



BRONZ KATKILI POLİ-TETRA-FLOR-ETİLEN (PTFE) KOMPOZİTLERİN PASLANMAZ ÇELİK MALZEMEYE KARŞI AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARI

Hüseyin ÜNAL^{1*}, Salih Hakan YETGİN², Bayram POYRAZ³

¹Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Esentepe kampüsü, SAKARYA, unal@sakarya.edu.tr

²Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Simav, KÜTAHYA, shyetgin@gmail.com

³Düzce Üniversitesi, Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama Merkezi, Konuralp Yerleşkesi, DÜZCE,

Geliş Tarihi: 11.11.2014

Kabul Tarihi: 05.01.2015

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, katkısız poli-tetra-flor-etilen (PTFE) polimeri ile %25 bronz katkılı PTFE kompoziti ve %40 bronz katkılı PTFE kompozitlerin, kuru kayma şartları altında paslanmaz çelik malzemeye karşı tribolojik performansları incelenmiştir. Tribolojik testler, pim-disk aşınma cihazında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma ve sürtünme testleri, 50N, 100N ve 150N yüklerde ve 1.0, 1.5 ve 2.0m/s kayma hızlarında yapılmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre, %40 bronz katkılı PTFE kompozitinin sürtünme katsayısı değerleri ile spesifik aşınma oranı değerlerinin katkısız PTFE ve %25 bronz katkılı PTFE'ye göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. PTFE ve bronz katkılı PTFE kompozitlerinin aşınma yüzeylerini incelemek için optik mikroskop kullanılmıştır. Bronz katkılı PTFE kompozitlerin aşınma mekanizması adhezif ve abrazif aşınma şeklinde gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Poli-tetra-flor-etilen, bronz, triboloji, katkı, aşınma, sürtünme.*

FRICION AND WEAR PROPERTIES OF BRONZE FILLED POLY-TETRA-FLUORO-ETHYLENE (PTFE) COMPOSITES AGAINST STAINLESS STEEL

ABSTRACT

In this work, tribological performance of pure poly-tetra-fluoro-ethylene (PTFE), 25%bronze filled PTFE composite and 40%bronze filled PTFE composite sliding against stainless steel under dry sliding environment were studied. A pin-on-disc tribometer is used for evaluating the friction and wear behavior of PTFE polymer and its composites. The tribological tests were conducted at applied loads of 50N, 100N, and 150N and at sliding speeds of 1.0, 1.5 and 2.0 m/s. The results show that the PTFE+40wt.% bronze composite is the best tribological behavior. As a result of study, the coefficient of friction and specific wear rate of PTFE composite were reduced by the addition of bronze filler. Finally, an optical microscope was used to examine the wear mechanism of pure PTFE and PTFE composites with bronze filler.

Keywords: *poly-tetra-fluoro-ethylene, bronze, tribology, filler, wear, friction.*

1. GİRİŞ

Polimer kompozitler çok çeşitli özellikleri ve göreceli olarak kolay değiştirilebilmelerinden dolayı çok çeşitli amaçlar için yaygın olarak kullanılırlar [1]. Poli-tetra-flor-etilen, kendinden yağlama, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklıkta kararlılık ve kimyasal direnç gibi özelliklerinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılan bir yüksek performanslı mühendislik plastiğidir. Aslında PTFE, makine parçalarında erken yorulmaya ve sızıntı problemlerine yol açan zayıf aşınma ve abrazyon direncine sahiptir. Bu problemi minimize etmek için, çeşitli uygun dolgular ve katkıları PTFE polimerine eklenir. Genel olarak cam elyaf ve karbon elyaf gibi mukavemet artırıcılar ve katı yağlayıcılar PTFE'ye eklenmek suretiyle mukavemet ve aşınma direnci artırılır [2]. Bu alandaki birçok çalışmada, polimerlerin cam, karbon ve aramid elyaflarla takviye edildiğinde sürtünme katsayısının düşürülebileceği ve aşınma direncinin artırılacağı belirtilmiştir [3-4].

Polimerlere farklı katkıları ilave edilerek aşınma direncini geliştirmek ve sürtünme katsayısını azaltmak için birçok çalışma yapılmış ve literatürde yayınlanmıştır. Bu konularda çalışanlardan Khedkar ve arkadaşları [5] katkısız PTFE polimeri ile karbon partikülleri, grafit ve E tipi cam elyaf gibi dolgu ve takviye edici malzemeleri üreterek, PTFE kompozitlerinin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Kullanılan tüm dolgu ve takviye edicilerin polimer kompozitlerin aşınma direncini artırdığı, en yüksek aşınma direncinin ise hacimce %18 karbon ve %7 grafit içeren hibrit kompozit malzemede elde ettiklerini belirtmişlerdir. Unal ve arkadaşları [2] ağırlıkça cam elyaf (%17), bronz (%25) veya karbon (%35) dolgulu PTFE kompozitlerini çalışmışlardır. Katkısız PTFE ve PTFE kompozitlerinin, sürtünme katsayılarının artan yüklerle birlikte artış gösterdiğini **ancak** kayma hızının artışından fazla etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Cam elyaf, bronz ve karbon dolguların PTFE polimer matrisine eklenmesinin, aşınma oranını düşürmede etkili olduğunu, sürtünme katsayısında ve aşınma oranında en fazla azalmanın ise PTFE+%17 cam elyaf kompozitinde elde ettiklerini belirtmişlerdir. Pasha ve arkadaşları [6] %25 cam partikülleri ve %40 bronz partiküllerinin, PTFE tabanlı kompozitlerin aşınma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarda, artan yük ve kayma hızıyla birlikte ağırlık kaybının arttığını belirtmişlerdir. PTFE+%40 bronz kompozitinin, diğer kompozitlere kıyasla daha iyi aşınma direnci sergilediğini, PTFE+%40 bronz ile çalışan karşıt parça yüzeyinde pürüzsüz, ince ve homojen transfer film oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Goyal ve Yodav [7] ağırlıkça %2, 5 ve 10 oranında grafit katkılı PTFE kompozitlerinin aşınma oranı ve sürtünme katsayısını değerlendirmişlerdir. Katkısız PTFE'ye göre, kompozitlerin aşınmasında önemli bir düşüş gözlemlemişlerdir. %5 ve %10 grafit katkılı PTFE kompozitlerin, aşınma oranlarını katkısız PTFE polimerine göre sırasıyla 22 ve 245 kez düşürdüğünü belirtmişlerdir. Aşınma oranındaki bu düşmeyi, karşıt parça yüzeyinde ince ve kararlı film oluşumuna atfetmişlerdir. Unal ve arkadaşları [8] ise katkısız PTFE ve bronz (%25, 40 ve 60) katkılı polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Katkısız PTFE ile karşılaştırıldığında en düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncini bronz katkılı PTFE kompozitinde elde ettiklerini belirtmişlerdir. Bagale [9] kuru kayma koşulları altında PTFE ve dolgu malzemesi olarak karbon ve bronz katkılı PTFE kompozitlerinin tribolojik davranışlarını çalışmışlardır. PTFE'ye yapılan bronz ve karbon gibi katkıların aşınma direncinde artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek aşınma direncinin ise karbon dolgulu PTFE polimer kompozitinde elde ettiklerini vurgulamışlardır. Raka [10] yaptığı çalışmada uygulanan yük, kayma hızı ve kayma zamanının PTFE polimer ve %25 karbon dolgulu PTFE ile %60 bronz dolgulu PTFE kompozitlerinin aşınma ve sürtünme davranışlarına olan etkisini çalışmışlardır. Katkısız PTFE matrisine dolgu eklemenin iki kompozit için de aşınma oranını düşürücü etki yaptığını, en iyi aşınma performansının %25 karbon dolgulu PTFE polimer kompozitinde elde edildiğini belirtmişlerdir. Chaudhari ve Shekhawat [11] çalışmalarında, uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesinin, sulu kayma

koşulları altında, katkısız PTFE ile %25 bronz, %25 cam elyaf ve %25 karbon gibi dolgu malzemeleri ile dolgulu PTFE kompozitlerinin sürtünme ve aşınması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, bronz, cam elyaf ve karbon gibi dolgu malzemelerinin PTFE'e ilave edilmesinin, aşınma direncinde artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir. Aşınma direncini geliştirmede en etkili katkının ise karbon siyahı dolgusu olduğunu vurgulamışlardır. Li ve Ran [12] çalışmalarında cam/karbon elyaf takviyeli PTFE kompozitlerinin mekanik ve abrazif davranışlarını incelemişlerdir. Ölçülen aşınma hacim kaybının, hem kayma mesafesinin hem de yükün artmasıyla artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. En düşük aşınma oranını karbon fiber takviyeli PTFE kompozitinde elde ettiklerini vurgulamışlardır. Tevrüz [13] yaptığı çalışmada kayma mesafesinin, uygulanan basıncın, sürtünme katsayısının ve aşınma hızının, %60 bronz katkılı PTFE kompozitinden üretilen mil yatağının aşınma ve sürtünme davranışları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Uygulanan yükün artmasıyla, kompozitin aşınma oranında artış gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Demirci ve Düzcükoğlu [14] yaptıkları çalışmada, katkısız PA66, PA66+%18PTFE ve PA66+%20GF+%25PTFE kompozitlerinin sürtünme ve aşınma davranışlarında kayma hızının, uygulanan basıncın ve sıcaklığın etkilerini araştırmışlardır. Aşınma deneyleri, oda sıcaklığında, 0,5 m/s ve 1 m/s kayma hızları, 100N ve 200N yük altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yükün artışıyla birlikte, PTFE tarafından karşıt yüzeyde oluşan transfer film tabakasının sürekli olarak dağılması ve film kalınlığında artış sağlanamadığını vurgulamışlardır. Dolayısıyla yükün artmasıyla birlikte, PTFE içeren kompozitlerin spesifik aşınma oranlarında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Eş zamanlı olarak, kayma hızının artmasıyla, spesifik aşınma oranlarında artış gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Spesifik aşınma oranlarında meydana gelen artışın sebebini, kayma hızının artışıyla yüzey sıcaklığının artması ve disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakasını parçalamasıyla açıklamışlardır. Franke ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [15] PTFE katkılı PA6, PA66 ve PA12 kompozitlerinin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Aşınma testleri, ring-on-blok cihazı kullanılarak, 100Cr6 ve C45 çeliğine karşı; 0,5, 0,65 ve 1 m/s kayma hızı ve 50 ile 250N arası yüklerde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, kompozitlerdeki PTFE içeriği arttıkça kompozitlerin spesifik aşınma oranlarının düştüğü belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Aşınma deneyleri kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğundaki pim malzemeleri kullanılmıştır. Karşı disk malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik seçilmiştir. Disk malzeme 100mm çapında ve 5mm kalınlığında olacak şekilde torna tezgahında işlenmiş ve ardından yüzeyi taşlanmıştır. Deneylerden önce, pim yüzeyleri 1200 no zımpara ile zımparalanmıştır. Her test öncesinde hem çelik yüzeyleri hem de pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur. Yağlayıcı olarak kullanılan su, test süresi boyunca her üç saniyede bir aşınma izi üzerine uygulanmıştır. Tablo 1'de ise bu çalışmada kullanılan polimer malzemeler ve test şartları (ortam sıcaklığı, uygulanan yük ve kayma hızı) verilmiştir. Her testten önce ve sonra pimlerin ağırlıkları ölçülmüştür. Test öncesi ve sonrası ağırlık kaybı tespit edilmiş (Δm) ve aşağıda verilen formül kullanılarak spesifik aşınma oranları (K_0) hesaplanmıştır.

$$K_0 = \Delta m / L \cdot \rho \cdot F \text{ (m}^2/\text{N)}$$

Burada; Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m), F: uygulanan yük (N), ρ : malzemenin yoğunluğu (g/cm^3).

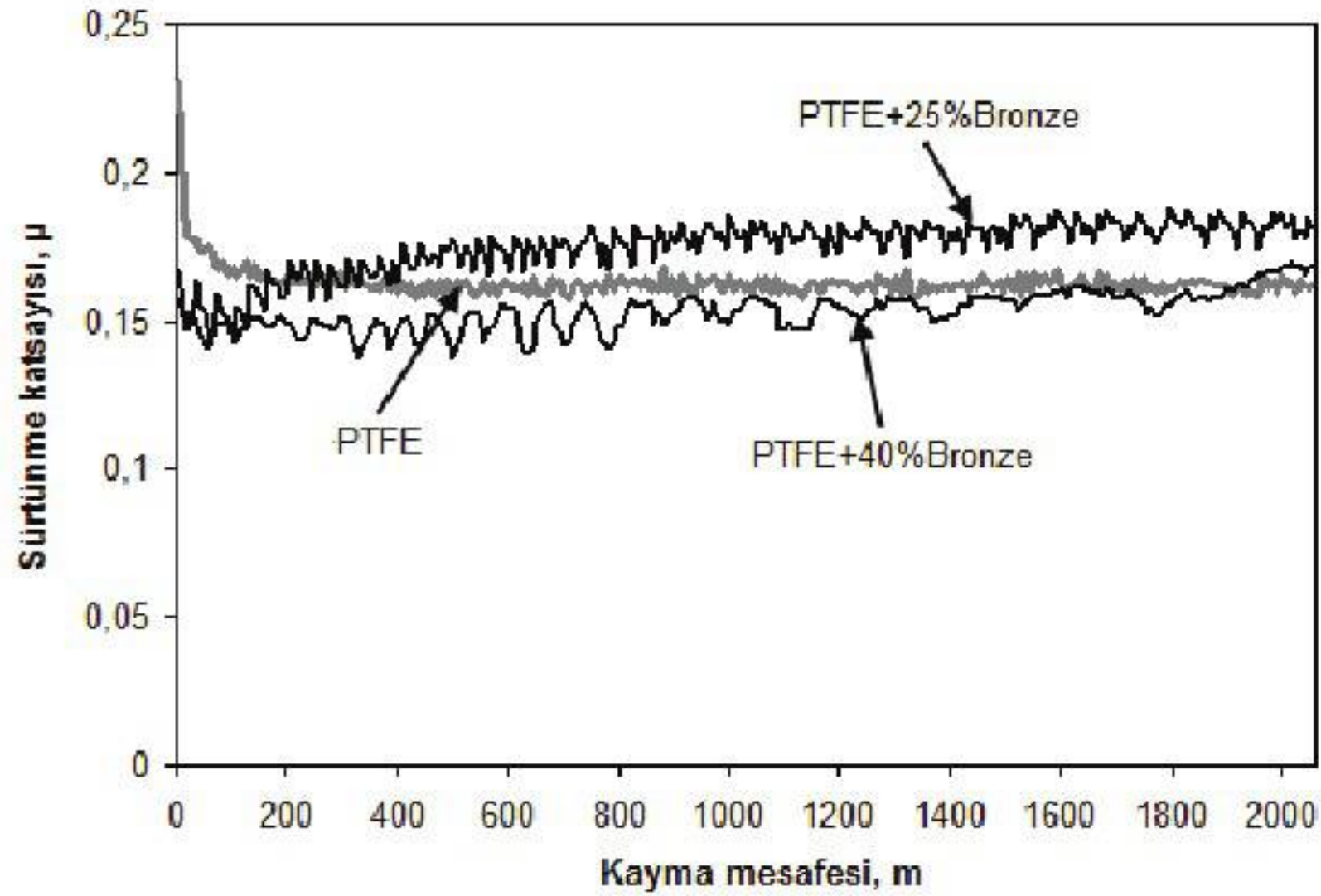
Tablo 1. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan polimer malzemeler ve deney şartları.

Malzeme	Ortam sıcaklığı (°C)	Kayma mesafesi (m)	Yük (N)	Kayma hızı (m s ⁻¹)
PTFE			50	1.0
PTFE+%25Bronz	23±2	2000	100	1.5
PTFE+%40Bronz			150	2.0

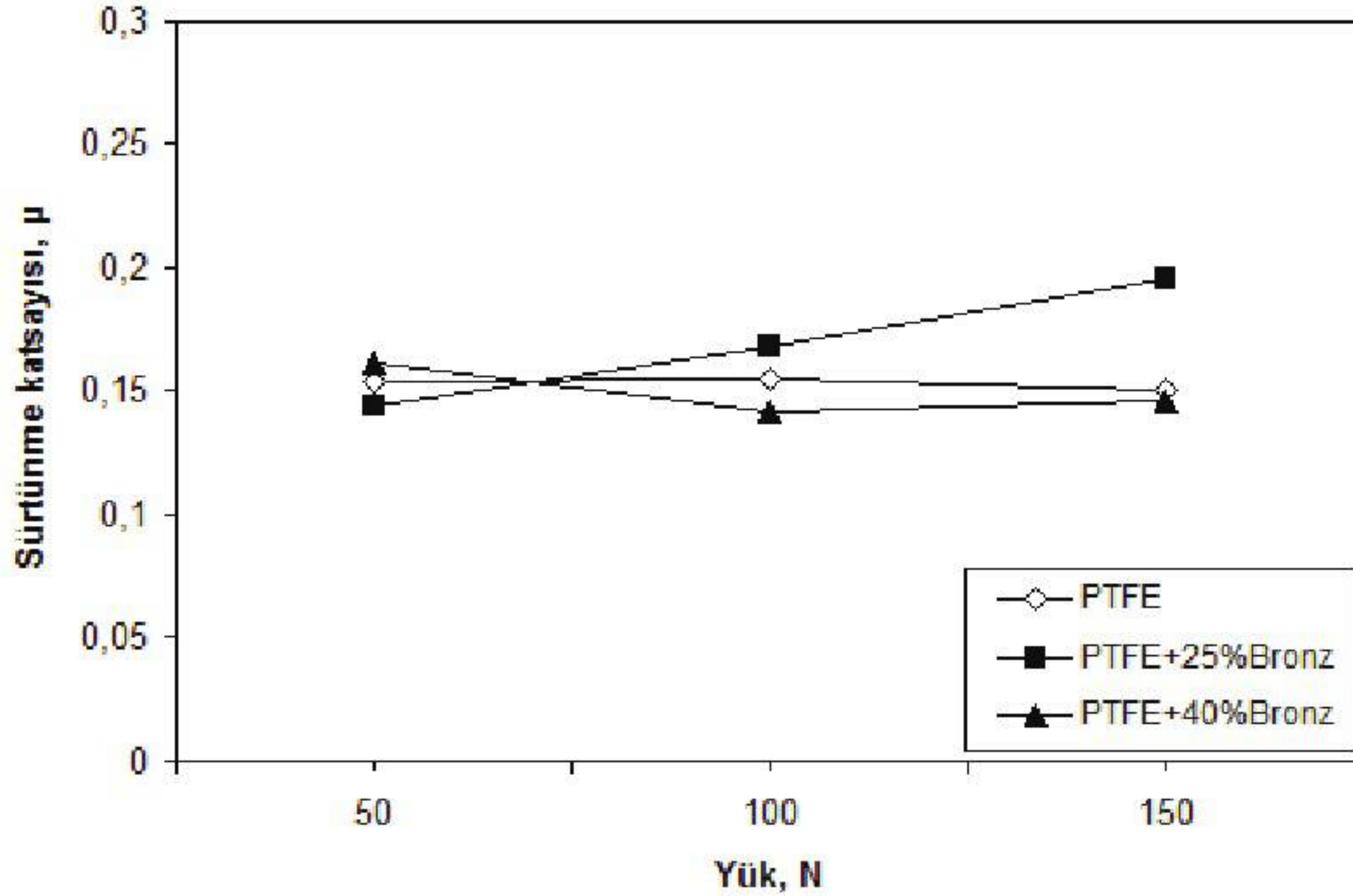
3. DENEY SONUÇLARI

Şekil 1'de saf PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz polimer kompozitlerinin 1.5m/s kayma hızında ve 150N yük altında, kuru ortam şartlarındaki kayma mesafesi-sürtünme katsayısı arasındaki değişimleri verilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü deneylerde kullanılan PTFE ve kompozitleri kararlı sürtünme durumuna çok kısa sürede ulaşmışlardır. %25 bronz katkılı PTFE polimeri kararlı sürtünme durumuna yaklaşık 500m kayma mesafesinde ulaşırken, katkısız PTFE ve %40 bronz katkılı PTFE kararlı sürtünme durumuna yaklaşık 200 m kayma mesafesinde ulaşmışlardır. PTFE polimerine ilave edilen bronz katkı miktarı arttıkça, kuru ortam şartlarında sürtünme katsayısı azalmıştır. Bilindiği gibi, bronz katkı karşı disk yüzeyde transfer film tabakasının oluşumuna sebep olarak sürtünme katsayısını ve aşınma oranını önemli oranda azaltmaktadır.

Şekil 2'de saf PTFE ve PTFE+%25bronz ile PTFE+%40bronz kompozitlerinin kuru ortam şartlarındaki sürtünme katsayısı-uygulanan yük ilişkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi uygulanan yükün 50N'dan 150N'a çıkarılması ile PTFE ve PTFE kompozitlerinin sürtünme katsayılarında çok fazla bir değişiklik gözlenmemiştir. Şekil 2'den PTFE+%25bronz kompozitinin sürtünme katsayısı katkısız PTFE polimerinin sürtünme katsayısına göre artış gösterirken, PTFE+%40bronz kompozitinin sürtünme katsayısında ise PTFE polimerine göre azalma gerçekleştiği görülmektedir. Benzer sonuçlar Unal ve arkadaşları [2] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir.

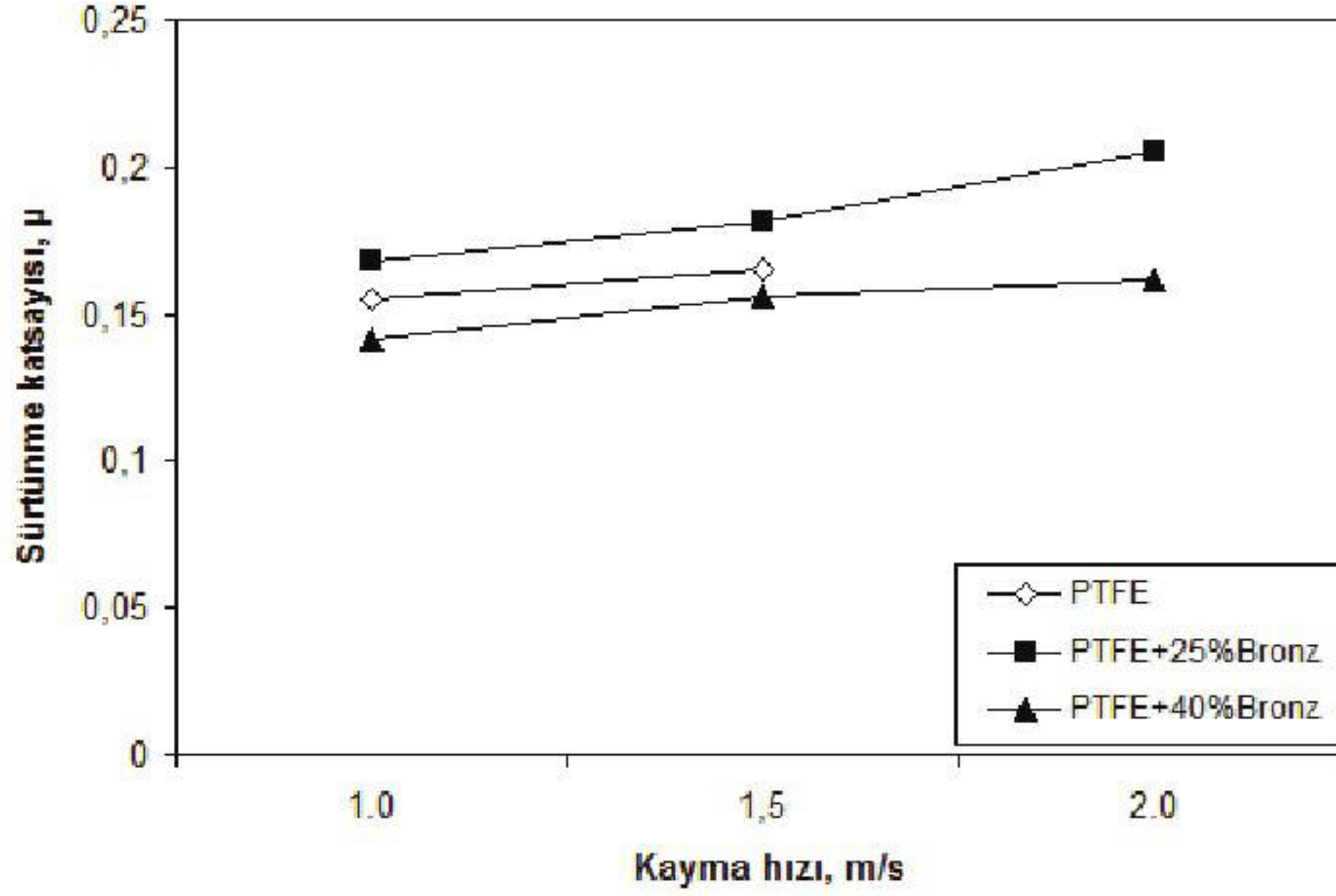


Şekil 1. PTFE, PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin kuru ortam şartlarında kayma mesafesi ve sürtünme katsayısı arasındaki değişimi (Kayma hızı: 1,5m/s ve yük:100N).



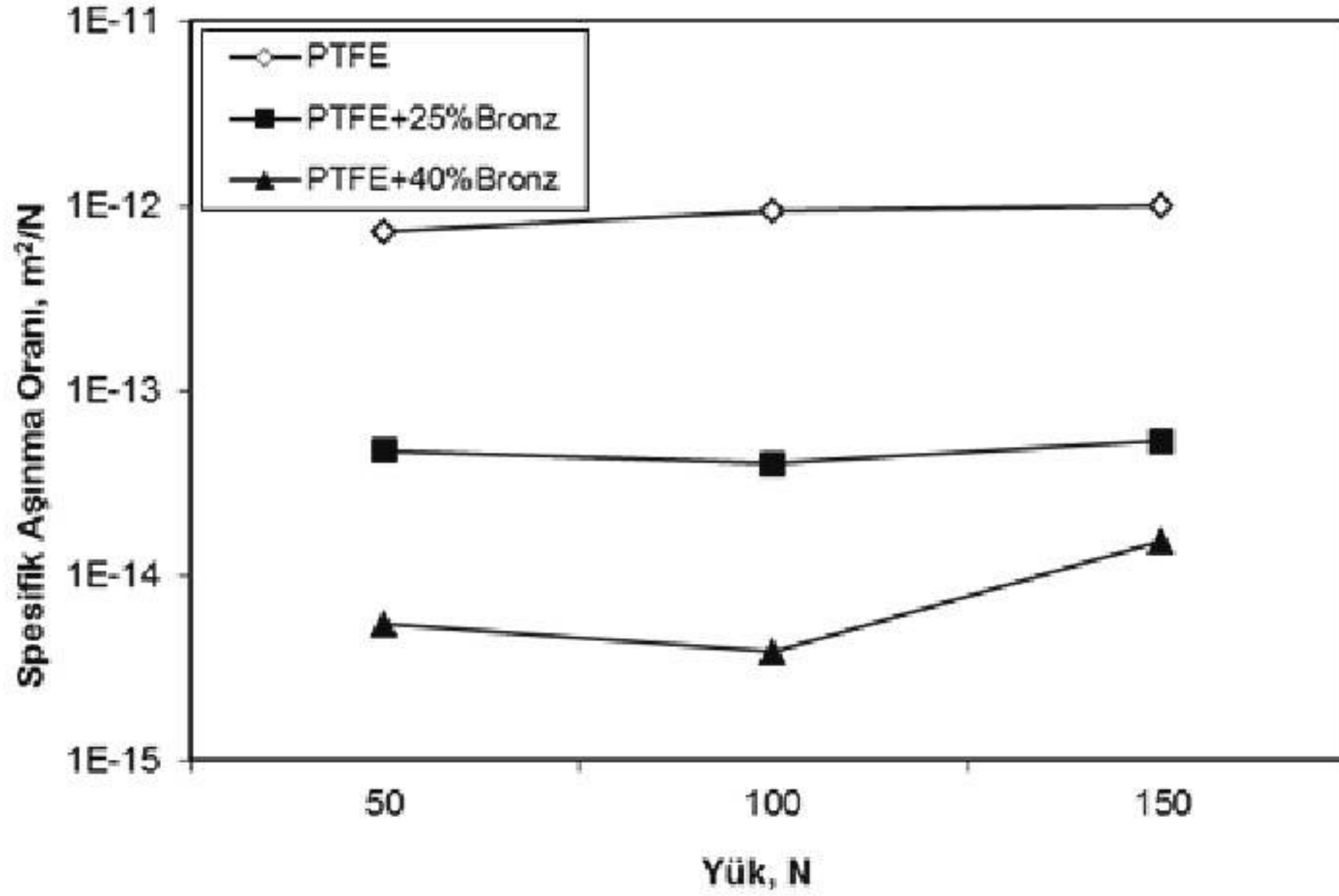
Şekil 2. PTFE, PTFE+%25Bronz ve PTFE+%40Bronz kompozitlerinin kuru ortam şartlarında yüke bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim (Kayma hızı: 1,0m/s ve yük:100N).

Şekil 3’de saf PTFE, PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin kuru ortam şartlarında kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim verilmiştir. Kayma hızının artmasıyla birlikte kompozitlerin sürtünme katsayılarında artış gözlenmiştir. **Bu durum, daha önce literatürde incelenen birçok polimer malzeme için benzerlik göstermektedir [16-18].** Şekilde görüldüğü gibi kayma hızının 1.0 m/s’den 2.0 m/s’ye çıkarılmasıyla, PTFE polimerinin sürtünme katsayısı %6, PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin sürtünme katsayısı ise sırasıyla %22 ve %14 oranlarında artmıştır. **Hızın artırılması ile sürtünme katsayısındaki artışın sebebi, çelik disk ile polimerin teması neticesinde polimer yüzeyindeki sıcaklığın artması olarak açıklanabilir.** PTFE+%25bronz kompozitinin sürtünme katsayısında katkısız PTFE polimerinin sürtünme katsayısına göre yaklaşık olarak %10 artış gerçekleştiği, ancak PTFE+%40bronz kompozitinin sürtünme katsayısında katkısız PTFE’in sürtünme katsayısına göre yaklaşık olarak %7 oranında azalma gerçekleştiği gözlenmiştir. **%25 bronz katkılı PTFE kompozitinin sürtünme katsayısının artmasının sebebi ise polimer yüzey sıcaklığının artması ile PTFE’nin polimer molekül zincirlerinin birbirlerinden uzaklaşarak kohezif çekim kuvvetleri azalmakta ve polimer çelik yüzeyine daha kolay yapışabilmesi olarak açıklanabilir.** Ancak PTFE bünyesindeki bronz oranı %25 oranında olduğunda bronzlu PTFE karşı çelik disk malzeme yüzeyine sürekli olmayan bir film tabakası oluşturmaktadır (bakınız Şekil 6c). Bu ise sürtünme katsayısının artmasına sebep olmaktadır. **Buna ilaveten PTFE polimerine %40 bronz ilavesi ile karşı çelik disk malzeme yüzeyinde daha üniform, ince ve sürekli bir film tabakası oluşmaktadır (bakınız Şekil 6e).** Bu ise sürtünme katsayısının azalmasına neden olmaktadır. 2.0m/s kayma hızında katkısız PTFE çok fazla aşınma gösterdiği için deneyler tamamlanamamıştır.



Şekil 3. PTFE, PTFE+%25Bronz ve PTFE+%40Bronz kompozitlerinin kuru ortam şartlarında kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim (yük:100N).

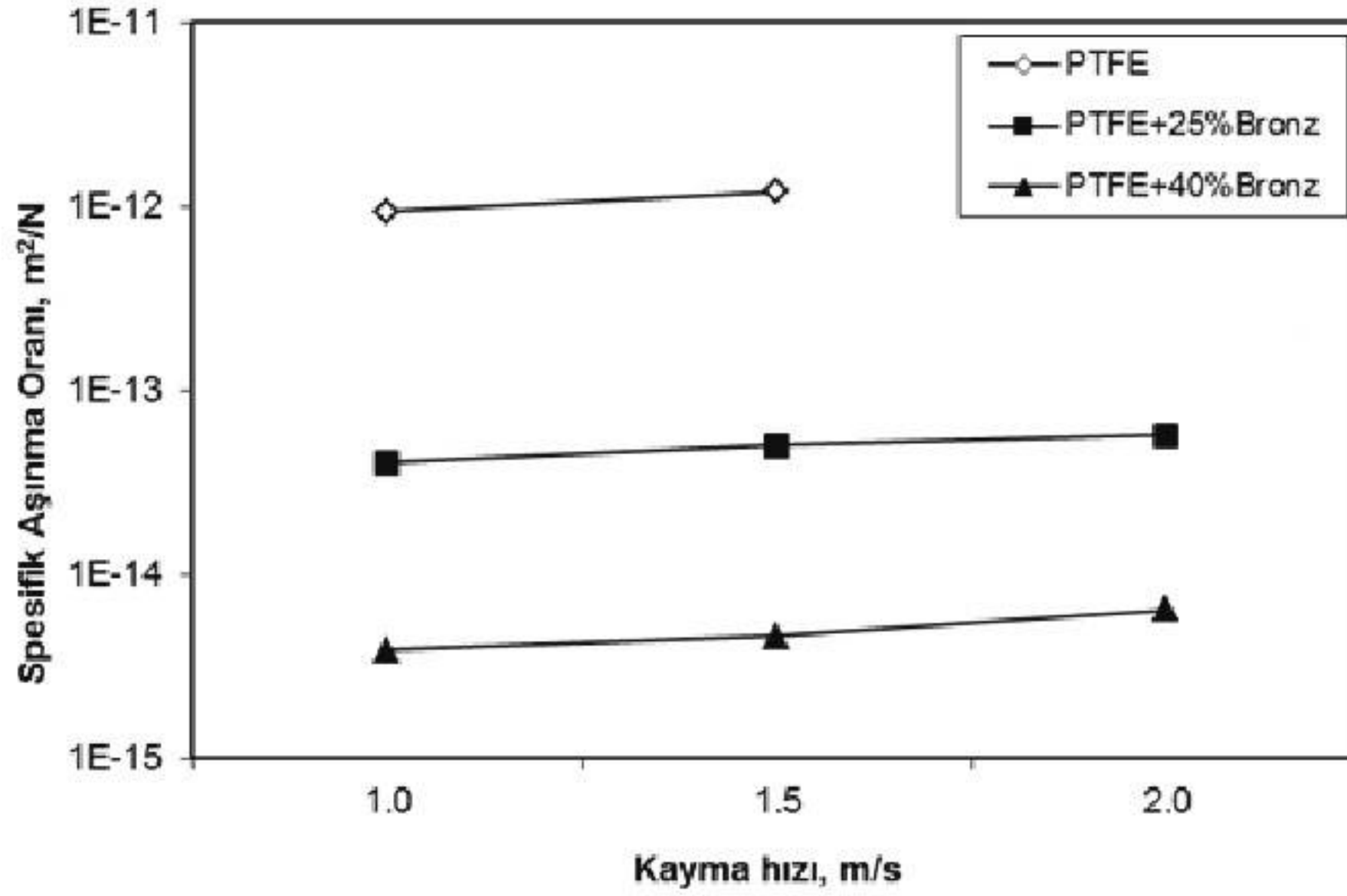
Şekil 4’de katkısız PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz polimer kompozit numunelerinin kuru ortam şartlarındaki spesifik aşınma oranlarının yük ile değişimi verilmiştir. Uygulanan yükün artması ile hem katkısız PTFE polimerinin hem de PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin her birinde spesifik aşınma oranı değerleri artmaktadır. Spesifik aşınma oranındaki bu artış PTFE polimeri için yaklaşık olarak %38 civarında iken, PTFE+%25bronz ile PTFE+%40bronz kompozitleri için yaklaşık olarak sırasıyla %13 ve %182 civarındadır. Uygulanan yükün artmasına göre, PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin spesifik aşınma oranlarının PTFE polimerinin spesifik aşınma oranlarına göre değişimi kıyaslanırsa, PTFE+%40bronz polimerinin spesifik aşınma oranının PTFE polimerine göre daha fazla etkilendiği görülmektedir. PTFE+%40bronz kompozit polimerinin spesifik aşınma oranı PTFE polimerine göre yaklaşık %24 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. En yüksek aşınma oranı $9.97 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile PTFE polimerinde 150N yükte elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı ise PTFE+%40bronz kompozit polimeri için $3.9 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile 100N yükte elde edilmiştir.



Şekil 4. PTFE, PTFE+%25Bronz ve PTFE+%40Bronz kompozitlerinin kuru ortam şartlarında yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranlarındaki değişim (Hız: 1.0 m/s).

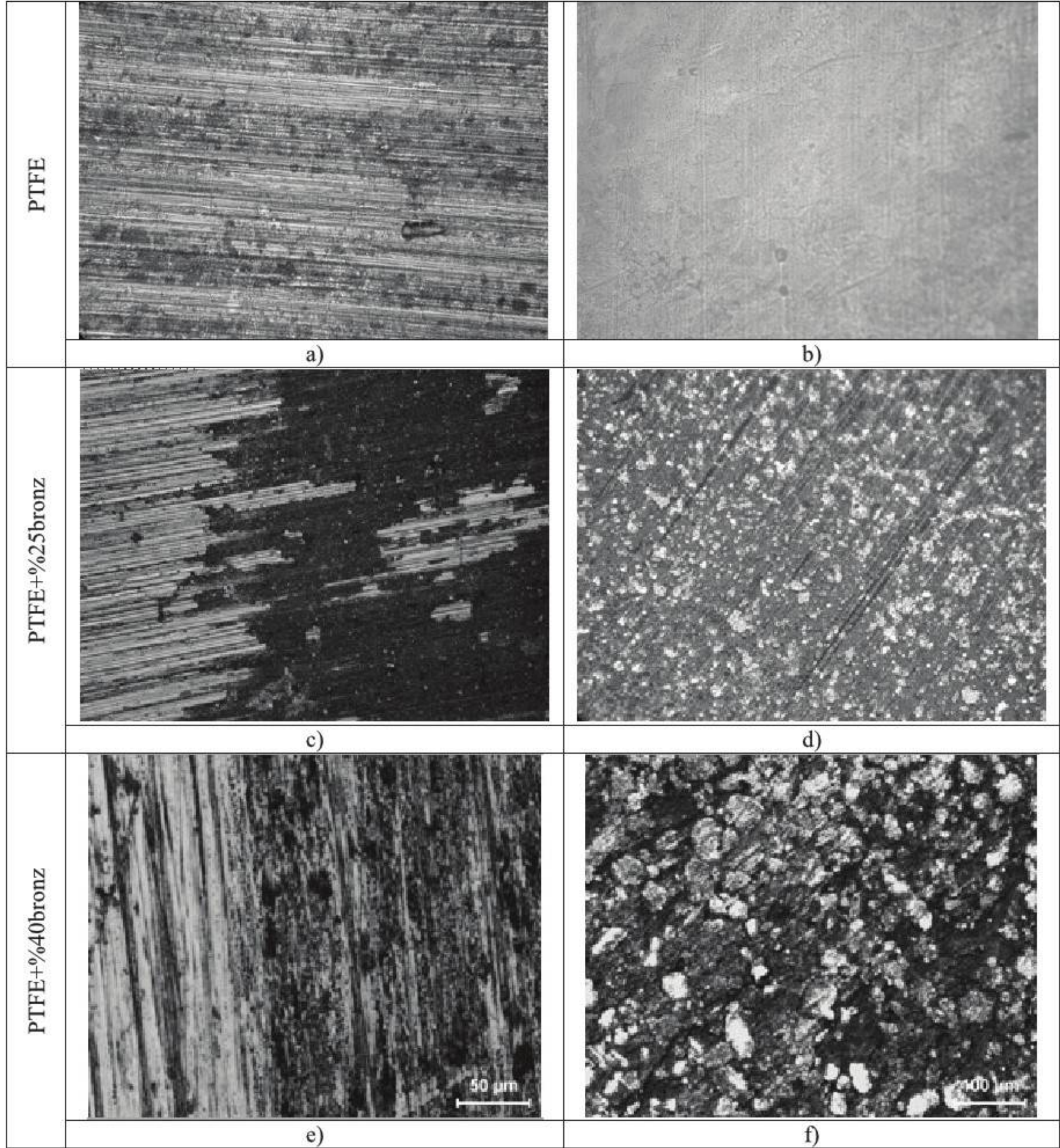
Bu deney şartlarında seçilen polimer malzemelerin uygulanan yük aralığı (50N-150N) ve 1.0 m/s hızdaki performansları karşılaştırıldığında, PTFE+%40bronz kompozit polimerinin performansının katkısız PTFE polimerinin performansından daha iyi olduğu gözlenmiştir. Benzer sonuçlar, daha önce literatürde Pasha [6] ile Unal ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir.

Şekil 5, PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ile PTFE+%40bronz polimer kompozit numunelerinin kuru ortam şartlarındaki spesifik aşınma oranlarının kayma hızı ile değişimi verilmiştir. Uygulanan kayma hızının artması ile hem katkısız PTFE polimerinin hem de PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin her birinde spesifik aşınma oranı değerleri artmaktadır. Spesifik aşınma oranındaki bu artış katkısız PTFE polimeri için yaklaşık olarak %28 civarında iken, PTFE+%25bronz ile PTFE+%40bronz kompozitleri için yaklaşık olarak sırasıyla %42 ve %65 civarındadır. Uygulanan kayma hızının artmasına göre, PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin spesifik aşınma oranlarının katkısız PTFE polimerinin spesifik aşınma oranlarına göre değişimi kıyaslanırsa, PTFE+%40bronz polimerinin spesifik aşınma oranının katkısız PTFE polimerine göre daha fazla etkilendiği görülmektedir. PTFE+%40bronz kompozit polimerinin spesifik aşınma oranı katkısız PTFE polimerine göre yaklaşık %26 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. En yüksek aşınma oranı $1.19 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile katkısız PTFE polimerinde 1.5 m/s kayma hızında gözlenmiştir. En düşük aşınma oranı ise PTFE+%40bronz kompozit polimeri için $3.9 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile 1.0 m/s kayma hızında elde edilmiştir. Bu deney şartlarında seçilen polimer malzemelerin uygulanan kayma hızı aralığı (1.0 m/s-2.0 m/s) ve 1.5 m/s kayma hızındaki performansları karşılaştırıldığında, PTFE+%40bronz kompozit polimerinin performansının katkısız PTFE polimerinin performansından daha iyi olduğu gözlenmiştir. Benzer sonuçlar Tevrüz [13] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. **Aşınma oranındaki azalmanın sebebi, bronz partiküllerinin yüksek oranlarda kullanılması kompozit malzemenin rijitliğini ve sertliğinin daha fazla artması ile açıklanabilir. Yani, kompozit bünyesinde daha yumuşak olan PTFE oranı azaltılması ile kompozit malzemenin aşınma direncinin artmasının sağlanması şeklinde de ifade edilebilir.**



Şekil 5. Katkısız PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozitlerinin kuru ortam şartlarında kayma hızına bağlı olarak spesifik aşınma oranlarındaki değişim (Yük: 100N).

Şekil 6'da, sırasıyla katkısız PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz kompozit polimerlerinin AISI 316L paslanmaz çelik karşı disk yüzeyinin kuru ortam şartlarındaki aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 6a' katkısız PTFE polimerinin aşınma yüzeyi incelendiğinde genellikle pürüzsüz bir yüzey görüntüsü gözlenirken, Şekil 6b'de ise karşı disk malzemesi görülmektedir. Karşı disk yüzeyinde çok ince film tabakası şeklinde PTFE film oluştuğu gözlenmiştir. **Katkısız PTFE polimer malzeme için adhezif aşınma mekanizmasının hakim olduğu ifade edilebilir.** Şekil 6d,f' de ise %25 ve %40 bronz katkılı PTFE polimer malzemelerinin aşınma yüzey mikroyapıları verilmiştir. Şekillerde verilen yüzey görüntülerinden bronz katkılı iki kompozit malzemenin aşınma mekanizması olarak abrazif aşınmanın hakim olduğu gözlenmektedir. Ancak bu oran çok yüksek görünmemektedir. Karşı disk malzeme yüzeyleri incelendiğinde ise (Şekil 6c,e) bronz katkılı PTFE polimer kompozitlerin paslanmaz çelik karşı yüzeyinde sürekli olmayan fakat katkısız PTFE ye göre daha kalın film tabakaları oluşturduğu gözlenmiştir.



Şekil 6. Katkısız PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz polimer kompozitlerin paslanmaz çelik karşı disk yüzeyinin kuru ortam şartlarındaki aşınma yüzeyi optik mikroskop görüntüleri a) çelik disk, b) Katkısız PTFE, c) çelik disk d) PTFE+%25bronz, e) çelik disk f) PTFE+%40bronz.

4. SONUÇLAR

1. Kayma hızının artması ile katkısız PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz polimer kompozitlerin sürtünme katsayıları artmıştır.
2. Uygulanan yükün artması ile PTFE+%25bronz polimerinin sürtünme katsayısı artarken katkısız PTFE polimeri ile PTFE+%40bronz kompozitinin sürtünme katsayısı **biraz** azalmaktadır.
3. Yükün artması ile katkısız PTFE polimeri ile PTFE+%25bronz ve PTFE+%40bronz polimer kompozitlerin spesifik aşınma oranlarında dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir.
4. Kayma hızının artırılması ile hem PTFE polimeri hemde PTFE+%25 bronz ve PTFE+%40 kompozitlerinin spesifik aşınma oranlarında artış gözlenmiştir.
5. Bu deney şartlarında seçilen polimer malzemelerin uygulanan yük aralığı (50N-150N) ve 1.0 m/s hızdaki performansları karşılaştırıldığında, PTFE+%40Bronz polimerinin performansının PTFE polimerinin performansından daha iyi olduğu gözlenmiştir.
6. Deneylerde kullanılan yük ve hız aralıklarında katkısız PTFE polimeri ile karşılaştırıldığında, %25 bronz katkılı PTFE'nin aşınma direnci ortalama olarak 10 kat, %40 bronz katkılı PTFE'nin aşınma direnci ise ortalama olarak 100 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
7. Bronz katkılı PTFE kompozitlerinde abrazif aşınma gözlenirken, katkısız PTFE polimeri için adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Oscar Olea-Mejia, W. Brostow, E. Buchman, "Wear Resistance and Wear Mechanisms in Polymer-Metal Composites", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.10, 1-6, (2010).
- [2] H. Unal, A. Mimaroglu, U. Kadioglu, H. Ekiz, "Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions", Materials and Design 25 239-245, (2004).
- [3] S. Bahadur, Y. Zheng, "Mechanical and tribological behaviour of polyester reinforced with short glass fibers", Wear 137:251-66, (1990).
- [4] Sung NH, Suh HP. "Effect of fibre orientation on friction and wear of fibre reinforced polymer composites". Wear 53: 129-41, (1979).
- [5] I. Khedkar, E.I. Negulescu, Meletis, "Sliding wear behavior of PTFE composites", Wear, Vol. 252, No. 5-6, pp. 361-369, (2002).
- [6] M. Pasha, B.A. Abdul Budan, D. Basavarajappa, S. Manjunath Yadav, S. Nizamuddin, B.A., "Dry sliding wear behaviour of PTFE filled with glass and bronze particles", Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces, Vol. 5, No. 2, pp. 59-64, (2011).
- [7] R. K. Goyal, M. Yadav, "Study on wear and friction behavior of graphite flake-filled PTFE composites", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 127, No. 4, pp. 3186-3191, (2013).

- [8] H. Unal, E. Kurtulus, A. Mimaroglu, M. Aydin, "Tribological performance of PTFE bronze filled composites under wide range of application conditions", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No. 14, pp. 2184-2191, (2010).
- [9] D. D. Bagale, "Wear analysis of PTFE and its composites under dry conditions using design expert", ME dissertation, SSBT's COET, Bambhori, Jalgaon, 12, (2011).
- [10] V.B. Raka, "Tribological behaviour of PTFE and its composites", *Innovations in Mechanical Engineering (IME'10)* pp.148-155, (2010).
- [11] B. Chaudhari, Sandip, S.P. Shekhawat, "Wear Analysis of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and it's Composites under Wet Conditions", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* Volume 8, Issue 2 (Jul. - Aug. 2013).
- [12] J. Li, Y. Ran, "Evaluation of the friction and wear properties of PTFE composites filled with glass and carbon fiber", *Mat.-wiss. u.Werkstofftech.*, 41, No. 2, (2010).
- [13] T. Tevrüz, "Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings", *Wear* 230, 61–69, (1999).
- [14] M.T. Demirci, H. Düzcükoğlu, "Wear behaviours of PTFE reinforced PA66 journal bearings". In *Int. Scientific Conference. Gabrovo*, pp. 249-253, (2010).
- [15] R. Franke, D. Lehmann, K. Kunze, "Tribological behavior of new chemically bonded PTFE polyamide compounds". *Wear*, 262: 242-252, (2007).
- [16] Z. Rymuza, *Reibungsverhalten feinmechanischer kunststoffgleit- lager, Tribologie und Schmierungstechnik*, 36, 223–227, (1989).
- [17] T. Tevruz, *Tribological behaviours of pure and glass fibre filled polytetrafluoroethylene, PTFE Journal Bearings*, 9th Engineering Symposium, May 29–31, (1996), pp. 1–6, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta,
- [18] H. Unal, S.H. Yetgin, F. Findik, "The effect of applied load and sliding speed on the tribological properties of Nylon 6 and ultra-high-molecular-weight polyethylene". *Industrial Lubrication and Tribology*, 66/3: 498-504, (2014).

