

# BURÇ, CONTA VE RULMAN UYGULAMALARI İÇİN SAF POLİ-TETRA-FLOR-ETİLEN VE BRONZ TAKVİYELİ POLİ-TETRA-FLOR-ETİLEN KOMPOZİTİN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

**Ahmet MASLAVI<sup>1</sup>, Hüseyin ÜNAL<sup>2\*</sup>, Salih Hakan YETGİN<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 24.11.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 29.04.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1395652

## ÖZET

Bu çalışmada, endüstrinin çeşitli sektörlerinde makinelerde sıkça kullanılan hidrolik piston contaları, salmastra ve keçeler gibi polimerlerden üretilen malzemelerin tribolojik performansları incelenmiştir. Tribolojik çalışmada saf poli-tetra-flor-etilen (PTFE) polimeri ile ağırlık olarak %25 oranında bronz takviyeli poli-tetra-flor-etilen (PTFE/25bronz) kompozit kullanılmış ve her iki malzemenin tribolojik performansları karşılaştırılmıştır. Tribolojik deneyler disk üzerinde pim olacak şekilde dizayn edilmiş aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik deneyler 30N-150N yük aralığında ve 1.0 m/s kayma hızında yapılmıştır. Deneylerde sürtünme katsayısı, aşınma hacmi, pim/disk yüzey sıcaklıkları ve spesifik aşınma oranı ölçülmüştür. Çalışma sonucunda PTFE/25 bronz kompozitin sürtünme katsayısı, pim/disk yüzey sıcaklığı ve aşınma oranı saf PTFE'ye daha düşük olduğu tespit edilmiştir. PTFE polimerine %25 bronz ilavesi kompozitin spesifik aşınma oranında önemli oranda azalmaya sebep olmuştur. Taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop kullanılarak numunelerin aşınma yüzey mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Saf PTFE polimerinde abrasif aşınma, PTFE/bronz kompozitinde ise adhezif aşınma mekanizması gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** PTFE, Bronz, Kompozit, Aşınma oranı, Sürtünme katsayısı

## COMPARISON OF TRIBOLOGICAL PERFORMANCES OF PURE POLY-TETRA-FLUORO-ETHYLENE AND BRONZE REINFORCED POLY-TETRA-FLUORO-ETHYLENE COMPOSITE FOR BUSHING, GASKET AND BEARING APPLICATIONS

### ABSTRACT

In this study, the tribological performances of materials produced from polymers such as hydraulic piston seals, glands and seals, which are frequently used in machines in various sectors of the industry, were investigated. In the tribological study, pure poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE) and 25wt.% bronze reinforced poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE/25bronze) were used and the tribological performances of both materials were compared. Tribological tests were realised on a pin-on-disc wear test rig. Tribological experiments were performed in the load range of 30N-150N and sliding speed of 1.0 m/s. Friction coefficient ( $\mu$ ), wear volume, pin/disk surface temperatures and specific wear rate (SWR) were measured. As a result, it was observed that the  $\mu$ , pin/disk surface temperature and SWR of PTFE/25bronze composite were lower than pure PTFE. The addition of 25wt.% bronze to the PTFE caused a significant reduction in the SWR of the composite. Optical and scanning electron microscopy were used to examine the wear surface microstructure of the samples. Abrasive wear mechanism was observed in pure PTFE and adhesive wear mechanism in PTFE/bronze composite.

**Keywords:** PTFE, Bronze, Composite, Wear rate, Friction coefficient

e-posta<sup>1</sup> : [ahmad.abdulkarim@ogr.sakarya.edu.tr](mailto:ahmad.abdulkarim@ogr.sakarya.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9571-0640>

\* e-posta<sup>2</sup> : [unal@subu.edu.tr](mailto:unal@subu.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-6647> (Sorumlu Yazar)

\* e-posta<sup>2</sup> : [shyetingin@gmail.com](mailto:shyetingin@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6068-9204>

## 1. Giriş

Politetrafloroetilen (PTFE), termoplastikler sınıfında yer alan bir floropolimerdir. PTFE, monomer tetra-flor-etilenden (TFE) polimerize edilmektedir ve formülasyonunda  $[(CF_2-CF_2)_n]$  moleküler formülüne sahip C-F bağına sahiptir. PTFE, flor atomları nedeniyle yüksek moleküler ağırlıklı bir bileşiktir ve yarı kristal yapıya sahiptir. Güçlü C-F bağı nedeniyle herhangi bir başka bileşik ile reaksiyona giremez. Kompozit formda yüksek termal iletkenlik, mukavemet, hidrofobiklik ve kimyasal inertlik gibi pek çok özellik PTFE tarafından ortaya konulmaktadır [1-3]. PTFE polimerinin erime sıcaklığı 325 ile 335 °C aralığında olduğundan dolayı yüksek termal dirence ve yüksek çalışma sıcaklığına sahip termoplastikler arasında yer alır. PTFE polimeri fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı endüstriyel alanlarda fonksiyonel bir polimerik malzeme olarak kabul edilmektedir. PTFE, yağlama, yatak bilyaları ve polimerik dişliler gibi mekanik ve tribolojik kullanımlar açısından önemli bir mühendislik polimeridir [4-6]. PTFE'nin dielektrik özelliği, kablo kaplamaları, elektrik yüklerini depolamak için elektretler ve baskılı devre kartlarının yapımı gibi yalıtım uygulamalarında da kullanılmaktadır [7-8].

Bu avantajlı özellikleri nedeniyle PTFE polimeri, otomotiv endüstrisindeki sürtünme ünitelerinde mekanik bileşen olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, çoğu durumda saf PTFE polimerinin kolayca aşınabilir olması yani düşük aşınma direncine sahip olması sürtünmeye maruz kalan alanlarda kullanımını engellemektedir [9-10]. Karbon, grafit, bronz, molibden disülfid ( $MoS_2$ ), cam elyaf, karbon elyaf gibi dolgu maddeleri sayesinde aşınma direnci büyük ölçüde iyileşmektedir [4, 8, 11-12]. Khan ve arkadaşları [13] %25 oranında cam elyaf takviyeli PTFE kompozitlerin pim-disk aşınma cihazında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Tatyana ve arkadaşları [9] yaptıkları diğer bir çalışmada %1-10 arasındaki oranlarda karbon elyaf takviyeli zeolit/PTFE kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilirken aşınma direncinin zeolit/PTFE kompozitine göre yaklaşık 8-10 kat arttığını belirtmişlerdir. Pathan ve arkadaşları [14] %15 ve %20 oranlarında cam elyaf takviyeli PTFE kompozitlerin yük, hız ve kayma mesafesine bağlı olarak tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda 3 kg yük, 5.18 m/s kayma hızı, 2 km kayma mesafesinde %15 cam elyaf PTFE kompozitinde aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı önemli oranda etkilenmezken PTFE polimeri için ideal parametreler olduğu belirtilmiştir. Şahin ve Mirzayev [15] ağırlıkça %15 oranında cam elyaf, %60 bronz ve %25 karbon katkılı PTFE kompozitlerin kuru ortam şartlarında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Bronz ve karbon elyaf takviyeli PTFE kompozitlerin cam elyaf takviyeli kompozitlere göre aşınma direncinin azaldığını kayma mesafesi ve yükün artması ile aşınma oranının arttığı belirtilmiştir. Raaj ve arkadaşları [16] molibden disülfid ( $MoS_2$ ) (%2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5 oranında) ve %2.5 oranında grafit ilaveli PTFE polimer kompozitlerinin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında sürtünme katsayısının uygulanan yükün artışına bağlı olarak azaldığı gözlenirken aşınma oranı ise kayma hızının artışı ile azalmıştır. Grafit ve  $MoS_2$  ilavesi ile PTFE kompozitlerin aşınma direncinin önemli oranda azaldığı belirtilmiştir. Zhen ve arkadaşları [10] ise %1-2-5 oranlarında  $MoS_2$  katkılı PTFE kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. 2 °C ile 250 °C arasındaki test sıcaklıklarında sürtünme katsayısının ve aşınma oranının sırasıyla yaklaşık olarak (0,14–0,19) ve  $(4,18–13,38 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm})$  olduğu belirlenmiştir. 200 °C üzerindeki test sıcaklıklarında ise  $MoS_2$  ilaveli PTFE kompozitin sürtünme katsayısının katkısız PTFE'ye göre daha düşük olduğu gözlenirken, ağırlıkça %2 ve %5 oranlarında  $MoS_2$  ilaveli PTFE kompozitlerin aşınma oranı daha düşük elde edilmiştir.

Literatür taraması değerlendirildiğinde, farklı oranlarda karbon, grafit, cam elyaf, karbon elyaf,  $MoS_2$  gibi katkıların PTFE polimerinin sürtünme ve aşınma davranışını etkilediği görülmektedir. Bu deneysel çalışmada ise katkısız PTFE polimeri ile ağırlıkça %25 bronz katkılı PTFE polimer kompozit malzemelerin tribolojik davranışları incelenmiştir. Tribolojik testler pim-disk aşınma test cihazında kurukayma şartları altında ve yaklaşık oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Rulmanlı yataklarda, burç kullanımında milin dönme hızı kullanılan polimer yatağın aşınma ve sürtünme davranışlarını

etkilemekte ve malzemenin çalışma ömrünü belirlemektedir. Bu amaçla tribolojik test şartları olarak 1.0m/s kayma hızı ile 30N, 60N, 100N ve 150N yükler seçilmiştir. Karşı disk malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

Aşınma deneylerinde kullanılan saf PTFE polimer ve %25 bronz takviyeli poli-tetra-flor-etilen polimer kompoziti İstanbul'dan bir firmadan 20 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda çubuk formunda temin edilmiştir. Triboloji testleri kuru ortam sıcaklığında dönen disk üzerinde pim (pim-disk) bulunan bir aşınma test cihazında (Şekil 1) yapılmıştır. Aşınma deneyleri için hazırlanan test çubukları, 6 mm çap ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde revolver torna tezgahında tormalanmıştır. Karşı disk malzemesi olarak AISI 304 paslanmaz çelik kullanılırken diskler 8 mm kalınlığında ve 100 mm çapında olacak şekilde önce tormalanmış, taşlanmış ve yüzeyleri parlatılmıştır. Disk malzemesinin yüzey pürüzlülüğü ise yaklaşık 0,26-0,50 Ra aralığında ölçülmüştür.

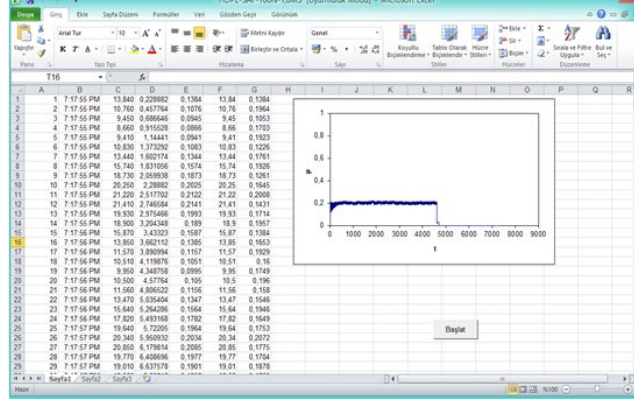


Şekil 1. Pim-disk aşınma test cihazı

Aşınma deneyleri disk üzerinde pim olacak şekilde dizayn edilmiş aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler ASTM G99 standardına uygun olarak yapılmıştır. Sürtünme katsayısı aşağıdaki formül 1 de verilen formülle hesaplanmıştır. Formülde  $\mu$  sürtünme katsayısını,  $F_s$  sürtünme kuvvetini,  $F_N$  ise Normal kuvveti ifade eder.

$$\mu = \frac{F_s}{F_N} \quad (1)$$

$F_s$  kuvveti sürtünme kuvveti olup bir yük hücresi (load-cell) kullanılarak ölçülmüştür. Dakikada yaklaşık 1000 veri alınmış ve bilgisayarda bir excell programına kaydedilmiştir.  $F_s$  kuvveti normal kuvvete ( $F_N$ ) bölünerek elde edilen sürtünme katsayısı- zaman grafiği excell programında aşağıdaki Şekil 2'de verildiği gibi elde edilmektedir.



Şekil 2. Aşınma deneyinde excell formatında elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafiği

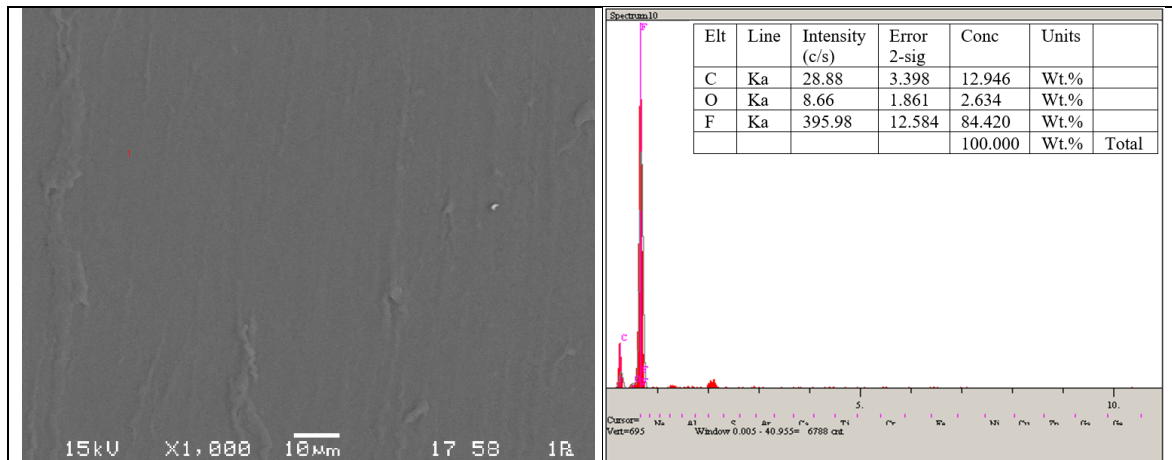
Numunelerin spesifik aşınma oranı ise aşağıda formül 2' de verilen formülle hesaplanmıştır.

$$WR = \frac{\Delta m}{S \cdot \rho \cdot F} \quad (1)$$

Formülde, WR; spesifik aşınma oranını,  $\Delta m$ ; test öncesi ve sonrası hassas terazide ölçülen numunenin malzeme kaybı, S ise kayma yolunu,  $\rho$  numunenin yoğunluğunu, F ise normal yükü ifade etmektedir. Herbir aşınma deneyi öncesinde numunelerin pim ağırlığı ( $m_1$ ) ve aşınma deneyi sonrası pim ağırlığı ( $m_2$ ) 0,0001 g hassasiyetli hassas terazi kullanılarak ölçülmüş ve ağırlık kaybı  $\Delta m$  yani ( $m_1 - m_2$ ) tespit edilmiştir. Formül kullanılarak spesifik aşınma oranı hesaplanmıştır.

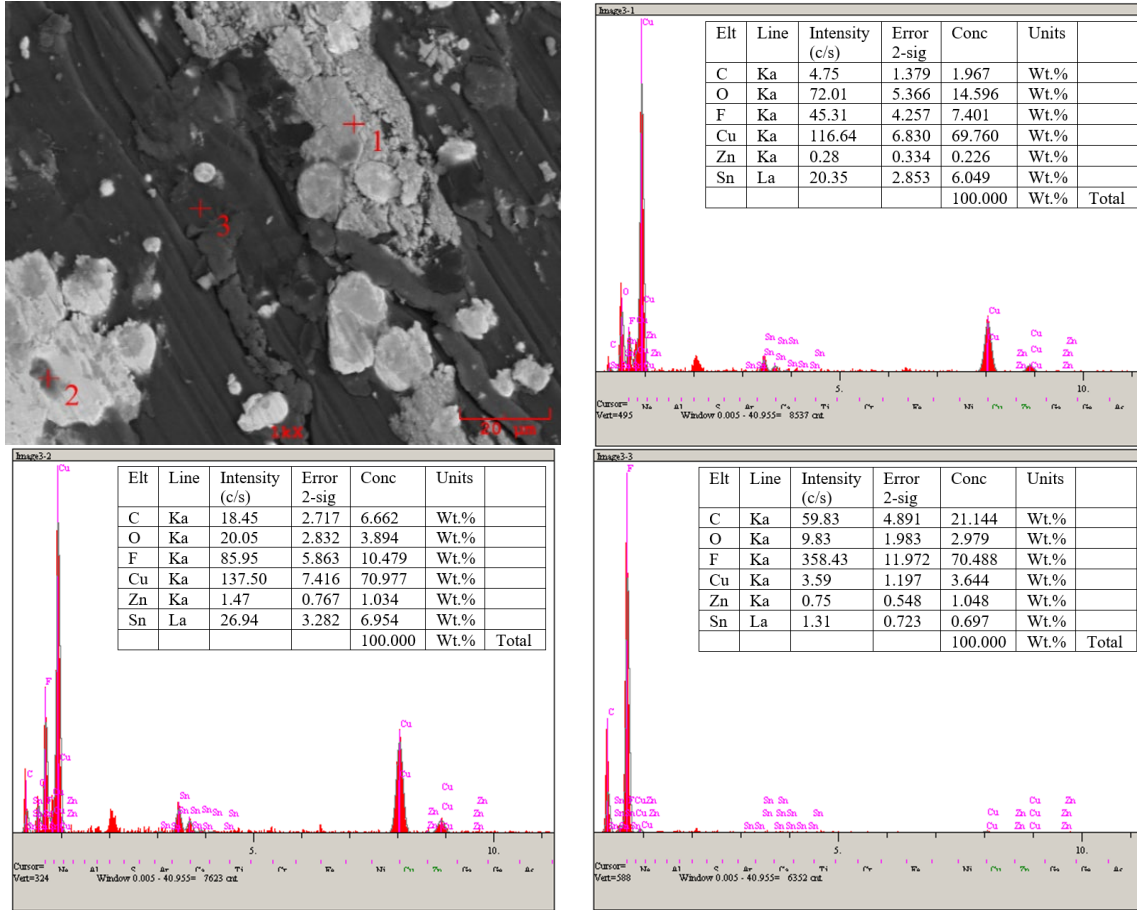
### 3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Şekil 3'te saf PTFE polimerine ait taramalı elektron mikroskobunda alınan kırık yüzey görüntüsü ile EDS analizi sonuçları verilmiştir. Şekilde PTFE polimerinin tipik aşınma yüzey görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3. Saf PTFE polimerinin kırık yüzey SEM mikroyapı görüntüsü ve EDS analizi

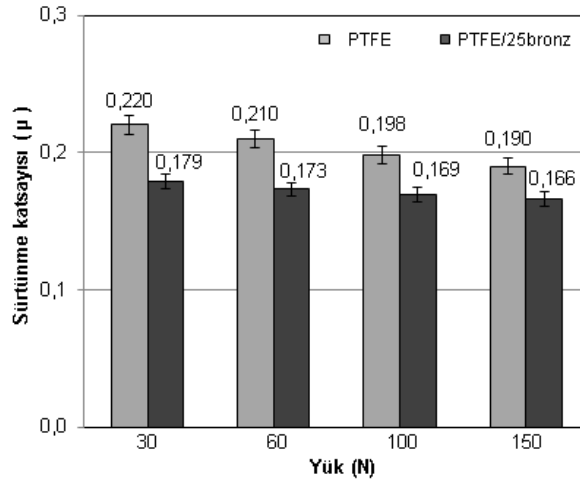
EDS analiz sonucu incelendiğinde yapıda mevcut olan karbon (C) ve oksijen (O) atomlarının yanında ağırlıkça %84,2 oranında Flor (F) elementi bulunmaktadır. Flor elementi PTFE polimerinin yapısında bulunan elementtir. Yani flor elementi malzemenin PTFE polimeri olduğunun kanıtıdır. Şekil 4'te ise %25 bronz katkılı PTFE polimer kompozitinin aşınma yüzeyi SEM görüntüsü verilirken aynı zamanda yüzeyden farklı noktalardan alınan EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizine göre PTFE/25Bronz kompozitinde C, O ve F atomları yanında bronzun kimyasal yapısını oluşturan bakır (Cu) ve kalay (Sn) elementlerinin de bulunduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.** %25 bronz katkıli PTFE polimer kompozitinin SEM mikroyapısı ve EDS analizi

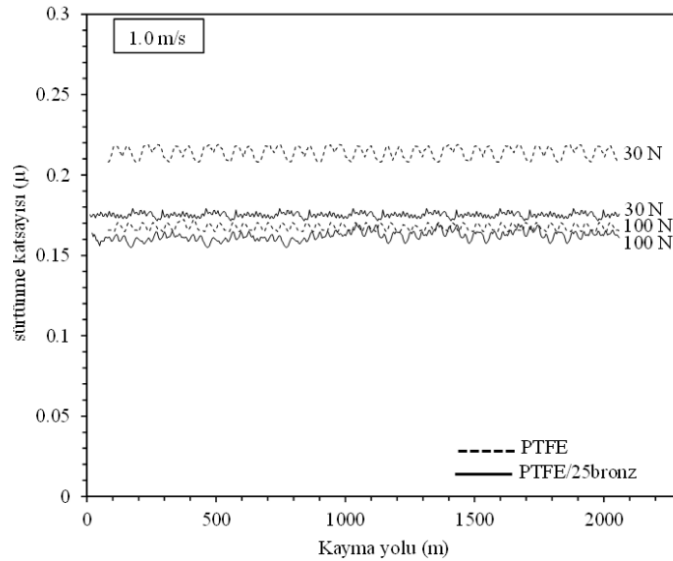
Saf PTFE polimeri ve %25 bronz katkıli PTFE polimer kompozitinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi artan yük ile sürtünme katsayısı azalmıştır. Uygulanan yükün 30 N'dan 150 N'a artırılması ile saf PTFE polimerinin sürtünme katsayısı %15,7 oranında azalarak 0,22 değerinden 0,19 değerine ulaşmıştır. Benzer bir etki PTFE/25Bronz kompozit numunesinde elde edilmiş olup sürtünme katsayısı %7,83 oranında azalarak 150 N'da 0,166 olarak elde edilmiştir. Saf PTFE polimerine ilave edilen bronz katkısı ise sürtünme katsayısını önemli oranda azaltmasına sebep olmuştur. Bu azalma, 30 N yük altında %22,9, 60 N yük altında %21,3, 100 N yük altında %17,1 ve 150 N yük altında %14,4 oranında gerçekleşmiştir. Uygulanan yük aralıklarında en düşük sürtünme katsayısı 150 N yük altında PTFE/25Bronz kompozitinde elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı ise 30 N yük altında katkısız PTFE polimerinde elde edilmiştir. Vaibhav ve arkadaşları [17] uygulanan yük ve kayma hızı aralıklarında PTFE kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkısız PTFE polimerinden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Uygulanan basıncın artması ile tüm numunelerde spesifik aşınma oranının arttığı belirtilmiştir. Katkısız PTFE polimerinin düşük mekanik özelliklere sahip olduğu, yüksek aşınma ile karakterize edildiği katkı ve dolgu maddeleri ilavesi ile üretilen kompozitlerin aşınma oranı ve sürtünme

katsayısında önemli bir azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Amante ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada [18] genel olarak, hem bronz hem de poli-eter-eter-keton (PEEK) dolgulu kompozitlerin kararlı durum sürtünme katsayılarının, cam elyaf ve karbon elyaf katkılı kompozitlere göre karşı yüzeyin topoğrafyasına daha az bağımlı olduğu belirtilmiştir.



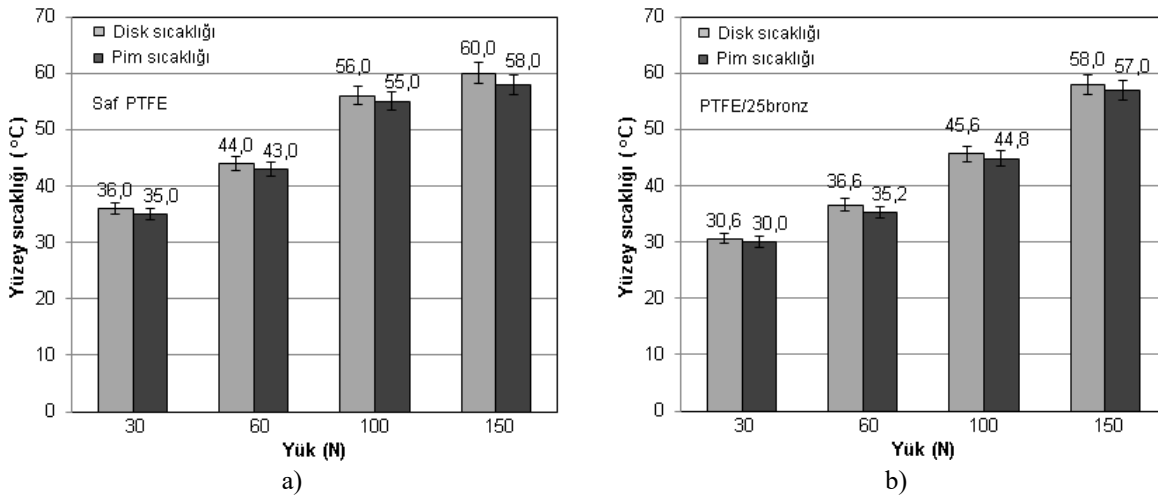
Şekil 5. Saf PTFE polimeri ve %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı değişimi

Şekil 6'da saf PTFE polimeri ile PTFE/25bronz kompozitin 30N ve 100N yükler altında ve 1,0 m/s kayma hızındaki kayma yolu-sürtünme katsayısı ilişkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi bronz katkılı PTFE kompozitin sürtünme katsayıları saf PTFE polimerinin sürtünme katsayılarına göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Hem saf PTFE polimer hem de bronz katkılı PTFE kompoziti çok kısa sürede stabil hale gelmiştir. PTFE polimeri yumuşak olduğu için test başladığında çok hızlı aşınarak PTFE partikülleri çelik disk yüzeyindeki pürüzlülükleri hızlıca doldurarak ince bir film tabakası oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durumun PTFE ve PTFE kompozitin sürtünme katsayılarının daha düşük çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. Saf PTFE polimeri ile %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitin kayma yolu-sürtünme katsayısı ilişkisi

Şekil 7-a'da 1,0 m/s kayma hızında, saf PTFE polimerinin temas noktasından alınan pim ve disk yüzey sıcaklık değerleri verilmiştir. Beklenildiği gibi hem pim hem de disk yüzey sıcaklıkları artan yük ile birlikte doğrusal olarak artmıştır. Disk yüzey sıcaklığı 30 N yük altında 36 °C civarında iken 60, 100 ve 150 N yük altında sırası ile 44, 56 ve 60 °C olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde pim yüzey sıcaklıkları da yüke bağlı olarak 35 °C'den 58 °C'ye kadar artmıştır. Uygulanan yüke bağlı olarak saf PTFE polimerinin pim ve disk yüzey sıcaklıkları ortalama %65 civarında artmıştır. Şekil 7-b'de ise PTFE/25bronz kompozitin temas noktasından elde edilen pim ve disk yüzey sıcaklıkları verilmiştir. Şekil 5b'de PTFE/25bronz kompozitin pim ve disk yüzey sıcaklıkları artan yük ile birlikte arttığı ve yüzey sıcaklık değerlerinin 30 °C ile 58 °C arasında değiştiği gözlenmiştir. Uygulanan yükün 30 N'dan 150 N'a artırılması ile pim sıcaklığı %65,7 oranında disk sıcaklığı ise %90 oranında artmıştır. 100 N yük altında, saf PTFE polimerine ilave edilen %25 oranındaki bronz katkısı temas noktasındaki pim ve disk yüzey sıcaklıklarının ortalama %22 oranında azalmasına sebep olmuştur.

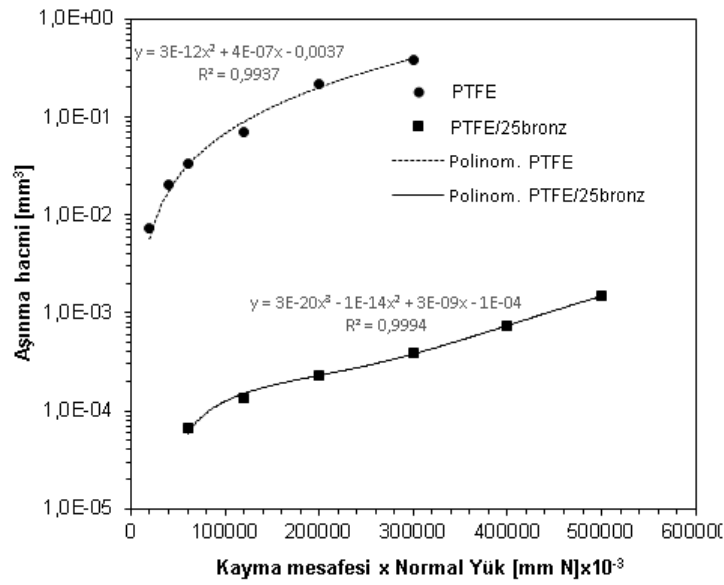


Şekil 7. a) Saf PTFE polimerinin ve b) PTFE/25bronz kompozitin farklı yükler altındaki pim ve disk yüzey sıcaklığı değişimi (Kayma hızı: 1.0m/s)

Şekil 8'de saf PTFE polimeri ile %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitinin kayma mesafesi  $x$  yüke bağlı olarak aşınma hacmi sonuçlarının değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kayma mesafesi  $x$  yük değişimine bağlı olarak aşınma hacmi doğrusal olarak artmıştır. Saf PTFE polimerinde başlangıçta aşınma hacmi hızla artış gösterirken daha sonra lineer olarak artış göstermiştir. Saf PTFE polimeri için eğrinin korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,9601 olarak belirlenirken PTFE/25bronz kompozitinin eğrisi için ise 0,9592 olarak elde edilmiştir. PTFE'ye ilave edilen bronz gibi dolgu maddelerinin, matris malzeme yüzey altı çatlaklarının yayılmasını azalttığı ve normal yükün bir kısmının katı dolgu maddesine aktarıldığı bilinmektedir [19]. Tribolojik özellikleri uygulanan yük ve kayma hızının yanında etkileyen diğer önemli bir parametre ise çelik disk yüzeyin yüzey pürüzlülüğüdür [20-21]. Yüzey pürüzlülüğünü karakterize etmek için en çok tercih edilen parametre ortalama yüzey pürüzlülüğü değerini ifade eden  $R_a$ 'dır. Menezes ve arkadaşları [22] sürtünme katsayısının yüzey pürüzlülüğü ile önemli oranda değişmediğini belirtmişlerdir. Ancak Zeynep ve arkadaşlarının [21] yaptıkları çalışmada karşı yüzey pürüzlülüğünün normal yük ve kayma hızı koşullarında sürtünme katsayısını etkilediğini ve yüzey pürüzlülüğü düşük olan disklerin sürtünme katsayısının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun ise düşük yüzey pürüzlülüğü durumunda gerçek temas alanının artmasıyla ilişkili olabileceğini belirtmişlerdir. Lloyd ve Noel [23], çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin (ÇYMAPE) paslanmaz çeliğe ( $R_a:0,1-1,0 \mu m$ ) karşı çalıştığı durumda, disk yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte sürtünme ve aşınmanın arttığını bildirmişlerdir. Golchin ve arkadaşları [24] ise  $R_a:0,08-0,55 \mu m$  yüzey pürüzlülüğüne sahip Inconel 625'e karşı kayan polifenilen sülfid (PPS) kompozitlerin performansı üzerinde karşı yüzey topografyasının etkisini araştırmışlar ve yüksek pürüzlü yüzeyler için daha düşük bir sürtünme katsayısı gözlemlemişlerdir. Quaglini ve arkadaşları [25] tribolojik özelliklerin



malzemenin özelliklerine bağlı olduğunu ve daha düşük elastiklik modülüne sahip daha yumuşak polimerlerin çok pürüzsüz yüzeylerde (Ra: 0,05-0,10  $\mu\text{m}$ ) daha iyi kayma performansı sergilediğini, yüksek elastik modüle sahip polimerlerin yüksek pürüzlü (Ra:0,10–0,30  $\mu\text{m}$ ) karşı yüzeylerde daha düşük sürtünme gösterdiğini belirtmişlerdir. Karşı disk yüzey pürüzlülüğünün polimerlerin aşınma davranışını ise farklı mekanizmalar ile etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Zsidai ve arkadaşları [26] daha pürüzlü yüzeylerle karşılaştırıldığında pürüzsüz yüzeylerde daha düşük aşınma gözlemlemişlerdir. Giltrow ve Lancaster [27] transfer film tabakasının yüzey vadilerini doldurarak karşı yüzeyin yüzey pürüzlülüğünü azalttığını öne sürmüşlerdir. Bu durumun, polimer kompozitteki katkıların/fiberler üzerindeki lokal gerilimlerin büyüklüğünü azalttığını ve yorulma davranışının iyileşerek aşınma oranlarının azalmasına katkı sağladığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda, transfer film tabakasının en yüksek yüzey pürüzlülük seviyelerini doldurabileceği kritik bir yüzey pürüzlülüğünün mevcut olduğu ve pürüzlü yüzeylerin film tabakası ile dolması durumunda dahi temas yüzeylerinde bir aşındırıcının olabileceği ve aşınma mekanizmasını etkileyebileceği belirtilmiştir [27-28].

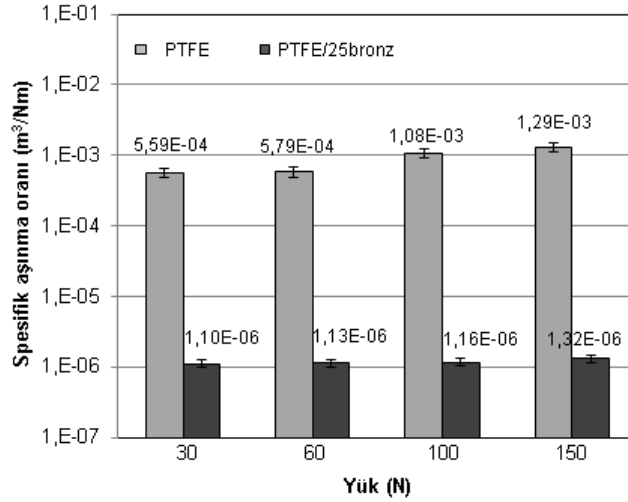


**Şekil 8.** Saf PTFE polimeri ve %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitinin farklı yükler altındaki aşınma hacmi değişimi

Şekil 9'da ise saf PTFE polimeri ile %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitinin farklı yükler altındaki aşınma oranı değişimi verilmiştir. Saf PTFE polimerinin spesifik aşınma oranı  $10^{-4}$ - $10^{-3}$   $\text{m}^3/\text{Nm}$  elde edilirken PTFE/25bronz kompozitinin spesifik aşınma oranı  $10^{-6}$   $\text{m}^3/\text{Nm}$  elde edilmiştir. Saf PTFE polimerinin yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranı önemli oranlarda artmıştır. Bu artış yükün 30 N'dan 150 N'a çıkarılması ile %130,7 oranında gerçekleşmiştir. PTFE/25Bronz kompozitinde ise yükün artması ile birlikte spesifik aşınma oranı %20 oranında artmıştır. Saf PTFE polimerine ilave edilen %25 oranındaki bronz katkı kompozitinin spesifik aşınma oranını 30 ve 60 N yükler altında ortalama 50 kat, 100 ve 150 N yükler altında ise ortalama 95 kat azaltmıştır. En yüksek spesifik aşınma oranı 150 N yük altında saf PTFE polimerinde elde edilirken en düşük spesifik aşınma oranı ise 30 N yük altında PTFE/25bronz kompozitinde elde edilmiştir. Bronz katkı maddesinin PTFE polimerine ilave edilmesi, PTFE polimer kompozitinin aşınma direncini artırmıştır. Bunun sebebinin PTFE matris bünyesinde gömülü olan ve kompozite ilave dayanım kazandıran bronz katkının varlığı nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Çalışılan ortam şartları altında, bronz katkılı PTFE kompozitlerin karbon ve grafit katkılı PTFE kompozitlere göre aşınma oranının daha düşük olduğu yani en iyi aşınma direncine sahip olduğu belirtilmiştir. Kayma sırasında uygulanan yükün ilk olarak bronz katkı tarafından taşındığı ve sonra matris malzeme olan PTFE polimerinin disk üzerinde ince bir yağlayıcı film oluşturarak aşınma direncinin arttığı belirtilmiştir [5]. Federica ve arkadaşları [29] polimer malzemelerin aşınma oranının

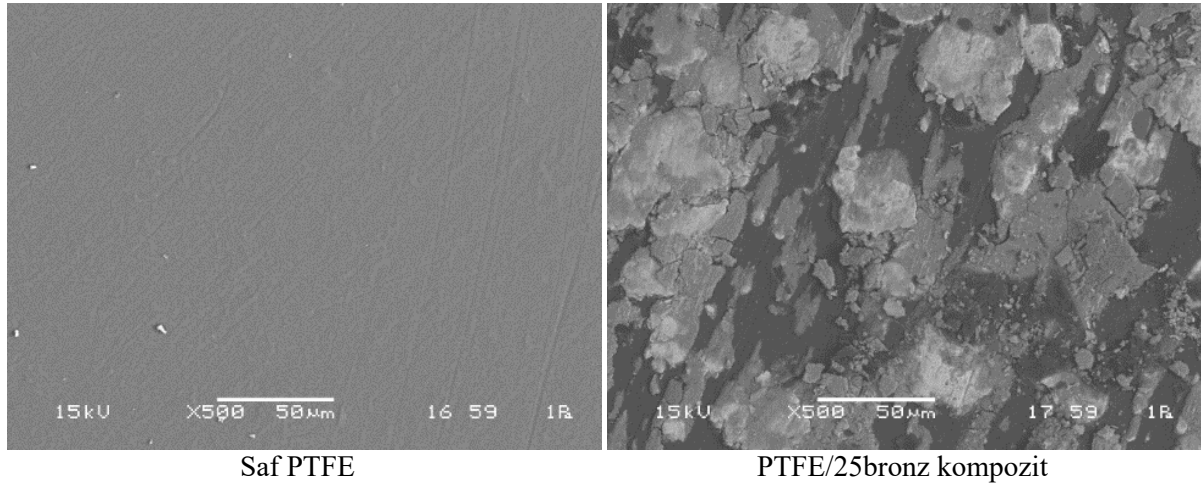


seçilen dolgu malzemesinin sertliğinden ziyade dolgu malzemesinin karşı yüzey ile kimyasal afinitesine ve dolgu malzemesinin tribolojik temas esnasında kararlı bir tribo-film oluşturma yeteneğine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu belirtmişlerdir.



**Şekil 9.** Saf PTFE polimeri ve %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitin farklı yükler altındaki aşınma oranı değişimi

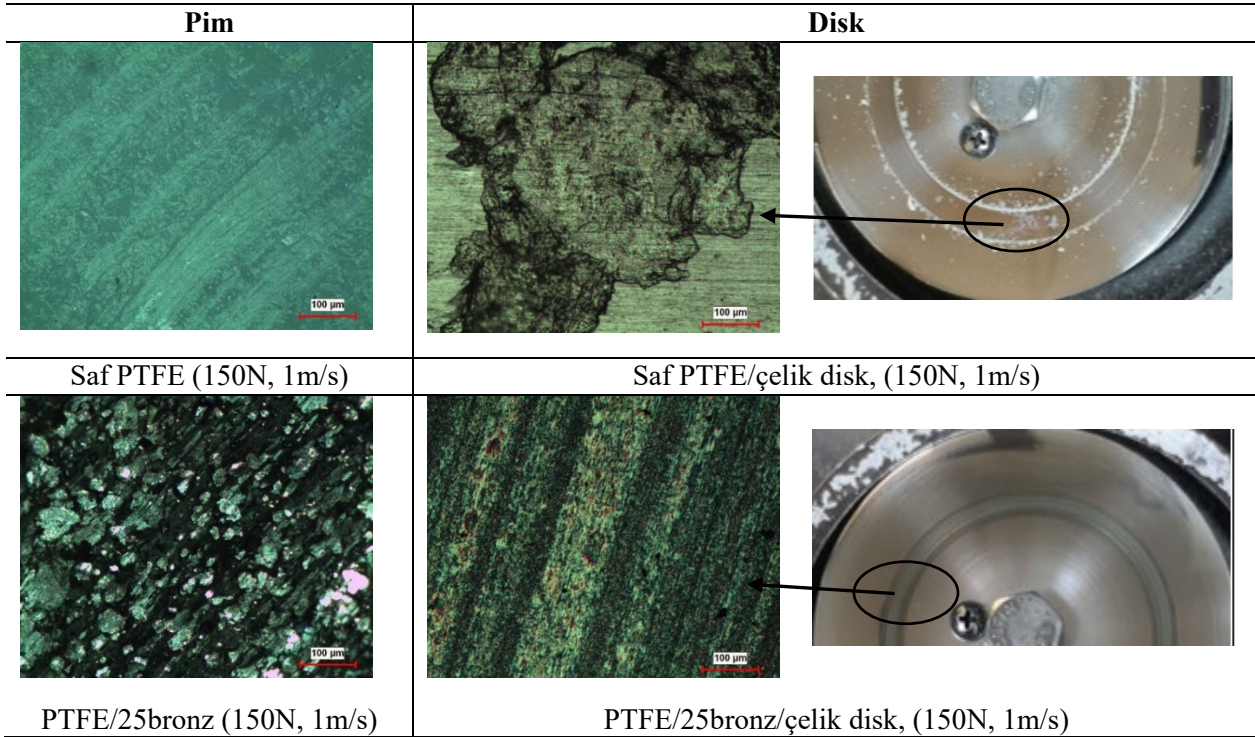
Şekil 10'da 150N yük altında ve 1,0 m/s kayma hızında saf PTFE polimeri ile %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitin aşınmış yüzeylerinden alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 10.** Saf PTFE polimeri ve %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitin 150 N yük ve 1,0 m/s kayma hızındaki aşınma yüzey taramalı elektron mikroskobu mikroyapı görüntüsü

Şekil 11'de ise aynı yük ve kayma hızındaki AISI 304 paslanmaz çelik disk aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. SEM ve optik mikroskop pim resimlerinde görüldüğü gibi saf PTFE polimerinde kayma yönünde ince ve çok sayıda oyuk adı verilen aşınma izlerinin oluştuğu gözlenmiştir. PTFE/25Bronz kompozit numunesine ait pim resimleri değerlendirildiğinde ise aşınma izlerinin bronz katkı üzerinde oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum bronz katkının uygulanan yükü taşıdığı ve yükün bronz katkı üzerinden ana matrise aktarıldığının göstergesidir. Saf PTFE polimeri ve PTFE/25bronz kompozitine ait makro-disk ve mikro-disk resimleri incelendiğinde disk yüzeylerinde ince bir transfer

film tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu transfer film tabakası saf PTFE polimerinde belirli bölgelerde şekillenirken PTFE/25bronz kompozitinde tüm yüzeyde oluştuğu gözlenmiştir. Saf PTFE polimerinde aşınma partikülleri adı verilen ve disk yüzeyine yapışmayan partiküllerin de oluştuğu gözlenmiştir. PTFE esaslı polimer kompozitlerde polimer kompozitin sürtünme yüzeyindeki ve çelik karşı disk yüzeyindeki transfer film tabakasının aşınmanın ve sürtünme katsayısının azaltılmasında önemli ölçüde rol oynadığı yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [5, 9]. Genel olarak değerlendirildiğinde, transfer film tabakasının varlığı ve aşınmış yüzeyin pürüzsüzlüğü, aşınma mekanizmasının deformasyon ve yapışma mekanizmalarını içerdiğini doğrulamaktadır.



**Şekil 11.** Saf PTFE polimeri ve %25 bronz takviyeli PTFE polimer kompozitin 150 N yük ve 1,0 m/s kayma hızındaki aşınma yüzey optik mikroskop mikroyapı görüntüsü

#### 4. Sonuçlar

Yapılan aşınma ve sürtünme deney çalışmalarından aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1. PTFE ana matrisine %25 oranında ilave edilen bronz katkısı PTFE/25bronz kompozitinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranda önemli derecede azalmaya sebep olmuştur.
2. Sürtünme katsayısı uygulanan yüke bağlı olarak değişmektedir. Ancak saf PTFE ile kıyaslandığında
3. PTFE/25bronz kompozitinin ortalama sürtünme katsayısı yaklaşık %18.9 oranında daha düşük tespit edilmiştir.
4. Uygulanan yükün 30N'dan 150N'a artırılması ile spesifik aşınma oranı artmıştır. Bu artış oranı saf PTFE polimerinde yaklaşık %130.7 oranında olurken PTFE/25bronz kompozitinde ise aşınma oranı yaklaşık %20 oranında olmuştur.
5. Saf PTFE polimerine %25 oranında bronz partikülleri ilavesi sonucunda kompozitin aşınma direnci saf PTFE ye göre yaklaşık 75 kat artmıştır.

6. PTFE ve PTFE/25bronz kompozitin pim yüzey sıcaklıkları maksimum 57-58 °C olarak tespit edilmiş olup saf PTFE polimerinin camsı geçiş sıcaklığının (~130 °C) altında olduğu tespit edilmiştir.
7. Saf PTFE polimerinde abrazyon aşınma mekanizması gözlenirken PTFE/25bronz kompozitinde adhezyon aşınma mekanizması gözlenmiştir.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

### Teşekkür

Bu çalışma Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında 008-2020 proje no ile desteklenmiş olup Yazarlar ilgili Kuruma teşekkür eder.

### Kaynaklar

- [1] Burkarter E, Saul CK, Thomazi F, Cruz NC, Roman LS, Schreiner WH. Superhydrophobic electrosprayed PTFE. *Surface and Coatings Technology* 2007; 202(1): 194–198.
- [2] Pansare PD, Bajaj DS, Aher VS. Tribological behavior of PTFE composite material for journal bearing. Novateur Publication's, *International Journal of Innovation in Engineering, Research and Technology (IJERT)*, Icdtceme'15 Conference Proceedings 2015; 1-5.
- [3] Jadhav MB, Abhang LB. Tribological investigation of PTFE filled composite with varying percentage of MoS<sub>2</sub> in bearing application. *International Journal of Advanced Research in Science & Technology (IJARST)* 2020; 20(3): 20-34.
- [4] Yuan XD, Yang XJ. A study on friction and wear properties of PTFE coatings under vacuum conditions. *Wear* 2010; 269: 291–297.
- [5] Ye S, Zeng X. Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures. *Tribology Transactions* 2014; 57(3): 382-386.
- [6] Yavuz K. Role of reinforcement materials on mechanical and tribological properties of PTFE composites. *Polymer Korea* 2020; 44(4): 436-444.
- [7] Xia Z, Wedel A, Danz R. Charge storage and its dynamics in porous polytetrafluoroethylene (PTFE) film electrets. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 2003; 10: 102–108.
- [8] Mohammad JK, Wani MF, Rajat G. Tribological properties of bronze filled PTFE under dry sliding conditions and aqueous environments (distilled water and sea water). *International Journal of Surface Science and Engineering* 2018; 12(5/6): 348-364.
- [9] Tatyana SS, Andrey PV, Aitalina AO, Sakhayana ND, Aleksey GA. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites modified by carbon fibers and zeolite. *Lubricants* 2022; 10: 4.
- [10] Zhen J, Han Y, Wang H, Jiang Z, Wang L, Huang Y, Jia Z, Zhang R. High temperature friction and wear behavior of PTFE/MoS<sub>2</sub> composites. *Lubricants* 2023; 11: 312.
- [11] Daspute D, Randhavan BM. The tribological properties of ptf composite filled with carbon fiber, MoS<sub>2</sub>, bronze reinforcement. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 2023; 10(5): 1697-1601.

- [12] Avinash BA, Nimbalkar SR, Kharde RR, Mhaske MS, Tribological investigation of bronze filled PTFE composite material for journal bearing application. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education* 2016; 2(5): 584-589.
- [13] Khan MJ, Wani MF, Rajat G. Tribological properties of glass fiber filled polytetrafluoroethylene sliding against stainless steel under dry and aqueous environments: enhanced tribological performance in sea water. *Materials Research Express* 2018; 5: 055309.
- [14] Pathan F, Hemant G, Sonam G. Optimization for tribological properties of glass fiber-reinforced PTFE composites with grey relational analysis. *Journal of Materials* 2016; 8981746.
- [15] Şahin Y, Mirzayev H. Wear characteristics of polymer-based composites. *Mechanics of Composite Materials* 2015; 51(5): 543-554.
- [16] Raaj KRA, Sriram S, Harikiran RR, Yenugadhati PD. Experimental investigation on influence of molybdenum content on tribological properties of hybrid PTFE composite. *Emerging Trends in Mechanical Engineering, AIP Conf. Proc.* 2018; 2080: 020017-1–020017-7.
- [17] Vaibhav VN, Bhuibhar AG, Sonwane SA, Raka VB. Tribological behaviour of PTFE and its composites. *Journal of Advances in Science and Technology* 2017; 13(01): 259-266.
- [18] Amenta F, Bolelli G, Pedrazzi S, Allesina G, Santeramo F, Bertarini A, Sassatelli P, Lusvarghi L. Sliding wear behaviour of fibre-reinforced PTFE composites against coated and uncoated steel. *Wear* 2021; 486–487: 204097.
- [19] Tanaka K, Kawakami S. Effect of various fillers on the friction and wear of polytetrafluoroethylene-based composites. *Wear* 1982; 79: 221–234.
- [20] Maria R, Kim B, Fredrik F, Ilia R, Jens H. Influence of counter surface roughness and lay on the tribological behaviour of self-lubricating bearing materials in dry sliding conditions at high contact pressures. *Lubricants* 2022; 10: 167.
- [21] Zeynep P, Shahrad S, Vedat T. The effect of counter-face roughness on the tribological behavior of filled and unfilled PTFE. *Journal of Mechanics Engineering and Automation* 2015; 5: 609-615.
- [22] Menezes, PL, Kishore, Kailas, SV. Influence of surface texture and roughness parameters on friction and transfer layer formation during sliding of aluminum pin on steel plate. *Wear* 2009; 267: 1534-49.
- [23] Lloyd AIG, Noel REJ. The effect of counterface surface roughness on the wear of UHMWPE in water and oil-in-water emulsion. *Tribology International* 1988; 21: 83–88.
- [24] Golchin A, Friedrich K, Noll A, Prakash B. Influence of counter surface topography on the tribological Behaviour of carbon-filled PPS composites in water. *Tribology International* 2015; 88: 209–217.
- [25] Quaglini V, Dubini P, Ferroni D, Poggi C. Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications. *Materials and Design* 2009; 30: 1650–1658.
- [26] Zsidai L, de Baets P, Samyn P, Kalacska G, van Parys AP. The tribological behaviour of engineering plastics during sliding friction investigated with small-scale specimens. *Wear* 2002; 253: 673–688.
- [27] Giltrow JP, Lancaster JK. The role of the counterface in the friction and wear of carbon fibre reinforced thermosetting resins. *Wear* 1970; 16: 359–374.
- [28] Song J, Liu X, Zhao G, Ding Q, Qiu J. Effect of surface roughness and reciprocating time on the tribological properties of the polyimide composites. *Polymer Engineering and Science* 2019; 59: 483–489.
- [29] Federica A, Giovanni Bolelli, D’Errico F, Filippo O, Simone P, Giulio A, Alessandro B, Pietro P, Luca L. Tribological behaviour of PTFE composites: Interplay between reinforcement type and counterface material. *Wear* 2022; 510-511: 204498.