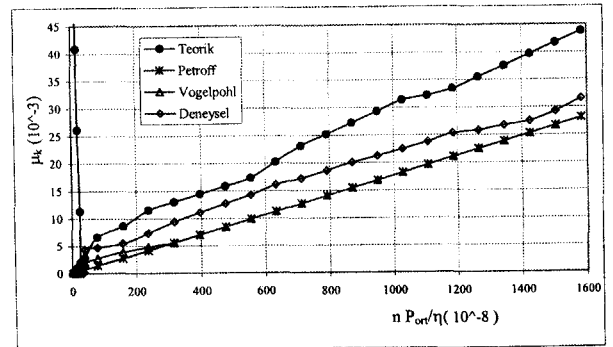
dan temin edilen PTFE içerikli ticari katkı maddesi ile deneyler tekrar edilmiştir. İlk olarak baz yağına katkı maddesinden hacimce % 1 oranında ilave edilmiştir. Önceki deneyler, katkı madde karışımı yağla her bir yükte aynı hız aralıklarında tekrar edilmiştir. Daha sonra yağa ilave edilen katkı maddesi oranı hacimce % 3, 5, 10 ve 15'e çıkartılarak aynı hız ve yükler için deneyler tekrarlanmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Şekil 6. ve Şekil 7.'de eğriler halinde verilmiştir.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

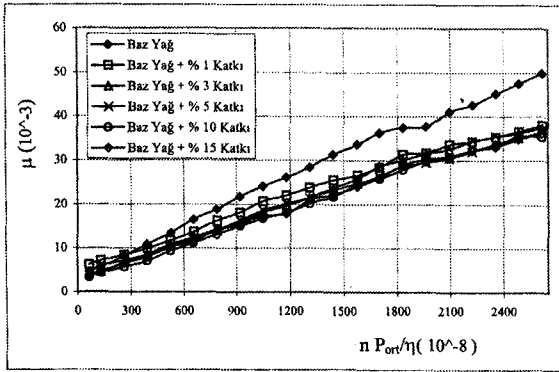
Petroff ve Vogelpohl 'e göre elde edilen sürtünme katsayıları ile Denklem (4)'den elde edilen sonuçlar arasında küçük sapmalar mevcuttur.  $F = 153$  N ve  $F = 253$  N için baz yağ için elde edilen deneysel sürtünme katsayıları, Petroff ve Vogelpohl eşitlikleri ile Denklem (4) 'den elde edilen teorik sonuçlar arasındaki değerlerde çıkmıştır. Hidrodinamik yağlama bölgesinde hem teorik hesaplamada, hem de deney sonuçlarında hız artarken sürtünme katsayısı artmakta, yük artarken ise sürtünme



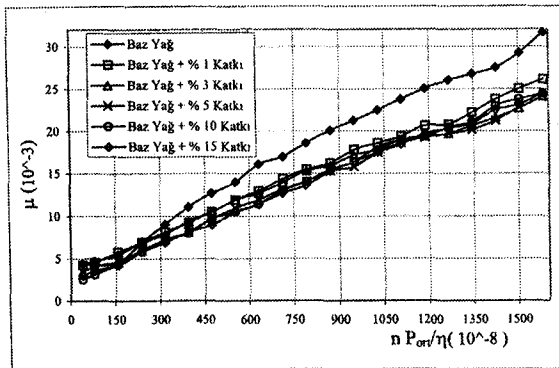
Şekil 4. F = 153 N Yükte Baz Yağ İçin Teorik ve Deneysel Stribeck Eğrileri.



Şekil 5. F = 253 N Yükte Baz Yağ İçin Teorik ve Deneysel Stribeck Eğrileri.



Şekil 6. F = 153 N Yükte Baz Yağ ve Katkı Madde İlaveli Yağ İçin Deneysel Stribeck Eğrileri.



Şekil 7. F = 253 N Yükte Baz Yağ ve Katkı Madde İlaveli Yağ İçin Deneysel Stribeck Eğrileri.

katsayısı azalmakta olup literatürdeki çalışmalarla uyum sağlamaktadır. İzoterm kabulü ile deneyler 26 – 28°C 'de yapıldığı için Petroff ve Vogelpohl eşitlikleri ile Denklem (4) 'den elde edilen teorik hesaplarda 27 °C'deki yağın viskozite değeri ( $\eta=62.7$  mPa.s) sabit alınmıştır.

F = 153 N sabit yükte farklı hızlarda elde edilen ve Şekil 6.'da Stribeck eğrileri verilen PTFE içerikli yağ karışımlarında elde edilen sürtünme katsayıları, baz yağı ile elde edilen sürtünme katsayılarına göre değişimleri Tablo 2.'de, F = 253 N yük için ise Tablo 3.'de verilmiştir. Bu tabloda ayrıca sürtünme katsayılarındaki en fazla düşüşlerin hangi mil hızlarında gerçekleştiği de verilmiştir. Son olarak da her bir konsantrasyon oranında, tüm mil hızlarındaki sürtünme katsayılarındaki değişimlerin (düşüş-artış) aritmetik ortalaması alınarak o konsantrasyon oranı için ortalama değişimler de Tablo 2. ve Tablo 3.'de verilmiştir.

F = 153 N için her bir konsantrasyon oranının sürtünme katsayısındaki değişikliklerin ortalaması alındığında (Şekil 6., Tablo 2.), sürtünme katsayısında en fazla % 28.35'lik bir düşüş %10 konsantrasyon oranında, F = 253 N için (Şekil 7., Tablo 3.) ise en fazla % 23.8 'lik bir düşüş % 15 konsantrasyon oranında, % 23.62 lik bir düşüş ise % 10'luk konsantrasyon oranına sahip yağ örneğinde tespit edilmiştir. Hidrodinamik yağlamanın gerçek-

Tablo 2. F = 153 N Sabit Yükte Sürtünme Katsayılarındaki Değişim Miktarları.

	%1	%3	%5	%10	%15
Sürtünme katsayısındaki maksimum düşüş oranı (%)	23.57	24.85	26.42	35.7	31.68
Maksimum düşüşün gerçekleştiği mil hızı (d/d)	1200	1200	1200	180	540
Sürtünme katsayısındaki minimum düşüş veya artış oranı (%)	-33	10.99	-4.57	22.72	18.13
Minimum düşüşün gerçekleştiği mil hızı (d/d)	30	30	60	60	60
Tüm hızlardaki sürtünme katsayılarındaki düşüşlerin ortalaması (%)	11.9	21.63	21.74	28.35	25.79

Tablo 3. F = 253 N Sabit Yükte Sürtünme Katsayılarındaki Değişim Miktarları.

	% 1	% 3	% 5	% 10	% 15
Sürtünme katsayısındaki maksimum düşüş oranı (%)	20.03	24.26	26.78	42.72	32.03
Maksimum düşüşün gerçekleştiği mil hızı (d/d)	960	960	300	30	30
Sürtünme katsayısındaki minimum düşüş veya artış oranı (%)	5.66	4	13.24	17.42	17.42
Minimum düşüşün gerçekleştiği mil hızı (d/d)	120	180	60	180	180
Tüm hızlardaki sürtünme katsayılarındaki düşüşlerin ortalaması (%)	13.14	18.68	22.12	23.62	23.81

leştiği yüksek hız bölgesinde düşük konsantrasyon oranlarında (% 1, 3, 5) sürtünme katsayısında büyük düşüşler sağlanmıştır. Daha büyük konsantrasyon oranlarında ise (% 10, 15) özellikle karışık yağlama bölgesinin bitimi hidrodinamik bölgenin başlangıcı olan düşük hızlardaki sürtünme katsayılarında büyük azalmalar gerçekleşmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada genellikle katkı maddelerinin ilavesiyle sürtünme durumunda bir iyileşme olduğu görülmüştür. Uzun ve düz molekül zincirli malzemeler, kısa ve dallı molekül zincirli malzemelerden daha iyi sürtünmeyi modife etme kabiliyetine sahiptir (Rizvi, 1992). PTFE de uzun ve düz molekül zincirli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle PTFE içerikli katkı maddesinin konsantrasyon oranının artması ile sürtünme katsayısında bir düşüş tespit edilmiştir. Fakat bu düşüş belli bir orana kadar (% 10) devam ettiği tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki bu düşüşün devam etmemesinin bir nedeni, baz yağı rafine işlemi sırasında katılan diğer katkı maddeleri ile etkileşimi olabilmektedir. Sürtünme katsayılarındaki düşüş yüksek hızlarda daha fazla olduğu görülmüştür. Çalışmada iki yük için deney yapılmış olmasına rağmen, düşük yüklerde katkı maddesinin etkisi daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ticari olarak satılan ve deneylerde kullanılan PTFE içerikli katkı maddesinin konsantrasyon oranı % 12.5 olarak etiketinde ve katalogunda belirtilmektedir. Yapılan deneylerde, sürtünme katsayısını en etkin bir şekilde azaltabilecek konsantrasyon oranının % 10 olduğu görülmüştür.

## 7. SONUÇLAR

Elde edilen deney sonuçları ile teorik sonuçlar genel olarak bir uyum içerisinde. Hem teorik sonuçlarda hem de yapılan deneysel incelemelerde hidrodinamik yağlama bölgesinde, yataktaki ortalama basıncın artması ile sürtünme katsayısı azalmakta, sabit yatak basıncında ise hızın artmasıyla artmaktadır.

PTFE içerikli katkı maddesinin yağa çok düşük oranlarda ilave edilmesiyle sürtünme şartlarında oldukça iyileşmeler sağlanmıştır. Yağa ilave edilen polimer esaslı katkı maddeleri çalışma esnasında, her iki yüzeye ayrı ayrı adsorblanmaktadır. Hız düşük olduğu zaman, yüzeyler arasındaki yağ filmi kalınlığı çok küçük olmakta ve yüzeyler birbirine yaklaşmaktadır. Bu küçük aralıkta çoğunluğunu polimer esaslı katkı maddelerinin oluşturduğu daha viskoz bir tabaka oluşmaktadır. Bu nedenle sürtünme katsayısı yüksek değerdedir. Hız artırıldığında ise yüzeylerine polimer adsorblanmış bu iki yüzey birbirinden uzaklaşacak ve iki yüzey arasında çoğunluğu baz yağın oluşturduğu daha düşük viskozlu bir yağ filmi oluşmaktadır. Bu ise daha düşük sürtünme katsayısı vermektedir (Gunsel vd., 1996). Bu nedenle de yapılan deneylerde söz konusu katkı maddesinin kullanılmasında, hız arttıkça sürtünmedeki iyileşme miktarı da artmıştır. Hidrodinamik yağlamanın gerçekleştiği yüksek hızlarda düşük konsantrasyon oranlarında (% 1, 3, 5) sürtünmede büyük azalmalar sağlanmıştır. Büyük konsantrasyon oranlarında ise (% 10, 15) özellikle karışık yağlama bölgesinin bitimi ve hidrodinamik yağlama bölgesinin başlangıcı olan düşük hızlardaki sürtünmeler de büyük azalmalar gerçekleşmiştir. PTFE içerikli katkı maddesi ilaveli yağlarla yapılan deneylerde sürtünme katsayısındaki en fazla düşüş  $F = 153 \text{ N}$  için % 10 konsantrasyon oranında  $n=180 \text{ d/d'da}$  %35.70,  $F=253 \text{ N}$  ise % 10 konsantrasyon oranında  $n = 30 \text{ d/d'da}$  %42.72 oranında gerçekleşmiştir.

Yağa ilave edilen PTFE içerikli katkı maddesi ile sürtünmenin en fazla azaltılması için optimum konsantrasyon oranının % 10 olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

## KAYNAKÇA

Akkurt, M. (1980). *Makina Elemanları*. Cilt III, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Anonim (1997). *Motor Silk Tanıtım Kataloğu*, Ankara.

Anonim (2000). *Technacal Information*, 1-4, Dynamic Coating, Inc, A.B.D.

Baoyu, S., Lion, W. ve Yulin, Q. (1996). Effect of the Two-Phase Liquid Lubricant on Fatigue Life. *Wear*, 201, 94-98.

Bıyıklıoğlu, A. (1987). *Makina Elemanları Ders Notları*. K.T.Ü. Trabzon.

Butenschön, H.J. (1976). *Das Hydrodynamische Radialgleitlager Endlicher Breite Unter Insatationärer Belastung*, Diss. Karlsruhe.

Cameron, A. (1966). *The Principles Of Lubrication*. Longmans Green & Co. Ltd., NewYork.

Çuvalcı, H. (1996). *Çinko - Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. K. T. Ü. Fen Bil. Ens. Doktora Tezi, Yayınlanmamış, Trabzon.

Durak, E. (1998). *Farklı Yükleme Şekillerinde Yağ ve Yağ Katkı Maddelerinin Yatak Performansına Etkileri*. S.D.Ü. Fen Bil. Enstitüsü, Doktora Tezi, Yayınlanmamış, Isparta.

Gunsel, S., Smeeth, M. ve Spikes, H., (1996) Friction and Wear Reduction by Boundary Film-Forming Viscosity Index Improvers, *SAE Technical Paper Series*, 962037, 85-109.

Gupta, B.K. ve Bhushan, B. (1994). Fullerene Particles As an Additive To Liquid Lubricants and Greases For Low Friction and Wear. *Journal Of The Society Of Tribologists And Lubrication Engineers, Lubrication Engineering*, 50(7), 524-528.

Hamrock, B.J. (1994). *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill Inc., New York.

İçingür, Y. (1988). *Motorlarda Yağ Karakteristiklerini Güçlendiren Katkılar*. G. Ü. Fen Bil.Enst., Yüksek Lisans Tezi, Yayınlanmamış, Ankara.

Kaneko, S. ve Hashimoto, Y. (1995). A study of the Mechanism of Lubrication in Porous Journal Bearings: Effect of Dimensionless Oil-Feed Pressure on Frictional Characteristic. *Journal of Tribology*, 117, 291-296.

Lang, O.R. ve Steinhilper, W. (1978). *Gleitlager*. Springer Verlag, New York.

Radom, C.K. (1990). Engine Oil Additives. *Aus Praxis Und Forschung, Tribologie + Schmierungstechnik* 37 (5/1990), 250 – 258.

Rizvi, S.Q.A. (1992). *Lubricant Additives and Their Functions*, ASM Handbook, Friction, Lubrication, and Wear Technology, 18, 98-111.

Tung, C.Y., Hsieh, S.K. ve Kuo, L. (1987). Determination Of Friction-Reducing And Antiwear Characteristics of Lubricating Engine Oils Compounded with Friction Modifiers. *Journal of The Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Lubrication Engineering*, 44(10), 856-865.



- Wills, J.G. (1980). *Lubrication Fundamentals (Mechanical Engineering:3)*. Mobil Oil Corp. 27-34, New York.
- Wilson B. (1995). Slick 50 – A Proven PTFE-Based Boundary Lubricant for Engines. *Industrial Lubrication and Tribology*, 47(4), 6-8.

## TEŞEKKÜR

Desteklerinden dolayı Maztek Import-Export LTD. şirketine teşekkür ederiz.

deniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalında öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çok sayıda yüksek lisans ve doktora tez çalışması tamamlanmış olup, 2 adet yüksek lisans ve 2 adet doktora tez çalışması devam etmektedir. Triboloji, makine elemanları tasarımı ve imalatı ve yorulma üzerine çok sayıda makale ve bildirisi, 2 adet patenti vardır. Sempozyumlarda danışmanlar kurulu üyeliği vardır. Anabilim dalı başkanlığı, bölüm başkan yardımcılığı görevlerinde bulunmuş, evli ve iki çocuk babasıdır. Almanca ve İngilizce bilmektedir.



**Ertuğrul Durak**, 06.12.1968 tarihinde Erzincan'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzincan'da tamamladı. 1986-1990 tarihleri arasında Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Lisans, 1990-1993 tarihlerinde Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans, 1993-1998 yılları arasında Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktorasını tamamladı. Ağustos 1999'dan itibaren Makine Mühendisliği Bölümünde Yrd. Doç. Dr. olarak çalışmaktadır. Triboloji (Yağlama, aşınma, sürtünme) ve makine elemanları tasarımı üzerine çalışmaktadır. İngilizce ve Fransızca bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.



**Cahit Kurbanoglu**, 1952 Sivas doğumludur. 1974'de Lisans, 1978'de yüksek lisans, 1983'de doktora, 1991'de doçent, 1997'de profesör oldu. Halen Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalında öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 6 adet yüksek lisans ve 5 adet doktora tez çalışması tamamlanmış olup, 3 adet yüksek lisans ve 2 adet doktora tez çalışması devam etmektedir. 45 adet yayınlanmış makale ve 20 adet tebliği vardır. 7 adet yayınlanmış kitabı, 3 adet tamamlanmış araştırma projesi, 2 adet de devam etmekte olan araştırma projesi vardır. 5 adet dergide editörlük, bilim kurulu üyeliği ile sempozyumlarda danışmanlar kurulu üyeliği vardır. Anabilim dalı başkanlığı, bölüm başkan yardımcılığı, kurucu enstitü müdürlüğü ve enstitü müdürlüğü görevlerinde bulunmuş, evli ve üç çocuk babasıdır.

**Aydın Bıyıklıoğlu**, 1954 Trabzon doğumludur. 1975'de Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde Lisans, 1979'da İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Yüksek Lisans, 1986'da Doktora derecelerini aldı. 1990'da Profesör oldu. Halen Kara-