

## GRAFİT VE BRONZ DOLGULU BİR PTFE KAYMALI YATAĞIN KURU SÜRTÜNME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

*Gültekin KARADERE\**

Alınma:02.05.2018; düzeltme:30.11.2018; kabul:05.12.2018

**Öz:** PTFE, öncelikle düşük bir sürtünme katsayısına sahip olması ve çok geniş bir sıcaklık sahası boyunca stick-slip hareketine maruz kalmaması nedeniyle kuru yatak malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada grafit ve bronz katkılı PTFE'den imal edilmiş bir kaymalı yatak burcunun çelik bir muyluya karşı sürtünme katsayısı bir deney düzeneğinde tayin edilip, hız ve sıcaklık artışıyla değişimleri incelenmiştir. Deneyler sonucu sürtünme katsayısının nisbeten küçük hız ve basınçlar sahasında hemen hemen sabit kaldığı (yaklaşık 0,19) ve sürtünme katsayısı üzerinde sıcaklık artışının hız artışına göre daha etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca sabit bir pv değeri için belirli bir sıcaklığa kadar "küçük hız + büyük basınç" kombinasyonunun daha düşük sürtünme katsayıları sağladığı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** PTFE, grafit, bronz, kaymalı yatak, sürtünme katsayısı

### Investigation of dry friction properties of graphite and bronze filled PTFE journal bearing

**Abstract:** PTFE is widely used as a dry-bearing material since it does not subject to the stick-slip motion along the wide temperature range, and has a low coefficient of friction. In this study, the coefficient of friction between the bearing sleeve made of graphite and bronze filled PTFE compound and the steel journal is determined on a test rig and then its dependence upon the velocity and temperature increase is investigated. As a result of the tests, it was found that the coefficient of friction was almost constant (about 0.19) in the relatively small velocity and pressure area and the temperature increase over the coefficient of friction was more effective than the increase in velocity. It has also been found that the combination of "small velocity + large pressure" up to a certain temperature for a constant pv value provides lower friction coefficients.

**Keywords:** PTFE, graphite, bronze, journal bearing, the coefficient of friction

## 1. GİRİŞ

Kuru yatak uygulamalarının çoğunluğunda, bir metale karşı sürtünmesinde ayrıca yağlayıcı bir maddeye gerek kalmaması; nispeten küçük bir sürtünme katsayısına sahip olması sebebiyle organik polimer esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Plastik malzemelerin metallere göre ısıl genleşme katsayılarının yüksek, ısıl iletkenliklerinin, yumuşama noktaları veya ısıl bozulma sıcaklıklarının, elastiklik modülü ve mukavemet değerlerinin düşük ve soğuk akış (creep) olayına da hassas olmaları sebebiyle kayma hızlarının ve yük taşıma kapasitelerinin sınırlı tutulması gerekmektedir. Dolayısıyla, kuru yataklar için kullanılacak plastik malzemelerin geliştirilmesinde amaç, mekanik ve ısıl özelliklerin iyileştirilmesi ve çalışma sıcaklıklarını azaltmak için sürtünmenin azaltılması olacaktır.

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle 16059, Bursa  
İletişim Yazarı: Gültekin Karadere (karadere@uludag.edu.tr)

Yağlayıcı gerektirmeyen kuru yatakların çoğunluğu politetrafloroetilen esaslıdır. Kuru yataklar, hareketin özelliği (düşük hızlarda kayma, salınım hareketi) nedeniyle hidrodinamik yağlayıcı filmlerin oluşmadığı, ortam özellikleri (vakum, çok yüksek veya çok düşük sıcaklıklar, nükleer radyasyon) nedeniyle konvansiyonel yağlayıcıların kullanılmadığı veya yağlama ve filtre sistemlerinin eliminasyonu ile basit tasarımların veya bakım gerektirmeyen elemanların istendiği uygulamalar için elverişlidir.

## 2. PTFE ÜZERİNE YAPILAN BAZI ÇALIŞMALAR

Teflon florokarbon polimerleri için Du Pont şirketinin patentli ticari markasıdır. PTFE formu orijinal teflon reçinesi olup endüstride 1941'den beri kullanılmaktadır. PTFE öncelikle oldukça düşük bir sürtünme katsayısı (düşük kayma hızlarında ve normal sıcaklıklarda  $\mu \approx 0,07$ ) ve yüksek seviyede kendinden yağlama özelliklerine sahip olması, neredeyse tüm kimyasallara karşı dirençli olması ve geniş bir sıcaklık aralığında ( $-260^\circ \text{C}$  ila  $260^\circ \text{C}$ ) stick-slip'siz (üniform) bir kayma sağlayabilme özelliklerinden dolayı kuru yatak malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Evans, 1980; Strong, 1996). Düşük sürtünme katsayısı uzun zincirli lineer moleküllerin kayma sırasında eş çalışan yüzeylerde düşük kayma mukavemetli filmler oluşturma yeteneğinden kaynaklanır (Blanchet ve diğ., 1998).

Pahalı bir malzeme olan PTFE'nin (örneğin günümüz fiyatlarıyla UHMW polietilene göre yaklaşık 12 kat, naylon 6'ya göre 4 kat pahalı) üretim yöntemleri toz metalurjisindeki teknolojiye benzerdir. PTFE tozu bloklar veya çubuklar halinde sıkıştırılır, sinterlenir (ergime noktasına yakın sıcaklıklar ve basınç tesiriyle toz partikülleri birbirine kaynar) ve sonra mekanik olarak gerekli şekillerine işlenir (Strong, 1996; Sealing Handbook, 1993).

PTFE'nin statik sürtünme katsayısı dinamik değerinden daha düşüktür ve en düşük değerler yüksek yüklerde ve düşük kayma hızlarında elde edilir. Ancak modifiye edilmemiş PTFE düşük rijitlik, yüksek termal genleşme katsayısı, düşük termal iletkenlik, zayıf aşınma direnci ve soğuk akışa hassasiyet gibi dezavantajlara sahiptir (Parker, 1963). PTFE içine cam, seramik, metal tozu, metal oksit, grafit veya molibden disülfid gibi dolgu maddelerinin katılmasıyla mekanik özellikler iyileştirilir ve aşınma direnci artırılır. Örneğin, takviyeli PTFE'nin yük taşıma kapasitesi saf PTFE'ye göre 5 kat, maksimum hız ve pv sınırları ise 10 kat daha yüksektir (Hamrock, 1994; Wang ve diğ., 2004).

Dolguların seçimi uygulama kriterlerine göre belirlenir. Dolgu maddelerinden cam elyafı kimyasal stabiliteyi artırıp geniş bir sıcaklık sahası boyunca creep mukavemetini geliştirir. Bronz creep mukavemetinde ve ısı iletkenlikte (dolayısıyla maksimum hız kapasitesinde) önemli bir gelişme sağlar. Karbon/grafit creep mukavemetini, sertliği, aşınma direncini ve ısı iletkenliği artırır. Karbon dolgulu bileşikler çok daha az takım aşınmasına yol açtığından parçalar daha hassas toleranslarda imal edilebilir. Grafit kimyasal olarak inerttir ve yüksek basınçlara dirençlidir. Molibden disülfid ( $\text{MoS}_2$ ) sertliği ve rijitliği artırıp, sürtünmeyi azaltır. Küçük oranlarda ve diğer dolgularla birlikte kullanılır. Dolgulu PTFE hallerinde en küçük sürtünme katsayısı değerine yalnız grafit veya  $\text{MoS}_2$  içeren bileşikler veya cam elyafları ile kombinasyon halinde ulaşılır. Lifli dolgu maddeleri kullanımı partiküllü olanlara göre daha az aşınmaya yol açar. Su veya klasik yağlayıcı kullanımı sürtünme katsayısını azaltır, ancak aşınma oranını artırır. Çünkü kuru halde eş çalışan yüzey PTFE bileşiği tarafından teflonla kaplanmaktadır. Sıvının mevcudiyeti bu kaplanmayı önlemektedir. (Sealing Handbook, 1993).

Aşınma oranını azaltma yönünden en etkili dolgu maddesi bronzdur. Bronz dolgulu PTFE nin ısı iletkenliği grafit ilavesi ile artırılarak aşınma oranı daha da düşürülür. Dolgusuz PTFE'nin özgül aşınma oranı  $60 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$  iken bronz ve grafit dolgulu PTFE için bu değer  $0,06 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$  'dir (Evans, 1980). Karbon,  $\text{MoS}_2$ , cam elyaf, polieter eter keton partikülleri ile takviye edilmiş PTFE'nin paslanmaz çeliğe karşı aşınma davranışı pim-disk sistemiyle test edildiğinde, dolgu maddeli kompozitlerin saf PTFE'ye göre daha uzun bir aşınma ömrüne sahip olduğu ve incelenen PTFE kompozitleri arasında, seçilen yük ve hız değerleri için

en düşük aşınma kaybının %15 Cam elyaf ve %5 MoS<sub>2</sub> partikülleri ile takviye edilmiş PTFE kompozitinde gerçekleştiği belirtilmiştir (Desale ve Pawar, 2018).

PTFE elyafı, cam elyafı ve fenolik reçineden oluşan ve yüzeyi tamamen PTFE kaplı kompozit yatak malzemesinin paslanmaz çeliğe karşı 0,13 m/s hızla sürtünmesinde basınç artışıyla özgül aşınma oranının hızlı bir şekilde arttığı; sürtünme katsayısının basınç artışıyla azaldığı ( $\mu=0,16$ 'dan  $\mu=0,08$ 'e); karşı malzemenin ortalama yüzey pürüzlülüğü  $R_a=0,01-0,1$   $\mu\text{m}$  arasındayken özgül aşınma oranının hemen hemen sabit kaldığı,  $R_a=0,1-1$   $\mu\text{m}$  arasındayken hızlı bir şekilde arttığı belirtilmiştir (Lancaster, 1979). PTFE-metal (16MnCr5) sürtünmesinde mümkün olan en küçük aşınma halinde üniform bir kayma sağlayabilmek için, metal yüzeyin optimum yüzey pürüzlülüğününün 0,2  $\mu\text{m}$ 'den küçük olması tavsiye edilmiştir. 10 kat daha düşük hızlarda sürtünme katsayısının 3,5 kat daha düşük olduğu bulunmuştur (Erhard ve Strickle, 1972).

Sürtünme katsayısındaki azalmayı oluşturan mekanizmalardan biri, PTFE'nin çelik parçalara karşı kayarken kolaylıkla bir transfer filmi oluşturabilmesidir (Tanaka, 1986). Grafit, atomların her bir tabaka içinde altıgen bir birim hücrede düzenlendiği bir katman yapısına sahip olup, kayan karşı parça üzerinde bir transfer filmi oluşturabilecek potansiyel bir takviye adaydır (Chung, 2002).

%35 karbon dolgulu PTFE kompozit malzemeden ve %60 bronz dolgulu PTFE kompozit malzemeden imal edilmiş kaymalı yataklarla AISI 440C paslanmaz çelikten muylu arasındaki deneylerde sürtünme katsayısının ve aşınmanın muylu ve yatak yüzeyleri arasındaki adhezyona, polimerin kohezif özelliklerine, basınca ve kayma mesafesine bağlı olarak filmlerin kalınlığından ve bileşiminden kuvvetli bir şekilde etkilendiği gösterilmiştir (Tevruz, 1998 ve 1999).

Bazı araştırmacılar (Yamaguchi, 1990; Stuart, 1998) polimerler ile metaller arasındaki sürtünme katsayısının yükün artmasıyla arttığını göstermiştir. Çoğu makalede ise yük artışıyla sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir (Lancaster, 1979; Anderson, 1986; Tevruz, 1998 ve 1999; Ünal ve diğ.; 2004 ve 2006).

Sıcaklık 25°C den 300°C ye ulaştığında PTFE için sürtünme katsayısının 4,5 kat azaldığı ve turbo jeneratör destek yatakları için tüm sıcaklık sahası boyunca tasarım gereksinimlerini sadece dolgu malzemeli PTFE'nin karşıladığı belirtilmiştir (Low, 1979).

%25 karbon dolgulu teflondan yapılmış bir pim ile paslanmaz çelikten bir disk arasındaki kayma sürtünmesi deneylerinde ortalama sürtünme katsayısı atmosfer basıncında (760 torr)  $\mu_a=0,16\pm 0,02$ , çok yüksek vakumda ( $4.10^{-9}$  torr) ise  $\mu_v=0,17\pm 0,02$  olarak bulunmuştur (Wilkens ve Kranz, 1970).

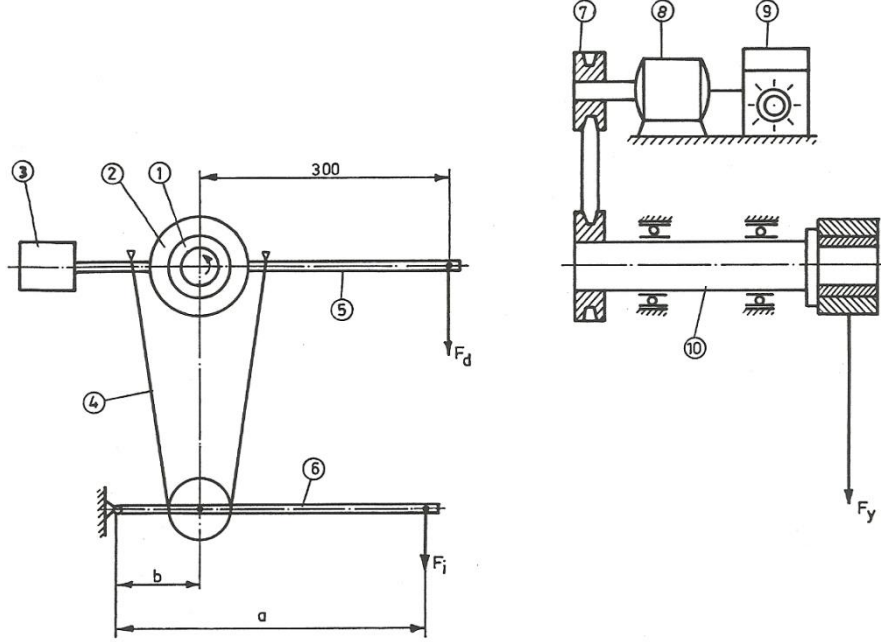
%25 bronz dolgulu PTFE kompozitin AISI 440C paslanmaz çeliğe karşı sürtünme ve aşınma davranışı pim-disk sistemiyle incelenmiş, yük artışı ile sürtünme katsayısının azaldığı gözlenmiş ve seçilen yük-hız sahaslarında söz konusu kompozitin sürtünme katsayısını etkileyen en önemli faktörün uygulanan yük olduğu bulunmuştur (Ünal ve diğ., 2006).

İki veya daha fazla dolgu maddesi içeren PTFE kompozitlerin sürtünme davranışları hakkındaki çalışmalar sınırlıdır. Bu araştırmanın amacı ağırlıkça %10 grafit ve %50 bronz dolgulu bir PTFE kaymalı yatağın paslanmaz çelikten bir muyluya karşı sürtünme katsayısını bir deney düzeneğinde tayin etmek, hız ve sıcaklık artışıyla değişimlerini incelemektir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Deney sistemi Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Hız kontrol sistemiyle çıkış hızı değiştirilebilen bir doğru akım elektrik motoruna (0,370 kW, 3000 d/dk) bir ucundan kayış kasnak mekanizmasıyla bağlı olan ve rulmanlı yataklarla desteklenen bir çelik mil, diğer ucunda içinde deney burcunun bulunduğu bir gövdeyi taşımaktadır. Muylu çapı 40 h7 (0/-0,025) mm dir. Mil (muylu) malzemesi AISI 440C (DIN X105CrMo17) yüksek karbonlu martenzitik

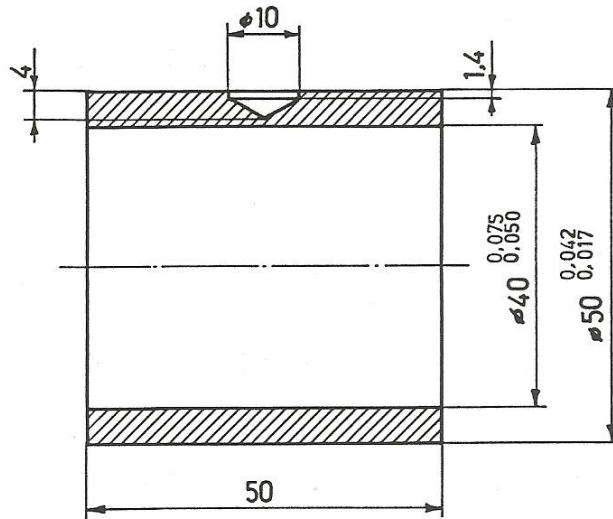
paslanmaz çeliktir. Ortalama yüzey pürüzlülükleri yaklaşık olarak muylu için  $0,1 \mu\text{m}$  ve yatak yüzeyi için  $0,2 \mu\text{m}$  dir.



**Şekil 1:**

*Deney sistemi (1:Yatak burcu, 2:Gövde, 3:Karşı ağırlık, 4:Tel halat, 5:Moment kolu, 6:Yatak yük kolu, 7:Kayış-kasnak mekanizması, 8:Elektrik motoru, 9:Hız kontrol sistemi, 10:Mil)*

Şekil 2'de boyutları verilen deney burcu (kaymalı yatak) ağırlıkça %10 grafit, %50 bronz ve %40 PTFE'den imal edilmiş olup yoğunluğu  $3,4 \text{ g/cm}^3$  tür. Burç gövdeye üst taraftan içi boşaltılmış bir civatayla bağlanarak sabitlenmiştir. Bu civatanın içinden geçirilerek sürtünme yüzeyine 1 mm uzaklıkta yatak içindeki bir noktaya temas eden bir termokupl (NiCr-Ni) vasıtasıyla, muylu ve yatak arasındaki izafi harekette yükselen sıcaklık değerleri dijital olarak okunmaktadır.



**Şekil 2:**

*Yatak burcunun boyutları*

Gövdeye her iki tarafından kaynaklanmış çubuklardan birinin ucuna sabit bir karşı ağırlık, diğerinin (moment kolu) ucuna ise bir yük ( $F_d$  denge ağırlıkları) askısı yerleştirilmiştir. Mil duruyorken yatay konumda olan moment kolu, mil dönerken sürtünme momentinin etkisiyle yatay konumundan ayrılır. Yük askısına ağırlıklar konularak yatay denge sağlanır. Bu denge ağırlıkları moment kol uzaklığı (300 mm) ile çarpılarak  $M_s$  sürtünme momenti hesaplanır.

Gövdenin iki tarafındaki kollara, yaslanma noktaları çizgisel temaslı ve simetrik olarak asılmış ve bir makara üzerinden dolaşan tel halat çevrimiyle ve  $a/b=4$  oranına sahip bir kol sistemiyle yatak yükü uygulanmaktadır. Gövde, kollar, halat, makara ve askılardan oluşan sistemin kendi ağırlığı (55 N) yatağa uygulanan minimum yüküdür. Milin devir sayısı bir optik dijital takometreyle kontrol edilerek hız kontrol ünitesinden ayarlanmaktadır.

$n=20$  ve  $40$  d/dk lık hızlar için sürtünme katsayısını tayin etmek için yapılan deneylerde, ilave kuvvetler  $F_i=0; 5; 10; 15$  N yani yatak (normal) kuvvetleri sırasıyla  $F_y = F_n = 55; 75; 95; 115$  N seçilmiştir.

Yatak yarıçapının sabit değeri ( $r=20$  mm) için  $\mu$  sürtünme katsayısı bağıntısı  $\varphi$  büyüklük ölçekleri cinsinden yazılır.

$$\mu = \frac{\Delta M_s}{r \cdot \Delta F_n} \rightarrow \varphi_\mu = \varphi_{\Delta M_s} - \varphi_{\Delta F_n}$$

1 ve 2 indisleri söz konusu parametrelerin değiştiği/değiştirildiği deney gruplarını temsil etmek üzere, sabit sürtünme katsayısı kabulüyle, sürtünme momenti büyüklük ölçeceği normal kuvvet büyüklük ölçeceğine eşit olacaktır.

$$\varphi_{M_s} = \varphi_{F_n} = \frac{M_{s_2}}{M_{s_1}} = \frac{F_{n_2}}{F_{n_1}} = \frac{M_{s_2} - M_{s_1}}{M_{s_1}} = \frac{F_{n_2} - F_{n_1}}{F_{n_1}}$$

#### 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Sürtünme momentinin yatak normal kuvvetiyle değişimi Şekil 3 te gösterilmiştir. Diyagramdaki her bir nokta aynı şartlarda yapılan deneylerin ortalama değerlerine karşılık işaretlenmiştir.

Her deney öncesi muylu yüzeyi temizlenmiş ve deney sonrasında muylu yüzeylerinde hareket yönüne paralel grafit izleri oluştuğu gözlenmiştir. Yatak burcunun yüzey pürüzlerinin ezilmesi ve grafit partiküllerinin yüzey düzgünlüğünü oluşturan çukurcukları doldurması sonucunda, muylu ile temasta bulunduğu bölgede (burcun üst bölgesinde) parlatılmış bir yüzeye sahip olduğu gözlenmiştir.

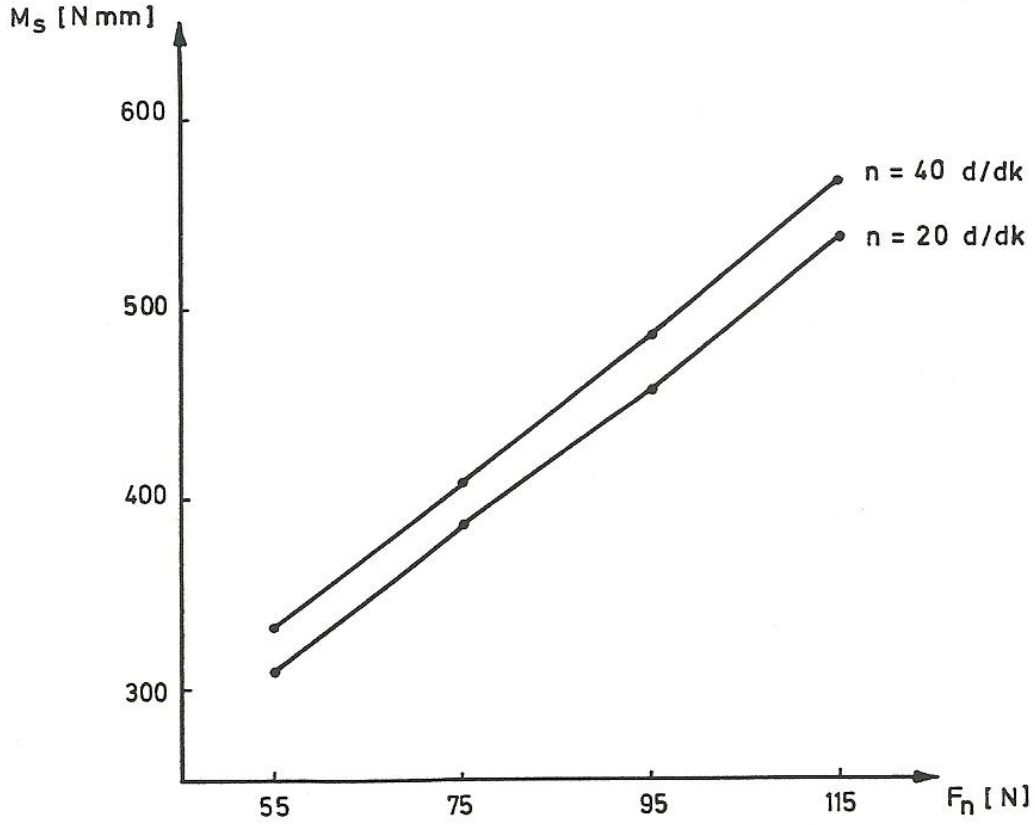
Sürtünme momenti ve normal kuvvet artış oranlarının aynı/çok yakın olması sürtünme katsayılarının aynı/çok yakın olması demektir. Şekil 3 deki  $M_s$ - $F_n$  değişimlerinin hemen hemen birer doğru olması ve birbirine paralel olması sürtünme katsayılarının yaklaşık olarak aynı olduğunu göstermektedir. Şekil 3 deki ortalama değer noktalarına en uygun doğru denklemleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$n = 20 [d / dk] \rightarrow M_s = 3,76 \cdot F_n [N] + 101,40 [N \cdot mm]$$

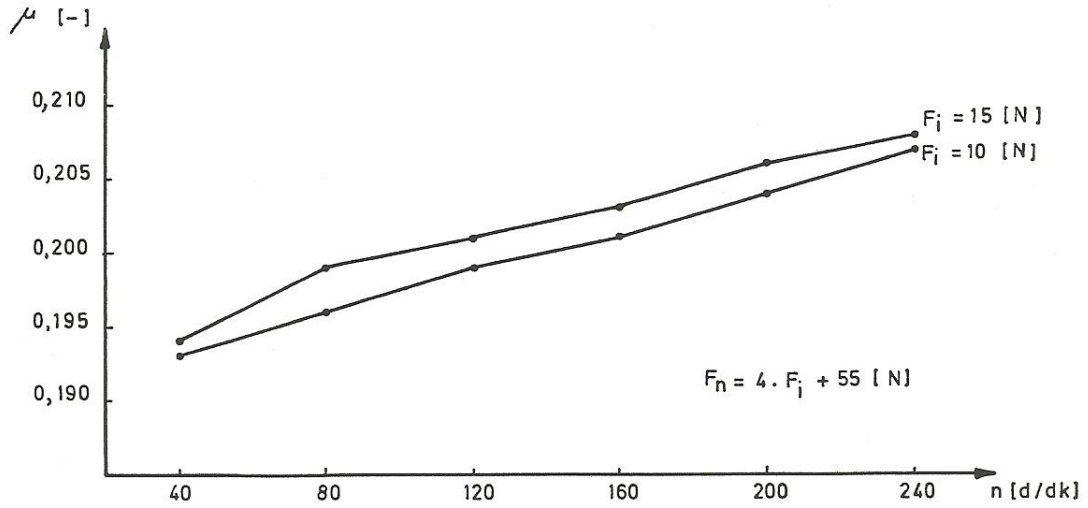
$$n = 40 [d / dk] \rightarrow M_s = 3,89 \cdot F_n [N] + 116,85 [N \cdot mm]$$

Sürtünme katsayısı bağıntısı kullanıldığında  $n=20$  ve  $40$  d/dk için ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla  $\mu=0,1880$  ve  $0,1945$  olarak bulunacaktır. Deney sonuçlarının ortalaması ise sırasıyla  $\mu=0,1900$  ve  $0,1942$  olarak bulunmuştur.

$v=41,9-335,1$  mm/s kayma hızı ve  $p=27,5-57,5$  kPa nominal basınç sahasında sürtünme katsayısının ortalama değerlere göre sapması, ortalama  $\%-5,9$  ile  $\%+3,6$  arasında bulunmuştur. Şekil 3 te ortalama değerlerini işaretlediğimiz sürtünme katsayılarının tayin edildiği deneylerde ölçüm yapılan sıcaklık sahası  $26,6^\circ/30,3^\circ\text{C}$ ; bir deney esnasındaki sıcaklık artışı sahası  $0,2^\circ/1,1^\circ$ , ortalama sıcaklık artışı ise  $0,53^\circ$  olmuştur. Bu değerler sürtünme katsayısı ölçümlerinde sıcaklık etkisinin mümkün olduğunca küçük tutulduğunu belirtmektedir.



Şekil 3:  
Sürtünme momentinin yatak normal kuvvetiyle değişimi



Şekil 4:  
Sürtünme katsayısının hızla değişimi

Şekil 4 te  $F_i=10$  ve  $15$  N luk ilave kuvvetler için,  $40-240$  d/dk ( $83,8-502,7$  mm/s) hız sahasında sürtünme katsayısının değişimi gösterilmiştir. Diyagramda hemen hemen lineer olarak görülen değişimler, aşağıdaki gibi doğru denklemleri şeklinde yazılabilir.

$$F_i = 10 [N] \rightarrow \mu = 6,857 \cdot 10^{-5} \cdot n [d/dk] + 0,1904$$

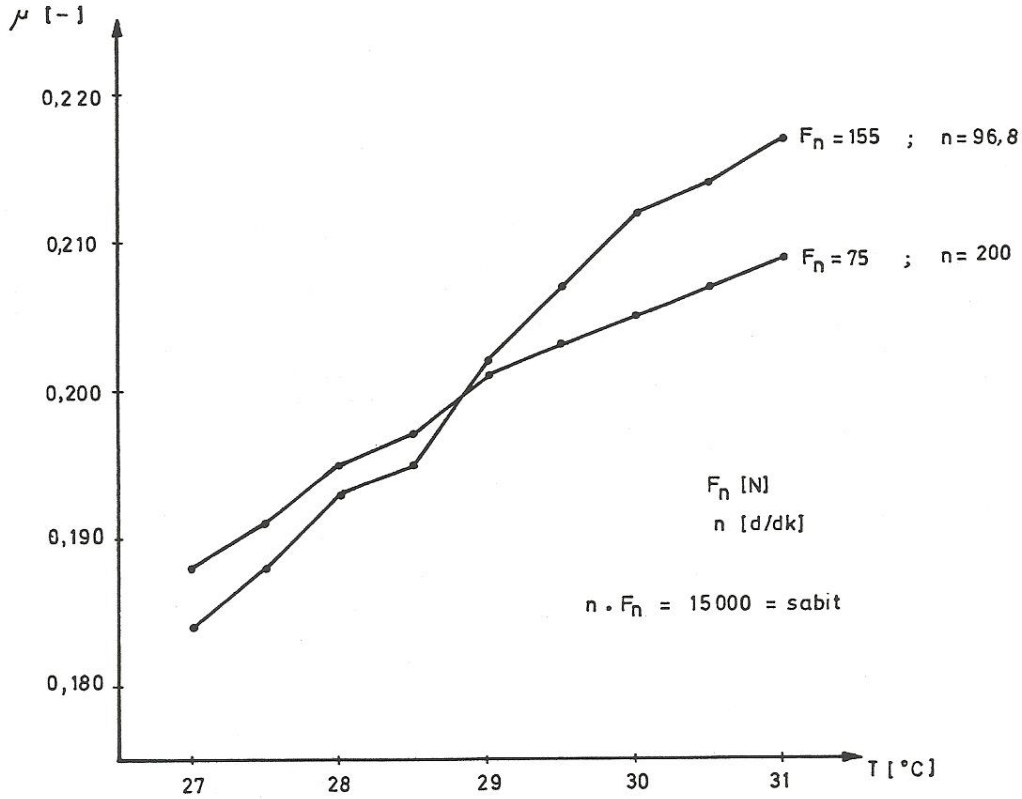
$$F_i = 15 [N] \rightarrow \mu = 6,643 \cdot 10^{-5} \cdot n [d/dk] + 0,1925$$

Belirtilen sahada hızın 6 kat artırılması halinde sürtünme katsayısının sadece yaklaşık %7 arttığı; normal kuvvetin yaklaşık %20 artırılması halinde ise sürtünme katsayısının %0,5-1,5 arasında arttığı diyagramdan görülmektedir. Hızın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin küçük olması nedeniyle, yukarıdaki doğru denklemlerinden görüldüğü gibi, sürtünme katsayısını oluşturan asıl terimler ikincilerdir.

Şekil 5 te sabit bir  $n \cdot F_n$  (yani sabit bir  $p \cdot v$ ) değeri için, iki farklı hızda ( $n=96,8$  ve  $200$  d/dk) sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi çizilmiştir. Bu diyagramdan görülebileceği gibi,  $27-31^\circ\text{C}$  sahasında sıcaklığın yaklaşık %15 artması halinde sürtünme katsayısı,  $n=96,8$  d/dk için %18 artış gösterirken,  $n=200$  d/dk için %11 gibi daha düşük bir artışa sahip olmuştur. Diyagramdan dikkati çeken diğer bir sonuç, belirli bir sıcaklığa kadar "küçük hız + büyük basınç" kombinasyonunun, bahsedilen sıcaklık değerinden sonra ise "büyük hız + küçük basınç" kombinasyonunun daha düşük sürtünme katsayıları sağlamasıdır. Sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı ifadesi aşağıdaki gibi doğru denklemleri şeklinde yazılabilir.

$$F_n = 155 [N], n = 96,8 [d/dk] \rightarrow \mu = 8,67 \cdot 10^{-3} \cdot T [^\circ\text{C}] - 0,0500$$

$$F_n = 75 [N], n = 200 [d/dk] \rightarrow \mu = 5,27 \cdot 10^{-3} \cdot T [^\circ\text{C}] + 0,0468$$



Şekil 5:

Sürtünme katsayısının sabit bir  $n \cdot F_n$  değeri için sıcaklıkla değişimi

Birinci denklemdeki ikinci terimin eksi işaretli olması, belirli bir sıcaklığın altında küçük hız değerlerinin; ikinci denklemdeki birinci terimin katsayısının ilk denklemdekine göre küçük

olması da belirli bir sıcaklık değerinden sonra küçük basınç değerlerinin daha düşük sürtünme katsayıları verdiğinin ifadesidir.

Ancak basınç, hız, sıcaklık artışı, konstrüksiyon ve malzeme özellikleri gibi etkilerin kombinasyonu,  $\varphi_{M_s}$  sürtünme momenti ölçeği,  $\varphi_{F_n}$  normal kuvvet ölçeğinden küçük değerlere sahip olduğunda, sabit boyutlar için sürtünme katsayısı azalacaktır. Örneğin, sıcaklık artışıyla kesme mukavemetindeki azalmanın, sertlikteki azalmadan daha fazla olması, sürtünme katsayısının azalması demektir. Saf veya katkılı PTFE-çelik çiftinin düzlemsel yüzeyler halinde sürtünmesinde; basınç ve/veya sıcaklık artışıyla sürtünme katsayısının azaldığı belirtilen çalışmalardan daha önce bahsedilmişti (Lancaster, 1979; Anderson, 1986; Tevruz, 1998 ve 1999; Ünal ve diğ., 2004 ve 2006; Low, 1979).

Buradaki deney sisteminde, hız ve sıcaklık artışıyla sürtünme katsayılarının artmasında, burcun dışarıdan metal gövdeyle fiziksel olarak sınırlandırılması sonucunda içeriye doğru genişmesi ve yatak boşluğunu azaltması ile aşınma elemanlarının birbirleriyle ve temas yüzeyleriyle etkileşimlerinin (abrazif, adhezif etkilerin) rol oynadığı düşünülmüştür.

## 5. SONUÇ

Ağırlıkça %10 grafit ve %50 bronz katkılı PTFE yatağın AISI 440C paslanmaz çelik muyluya karşı sürtünme katsayısının,  $v=42-335$  mm/s kayma hızı ve 27,5-57,5 kPa nominal basınç sahasında hemen hemen sabit kaldığı, 42 ve 84 mm/s'lik hızlar için sırasıyla 0,1900 ve 0,1942 ortalama değerlerini aldığı; 84-503 mm/s sahasında hızın 6 kat artırılmasıyla sürtünme katsayısının çok az (yaklaşık %7) arttığı; 27-31°C sahasında sıcaklığın yaklaşık %15 artması halinde sürtünme katsayısının, 203 ve 419 mm/s'lik hızlar için, sırasıyla %18 ve %11'lik artışlar gösterdiği ve sabit bir  $p.v$  ( $n.F_n$ ) değeri için belirli bir sıcaklığa kadar "küçük hız + büyük basınç" kombinasyonunun, bu sıcaklık değerinden sonra ise "büyük hız + küçük basınç" kombinasyonunun daha düşük sürtünme katsayıları sağladığı sonuçları elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Anderson, J.C. (1986) The wear and friction of commercial polymers and composites. In: Friedrich, K. (Ed.), *Friction and Wear of Polymer Composites*, Composite materials series 1, Elsevier, Amsterdam, 329–362.
2. Blanchet, T.A., Peng, Y. and Nablo, S.V. (1998) *Tribology Letters*, 4, 87–94.
3. Chung, D.D.L. (2002) Graphite. *Journal of Materials Science*, 37, 1475–1489.
4. Desale, D.D. and Pawar, H.B. (2018) Performance Analysis of Polytetrafluoroethylene as Journal Bearing Material. *Procedia Manufacturing*, 20, 414-419.
5. Erhard, G. und Strickle, E. (1972) Gleitelemente aus Thermoplastischen Kunststoffen. *BASF, Sonderdruck aus der Zeitschrift Kunststoffe*, 1-21, s684d, 10.
6. Evans, D.C. (1980) *Self-Lubricating Bearings : Dry Bearings*, The Glacier Metal Co. Ltd., Technical File No.79, Engineering, I-VI.
7. Hamrock, B.J. (1994) *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill, N.Y., 97-100.
8. Lancaster, J.K. (1979) Accelerated Wear Testing of PTFE Composite Bearing Materials. *Tribology International*, April, 65-75.
9. Low, M.B.J. (1979) The effect of the transfer film on the friction and wear of dry bearing materials for a power plant application. *Wear* 52, 347-363.



10. Parker, E.R. (1963) *Materials for Missiles and Spacecraft*, McGraw-Hill, N.Y., 312-315.
11. Strong, A.B. (1996) *Plastics: Materials and Processing*, Prentice-Hall, N.J., 9-201.
12. Stuart, B.H. (1998) Tribological studies of poly(ether ether ketone) blends. *Tribology International*, 31(11), 647–651.
13. \_\_\_\_\_ (1993) *Sealing Handbook*, 3353/E, Parker-Pradifa GmbH, Bietigheim-Bissingen, Germany, 121-125.
14. Tanaka, K. (1986) Effects of various fillers on the friction and wear of PTFE-based composites. In: Friedrich, K. (Ed.), *Friction and Wear of Polymer Composites*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 137–174.
15. Tevrüz, T. (1998) Tribological behaviours of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) dry journal bearings. *Wear*, 221, 61-68.
16. Tevrüz, T. (1999) Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings. *Wear*, 230, 61-69.
17. Unal, H., Mimaroglu, A., Kadioglu, U. and Ekiz, H. (2004) Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions. *Materials & Design*, 25(3), 239-245.
18. Unal, H., Sen, U. and Mimaroglu, A. (2006) An approach to friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composite. *Materials & Design*, 27(8), 694-699.
19. Wang, C.B., Yan, M.F. and Wang, Y. (2004) The influence of metal surface composition on the tribological properties of filled PTFE/steel couples. *Tribology International*, 37(8), 645-650.
20. Wilkens, W. and Kranz, O. (1970) The Formation of Gases due to the Sliding Friction of Teflon on Steel in Ultrahigh Vacuum. *Wear*, 15, 215-227.
21. Yamaguchi, Y. (1990) *Tribology of plastic materials: Their characteristics and applications to sliding components*, Elsevier Science, Amsterdam.

