



*Araştırma Makalesi / Research Article*

# KARBON FİBER KATKILI POLİAMİT 66 POLİMER KOMPOZİTLERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

## EVALUATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER FILLED POLYAMIDE 66 POLYMER COMPOSITES

Bilal ÖZSARIKAYA<sup>1</sup>

Salih Hakan YETGİN<sup>2</sup>

Sinan KÖSE<sup>3</sup>

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1337774>

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author*  
shakanyetgin@tarsus.edu.tr

*Geliş Tarihi / Received*  
04.08.2023

*Kabul Tarihi / Accepted*  
11.12.2023

### Öz

Bu çalışmada, poliamit 66 (PA66) polimeri ile ağırlık olarak % 10, %20 ve %30 oranlarında karbon elyaf (KE) takviyeli poliamit 66 kompozitlerinin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyleri çelik diske karşı kuru ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir. Karbon elyaf katkılı PA66 kompozitleri çift vidalı ekstruderde granül olarak üretilmiş sonrasında enjeksiyon makinesi ile aşınma test numuneleri basılmıştır. Aşınma testleri 0,4, 0,8 ve 1,2 m/s kayma hızlarında, 20, 30 ve 40N yükler altında yapılmıştır. Deneyler, ortam sıcaklığında pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. 0,8 m/s hız ve 30N yükte, PA66 polimerine ilave edilen %10, %20 ve %30 oranlarındaki KE, sürtünme katsayısını %12,4, %23,5 ve %32,7 oranında, aşınma oranlarını ise %19,9, %38,9 ve %82,0 oranında azaltmıştır. Artan yük ve hız ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. Genel olarak, PA66 ve PA66/KE kompozitlerin aşınma oranları  $10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm olarak elde edilmiştir. Aşınma oranı ve sürtünme katsayısı arasındaki korelasyon katsayısı (R<sup>2</sup>) PA66 polimeri için 0,9686, PA66/30KE kompozitin için ise 0,775 olarak elde edilmiştir. Uygulanan tribolojik test çalışma şartlarında % 30 oranında karbon elyaf takviyeli PA66 kompozitin katkısız PA66'ya göre ortalama %82 oranında dirençli olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aşınma, karbon fiber, poliamit66, sürtünme.

### Abstract

In this study, the wear and friction performances of polyamide 66 (PA66) polymer and 10wt%, 20wt% and 30wt% carbon fibre (CF) reinforced polyamide 66 composites were investigated. Wear tests were carried out against a steel disc under dry ambient conditions. Carbon fibre reinforced PA66 composite was produced as granules in a twin screw extruder and then wear test specimens were molded in an injection molding machine. The wear tests were performed under 20-30-40N loads at sliding speeds of 0,4, 0,8 and 1,2 m/s. The tests were accomplished at ambient temperature using a pin-on-disc abrasion tester. At 0,8 m/s sliding speed and 30N load, 10%, 20% and 30% CF added to PA66 polymer reduced the coefficient of friction by 12,4%, 23,5% and 32,7%, and the wear rates by 19,9%, 38,9% and 82,0%. While the coefficient of friction and wear rate increased with the raise of the applied load and sliding speed. In general, the wear rates of PA66 and PA66/CF composites were obtained as  $10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm. The correlation coefficient (R<sup>2</sup>) between wear rate and friction coefficient was obtained as 0,9686 for PA66 polymer and 0,775 for PA66/30CF composite. In the tribological test working conditions applied, it was determined that carbon fibre reinforced PA66 with 30 % carbon fibre reinforcement was 82% resistant on average than PA66 polymer.

**Keywords:** Carbon fiber, friction, polyamide66, wear.

<sup>1</sup>İhlas Ev Aletleri İmalat Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, Türkiye  
bozsarikaya34@gmail.com, Orcid.org/0000-0003-3065-6361.

<sup>2</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye.  
shakanyetgin@tarsus.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-6068-9204.

<sup>3</sup>Tarsus Üniversitesi, MOSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknoloji Bölümü, Mersin, Türkiye.  
sinankose@tarsus.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-6224-3388.

## 1.GİRİŞ

Küresel ısınma gibi enerji sorunları nedeniyle son zamanlarda, enerji tasarrufu sağlayan ve karbondioksit emisyonlarını azaltan, daha hafif otomobil parçalarına yönelik gereksinimler artmıştır. Otomotiv endüstrisinde bu talepleri karşılayabilecek en önemli malzeme grubu ise polimer esaslı malzemelerdir (Sarita & Senthilvelan, 2019 Tavcar ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2020). Mühendislik polimeri grubunda yer alan Poliamit 66 (PA66) polimeri ısı direnci, yüksek mukavemet, tokluk ve yüksek aşınma direnci gibi özelliklere sahiptir (Harrass ve ark., 2010; Wenhu ve ark., 2017). Bu nedenle PA66 polimeri, çeşitli dişliler (Kunishima ve ark., 2020a; Kunishima ve ark., 2020b), yatak tutucuları (Baker & Rials, 2013) ve makaralar (Tewari ve ark., 1992) gibi otomobilde veya endüstriyel makinelerde aşınma ve sürtünme parçaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, modifiye edilmemiş poliamit 66 polimerinin, mekanik özelliklerin sınırlı olması, düşük ısıl deformasyon sıcaklığı, yüksek nem alma ve ölçüsel kararsızlığı gibi dezavantajları nedeniyle daha yüksek mekanik ve tribolojik özellikler gerektiren uygulamalarda talepleri karşılayamadığı da bilinmektedir (Zhaobin ve ark., 2010). Dolayısıyla, üstün özelliklere sahip malzemelerin elde edilmesi aşamasında, dolgu malzemelerinin kullanılması, iki polimerin harmanlanması ve kopolimerleştirme işlemleri ile mukavemet artırıcı katkıların kullanılması geniş bir şekilde araştırılmıştır (Lingesh ve ark., 2014; Shaofeng ve ark., 2012). Cam elyaflar (GF), karbon elyaflar (CF) veya aramid elyaflar (AF) gibi mukavemet artırıcı katkıların eklenmesi, poliamit polimerinin tribolojik özelliklerini iyileştirmenin yaygın bir yoludur (İbrahim ve ark., 2021; Kunishima ve ark., 2020c; Suresha ve ark., 2010). Bunların içerisinde fiyat performans açısından cam elyaflar (GF) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, cam elyaflar, düşük maliyet, yüksek çekme dayanımı, yüksek rijitlik, mükemmel korozyon direnci, iyi boyutsal kararlılık ve iyi yalıtım özellikleri de sağlamaktadır (Essabir ve ark., 2018; Niyaraki ve ark., 2021; Nuruzzaman ve ark., 2016; Zhou ve ark., 2019). Srinath ve Gnanamoorthy (2005) %20 oranında cam elyaf katkılı PA66 kompozitinde sürtünme katsayısının yaklaşık %28 oranında spesifik aşınma oranının ise yaklaşık %74 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Kim ve arkadaşları (2014) PA66 polimerine %30 cam elyaf ilavesi ile aşınma direncinin arttığını ancak sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Byett ve Allen (1992), paslanmaz çeliğe (AISI 431) karşı kuru kayma şartları kullanılarak yapılan aşınma testleri sonucunda, %40 cam elyaf miktarında, düşük yük (2 kg) altında spesifik aşınma miktarının yaklaşık %99 oranında, yüksek yük (10 kg) altında ise yaklaşık %76 oranında azaldığını sürtünme katsayısının ise arttığını belirtmişlerdir.

Son yıllarda ise karbon fiberler (CF), düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve elastiklik modülü, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle hem mühendislik polimerleri hem de yüksek performans polimerleri için ideal mukavemet artırıcı malzeme olarak ön plana çıkmaktadır (Chukov ve ark., 2015; Kausar, 2019; Shelke, & Pawar, 2017). Luo ve arkadaşları (2016) %5, %10 ve %15 oranlarında kısa karbon elyaf (KCF) takviyeli %85PPS/%15PTFE polimer kompozitlerin kuru ortam şartları altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda %15 CF içeriğine ulaşıldığında PPS/PTFE kompozitin spesifik aşınma oranı ve ortalama sürtünme katsayısı sırasıyla  $5,2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  ve 0,0085 değerine ulaşmış ve bu değerlerin PPS/PTFE karışımına göre sırasıyla %88 ve %47 oranlarında daha düşük olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda uygulanan yükün artırılması ile sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranının arttığı belirtilmiştir. Caia ve arkadaşları (2011) katkısız PA66 ve karbon fiber katkılı PA66 kompozitlerin kuru ve yağlı ortamdaki tribolojik performanslarını incelemişlerdir. Artan yük ile birlikte PA66/KE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının arttığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı azalırken spesifik aşınma artmıştır. Chang ve arkadaşları (2006) karbon elyaf, grafit ve nano-titanyum dioksit gibi geleneksel katkıların PA66 polimerinin sürtünme katsayısını önemli oranda azalttığını belirtmişlerdir. Tewari ve arkadaşları (1992) karbon elyaf ilavesi ile aşınma direncinin kötüleştiğini, kopma uzamasının azaldığını ve çekme mukavemetinin arttığını belirtmişlerdir.

Kullanılan fiber türü ve fiber yönlenmesi, fiberlerin uzunlukları ve miktarları gibi takviye/fiber parametreleri kompozitlerin performansına etki etmektedir. İmalat ve fiber parametrelerinin yanı sıra, fiber/matris arasındaki arayüzey yapışması ile uygulanan yük, kayma mesafesi ve hız gibi çalışma koşulları da kompozitlerin mukavemet ve tribo-performanslarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Raajeshkrishna ve ark., 2019). Kayma hızı ve uygulanan yük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerine etkili en önemli iki parametredir (Kumar & Panneerselvam, 2018). Bu çalışmada da %10, %20 ve %30 oranlarında karbon fiber ilaveli PA66 kompozitlerin 3 farklı yük (20-30-40N) ve üç farklı kayma hızı (0,4-0,8-1,2 m/s) altındaki tribolojik özellikleri incelenmiştir. PA66 polimerine ilave edilen farklı oranlardaki karbon fiberin, uygulanan yükün ve kayma hızının PA66 polimerinin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarına olan etkileri değerlendirilmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

Matris malzemesi olarak, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama proseslerine uygun olan poliamit 66 (PA66) polimeri kullanılmıştır. PA66 polimeri, yerleşkesi Tuzla/İstanbul'da bulunan Biesterfeld firmasının temin ettiği ve Dupont firmasının ürettiği Zytel® 101 NC010 kodlu polimerdir. Firma tarafından belirtilen teknik verilere göre kullanılan PA66'nın yoğunluğu ISO 1183 metoduna göre 1,14 g/cm<sup>3</sup>'tür. Ergime sıcaklığı 280-300°C, nem absorpsiyonu (23 °C, %50RH) ISO 62 metoduna göre %2,6'dır. Çalışmada, kırılmış karbon elyaf (KE), DOWAKSA firmasından AC-4102 kodu ile temin edilmiştir. Firma teknik verilerine göre kırılmış elyaf boyları 6 mm'dir. ISO 10119 test metoduna göre yoğunluğu ise 1,77 g/cm<sup>3</sup>'tür. PA66 kompozit granüllerin üretilmesinde Gama Alfa firmasında bulunan Coperion Werner & Pfleiderer marka kompaund ekstrüder makinası kullanılmıştır. 3 beslemeli, 11 adet ısıtma bölgesi bulunan makinanın L/D oranı 24'tür. Besleme bölgesinden ekstrüder kafasına kadar olan sıcaklık dağılımı, 265-270-275-280-285°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Ekstrüze edilen kompozitlerin granül halini alması için ekstrüder makinası sonunda Scheer marka dilimleme cihazı mevcuttur. Kompozitlerin üretiminden önce PA66 polimerinin nem alma işlemi etüv fırınında 4 saat süresince 80°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon işlemi sonrasında, Haitian MA2000 marka enjeksiyon makinesinde standartlara uygun olarak deney numuneleri üretilmiştir. Bu üretimler Gama-Alfa firmasında gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon prosesinden önce tüm numuneler etüv fırınında 4 saat süresince 100°C'de nem alma işlemine tabi tutulmuştur. PA66 polimerinin üretilmesinde 270-275-280-285-290°C sıcaklık dağılımı kullanılırken PA66 kompozitlerin üretiminde 285-290-295-300-305°C sıcaklık dağılımı kullanılmıştır. Üretimlerde enjeksiyon basıncı PA66 ve PA66/KE kompozitlerin için sırasıyla 120 ve 140 bar, enjeksiyon hızı ise 55 m/s ve 66 m/s olarak ayarlanmıştır. PA66 polimeri ile %10, %20 ve %30 KE katkılı PA66 kompozitlerin aşınma-sürtünme deneyleri için Ø6 mm ölçülerinde hazırlanan deney numuneleri kullanılmıştır. Deneyde, numune pimlerinin karşısında sürtünme plakası olarak disk şeklinde Ç1040 çeliği kullanılmıştır. Deneyler kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranını test sonuçlarını elde edebilmek için, her tribolojik test öncesinde, disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenmiş ve yüzeyleri kurutulmuştur. Her testten önce (m<sub>1</sub>) ve sonra (m<sub>2</sub>) pim ağırlıkları ölçülmüştür. Test öncesi pim ağırlığından test sonrası pim ağırlığı değeri çıkartılarak aşınma miktarı (Δ<sub>m</sub>) tespit edilmiştir ve Eşitlik 1'de verilen formül ile spesifik aşınma oranları (K<sub>o</sub>) hesaplanmıştır. K<sub>o</sub>, Spesifik aşınma oranını, (mm<sup>3</sup>/Nm), Δ<sub>m</sub>, aşınma miktarını, (g), S, kayma mesafesi, (m), ρ, test numunesinin yoğunluğu, (g/cm<sup>3</sup>), F, uygulanan kuvvet, (N) değerlerini ifade eder. Aşınma deneyleri için, çalışmada kullanılan kayma mesafesi, uygulanan yük ve kayma hızı gibi test parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

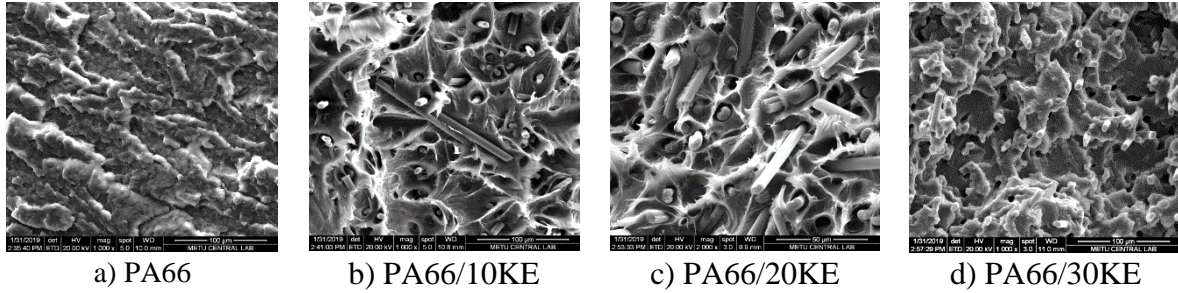
$$K_o = \frac{\Delta_m}{S \cdot \rho \cdot F} \quad (1)$$

Tablo 1. Aşınma-Sürtünme Deneyi Parametreleri

Parametreler	Değerler
Uygulanan yükler, N	20, 30 ve 40
Kayma hızları, m/s	0,4, 0,8 ve 1,2
Kayma mesafesi, m	1000

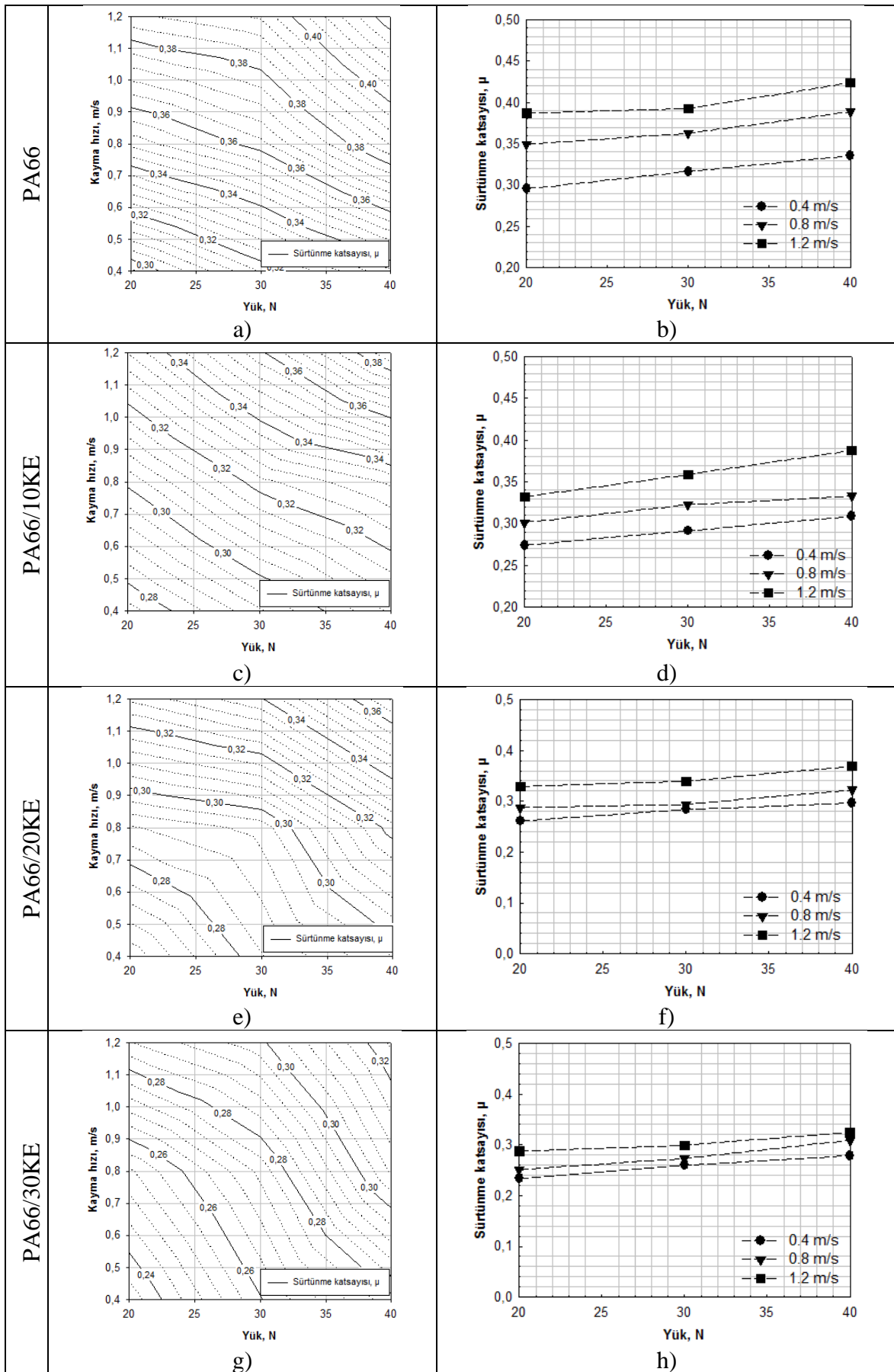
### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

Kırılma yüzeyi morfolojisi katkının dağılımı, kırılma mekanizması ve matris/elyaf arayüzeyi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Şekil 1–a’da katkısız PA66 polimerinin tipik kırılma yüzeyi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi son kırılmadan önce numunenin plastik deformasyona uğradığını gösteren bulut benzeri (cloud-like) çatlaklar oluşmuştur. Şekil 1 b-d’de ise PA66/KE kompozitlerinin gevrek olarak kırıldığını gösteren pürüzsüz bir yüzey yapısına sahip olduğu görülmektedir. Karbon elyafların farklı yönlerde hizalandığı ve ekstrüzyon süresince kayma kuvveti nedeniyle homojen dağıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, matristen fiberlerin sıyrıldığı da görülmektedir. Ayrıca, karbon fiberlerin matris içerisine iyi bir şekilde gömüldüğü ve matris ile fiberler arasında boşluk oluşmadığı gözlenmiştir.



Şekil 1. Katkısız PA66 ve PA66/KE Kompozitlerin Kırık Yüzey SEM Görüntüleri

Şekil 2 (a-h)’ta katkısız PA66 polimeri ile farklı oranlarda karbon elyaf katkılı PA66 kompozitlerin uygulanan yük ve hızı ile değişen sürtünme katsayıları ve ISO diyagramları (counter) diyagramları gösterilmiştir. Şekil 2 (a,c,e,g)’de PA66 polimeri ile PA66/KE kompozitlerin hız ve yüke bağlı olarak ISO diyagramları verilmiştir. Bu diyagramlar, parametrelerin (yük, hız vb.) uygun olarak seçiminde ve aşınma oranının kontrolünde önemli rol oynamaktadır.

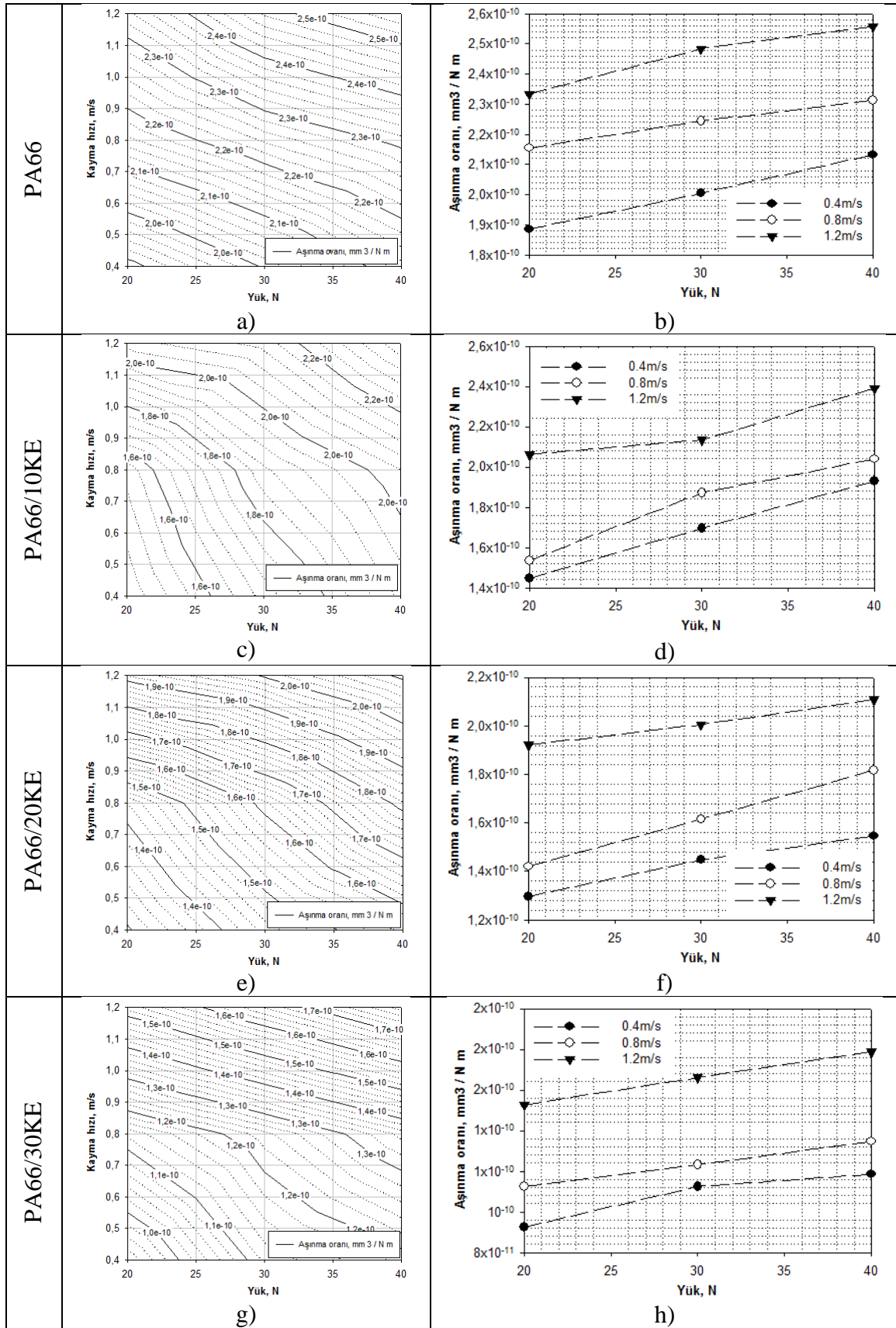


Şekil 2. Sürtünme Katsayısı Değişimi ve ISO (Counter) Diyagramları

PA66 ve PA66/KE kompozitlerin yük ile sürtünme katsayıları arasındaki değişim incelendiğinde artan yük ile sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA66 polimeri değerlendirildiğinde, yükün 20N'dan 40N'a artırılması ile sürtünme katsayısı 0,4 m/s hızda %13,6, 0,8 m/s hızda %11,2 ve 1,2 m/s hızda %9,5 oranlarında arttığı belirlenmiştir. %10 KE takviyeli PA66 kompozit numunesinde ise kayma hızına bağlı olarak artan yük ile sürtünme katsayısı sırasıyla %12,6, %10,5 ve %16,6 oranlarında artmıştır. %20 KE takviyeli PA66 kompozit numunesinde ise bu artış oranları %13,3, %12,1 ve %12,1 olarak elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitin için ise 0,4, 0,8 ve 1,2 m/s hızlarda yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı sırasıyla %19,3, %22,9 ve %12,8 oranlarında artmıştır. Sürtünme arayüzelerindeki sürtünme kaynaklı ısı bunu açıklayabilir. Ayrıca polimer malzemeler viskoelastik özelliğe sahiptir ve yük altında deformasyonu da viskoelastiktir. Bu nedenle ara yüzey sıcaklığı, malzeme gerilimine, yapışma ve transfer davranışlarına tepki olarak viskoelastik özelliği etkilemektedir. PA66 ve PA66/KE kompozitlerin hız ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki değerlendirildiğinde tüm numunelerde hızın artması ile sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. PA66 polimeri için hızın 0,4'den 1,2 m/s'ye artırılması ile 20-30-40N yük altındaki sürtünme katsayılarının sırasıyla %31,0, %24,0 ve %26,2 oranlarında arttığı belirlenmiştir. %10 KE katkılı PA66 kompozitinde, hızın 0,4'den 1,2 m/s'ye yükseltilmesi ile 20N yükte sürtünme katsayısı %21,1, 30N yük altında sürtünme katsayısı %23,1 ve 40N yük altında sürtünme katsayısı %25,4 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, PA66/20KE kompozitin uygulanan kayma hızına bağlı olarak 20-30-40N yük altında sürtünme katsayıları sırasıyla %25,8, %19,6 ve %24,5 oranlarında arttığı belirlenmiştir. PA66/30KE kompozitin için ise bu oranlar %23,2, %15,0 ve %16,5 olarak elde edilmiştir. Takeshi ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada, cam elyaf katkılı kompozitlerin karbon elyaf katkılı kompozitlere göre sürtünme katsayısının %19,4 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek sürtünme katsayısının kayma esnasında ısı ürettiği ve sıcaklığın artmasına neden olduğu dolayısıyla plastik deformasyonun arttığını belirtmişlerdir. Kumar ve Panneerselvam (2018) ise yaptıkları çalışma artan kayma hızı ve yük miktarları ile numunenin yüzey sıcaklığının değişmesi nedeniyle sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. İbrahim ve arkadaşları (2021) artan sürtünme katsayısının, artan katkı miktarı ile zayıflayan polimer zincirleri nedeniyle olabileceğini belirtmişlerdir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, yük ve hız aralıklarında sürtünme katsayısı üzerine en etkili parametrenin kayma hızı olduğu belirlenmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı 1,2 m/s hız ve 40N yükte PA66 polimerinde elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı 0,4 m/s hız ve 20N yükte %30 KE katkılı PA66 kompozitinde elde edilmiştir.

Şekil 3 (a-h)'ta PA66 polimeri ile %10, %20 ve %30 oranlarında karbon elyaf katkılı PA66 kompozitlerin yük ve hız ile aşınma oranları değişimi ve ISO diyagramları (counter) diyagramları verilmiştir. Genel olarak, PA66 ve PA66/10KE, PA66/20KE ve PA66/30KE kompozitlerin aşınma oranları  $10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm olarak elde edilmiştir. Yükün 20N'dan 40N'a yükseltilmesi ile aşınma oranları artmıştır. Bu artış PA66 polimeri için 0,4, 0,8 ve 1,2 m/s kayma hızlarında sırasıyla %13,0, %7,2 ve %9,6 oranlarında elde edilmiştir. %10 KE takviyeli PA66 kompozit numunesinde ise kayma hızına bağlı olarak yükün artması ile aşınma oranı değerleri sırasıyla %33,3, %32,8 ve %15,9 oranlarında artmıştır. %20 KE takviyeli PA66 kompozit numunesinde ise bu artış oranları %19,3, %27,9 ve %9,7 olarak elde edilmiştir. PA66/30KE kompozitin için ise 0,4, 0,8 ve 1,2 m/s kayma hızlarında yükün 20N'dan 40N'a artırılması ile aşınma oranları sırasıyla %28,2, %19,6 ve %17,1 oranlarında artmıştır.





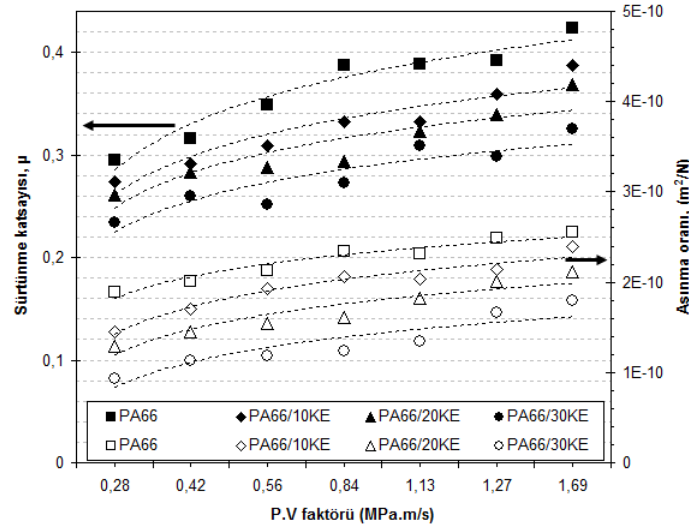
Şekil 3. Aşınma Oranı Değişimi ve ISO (Counter) Diyagramları

Autay ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yüksek yüklerde aşınma oranının %10 fiber içeriğinde 6 kat, %20 fiber içeriğinde 9 kat ve %30 fiber içeriğinde 12 kat arttığı belirtilmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranının arttığı

Ünal ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Aşınma prosesinin, kırılma, tribo-kimyasal etkiler ve plastik akış kaynaklı olduğu, ve yük değerindeki artışın matris ile fiberler arasındaki bağı zayıflamasına ve dolayısıyla kırılmaya yol açarak aşınma oranlarının artmasına sebep olduğu belirtilmiştir. PA66 ve PA66/KE kompozitlerin kayma hızı ile aşınma oranlarındaki değişim incelendiğinde tüm numunelerde hızın artması ile aşınma oranlarının arttığı belirlenmiştir. Katkisız PA66 polimeri için hızın 0,4'ten 1,2 m/s'ye artırılması ile 20, 30 ve 40N yük altındaki aşınma oranları sırasıyla %23,8, %23,9 ve %20,0 oranlarında arttığı belirlenmiştir. %10 KE katkılı PA66 kompozitinde, hızın 0,4'ten 1,2 m/s'ye artırılması ile 20N yük altında aşınma oranı %42,4, 30N yük altında aşınma oranı %25,8 ve 40N yük altında aşınma oranı %23,8 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, PA66/20KE kompozitin uygulanan kayma hızına bağlı olarak 20, 30 ve 40N yük altında aşınma oranları sırasıyla %48,3, %38,4 ve %36,4 oranlarında arttığı belirlenmiştir. PA66/30KE kompozitin için ise aşınma oranlarındaki değişim %65,2, %47,6 ve %50,8 olarak elde edilmiştir. Kumar ve Panneerselvam (2018) uygulanan yük ve kayma hızının artması ile temas bölgesindeki artan ısı ve dolayısıyla artan sıcaklık nedeniyle spesifik aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. Yapılan diğer bir çalışmada ise arayüzeyde kesme kuvvetindeki artış nedeni ile aşınma hacmi kaybının arttığı belirtilmiştir (Chen ve ark., 2006). Uygulanan hızın artması ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranındaki artışın, yüzey sıcaklığının artması ve yüzey tabakası sıcaklığının polimerin yumuşama sıcaklığına ulaşarak aşınma oranının artmasına sebep olduğu bilinmektedir.

Şekil 4'te PA66 polimeri ile karbon elyaf katkılı PA66 kompozitlerinin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı üzerine yük ve hızın etkisini gösteren P.V faktörü grafiği verilmiştir. P.V faktörü, Eşitlik 2 ile hesaplanmaktadır (Abdelbary, 2015).

$$P.V \text{ faktörü} = \frac{\text{yük} \times \text{hız}}{\text{pim alnı}} \quad (2)$$

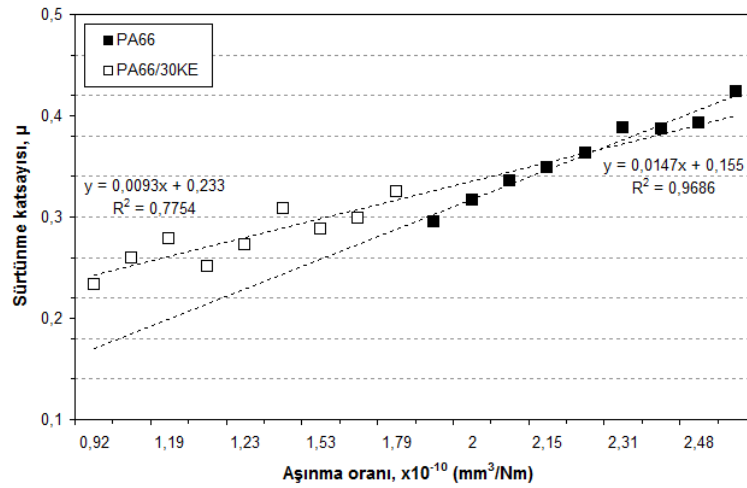


Şekil 4. P.V Faktörüne Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Oranı Değişimi

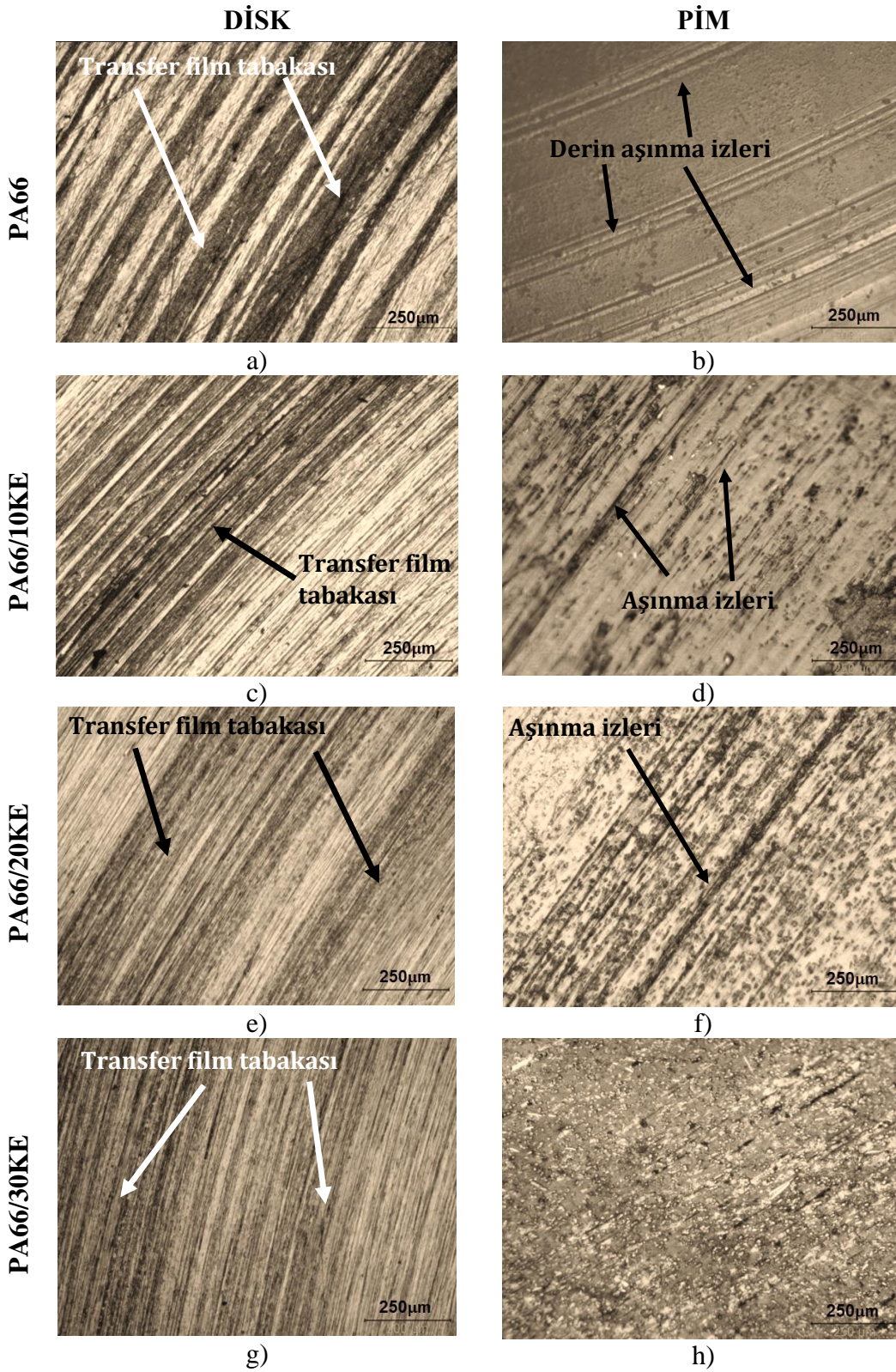
Sürtünme katsayısı ve aşınma oranı uygulanan kayma hızı ve yükten etkilenmiştir. P.V faktörünün artması ile aşınma oranının ve sürtünme katsayısının da yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, aşınma oranının ve sürtünme katsayısının karbon elyaf oranına bağlı olarak değiştiği de belirlenmiştir. PA66 polimerine ilave edilen karbon elyaf ve artan karbon elyaf ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı azalmıştır. 0,8 m/s hız ve 30N yükte, PA66 polimerine ilave %10 oranındaki karbon elyaf sürtünme katsayısını %12,4 oranında azaltırken %20 oranında karbon elyaf ilavesi ile sürtünme katsayısı %23,5 oranında, %30 karbon elyaf ilavesi ile sürtünme katsayısı %32,7 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, 0,8 m/s hız ve 30N yükte aşınma oranları



incelendiğinde, PA66 polimerine ilave edilen %10, %20 ve %30 oranlarındaki karbon elyaf aşınma oranlarını %19,9, %38,9 ve %82,0 olacak şekilde azaltmıştır. Shaofeng ve arkadaşları (2012) karbon fiber katkılı PA6/PPS karışımında, karbon fiberin transfer film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısının azalmasında önemli olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda, karışıma ilave edilen karbon fiberin dayanımı ve rijitliği artırdığı belirtilmiştir. Dolayısıyla yumuşak bir polimer matriste sert bir faz olan karbon fiberin bulunması belirli yükler altında gerçek temas alanını azaltarak yapışma kuvveti ve pulluklanma etkisini azaltabileceği belirtilmiştir (Suresha ve ark., 2007). Kumar ve Panneerselvam (2018) ise fiber miktarının artması ile sertlik, çekme dayanımı ve termal iletkenliğin arttığını ve dolayısıyla aşınma direncinin geliştiğini belirtmişlerdir. Genellikle, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin aşınma direnci iki farklı yaklaşım ile değerlendirilmektedir. Bunlardan birincisi, artan karbon fiber miktarı ile yumuşak matris ile sert çelik yüzeyi arasındaki gerçek temas alanı azalarak aşınma direnci azalmaktadır (Tanaka, 1997). Diğeri ise karbon fiber incebilir, çatlayabilir ve hatta matristen dışarı çıkabilir ve çıkan bazı CF partikülleri üçüncü bir abrasif aşındırıcı gibi davranarak aşınma direncinin kötüleşmesine sebep olabilmektedir (Suresha ve ark., 2007). Bu çalışmada, PA66/KE kompozitlerinde PA66 polimerine göre daha düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Katkısız PA66 polimeri ile %30 KE katkılı PA66 kompozitin sürtünme katsayısı-aşınma oranı arasındaki ilişki ise Şekil 5'te verilmiştir. PA66 polimeri ve PA66/30KE kompoziti için aşınma oranı ve sürtünme katsayısı arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Bu doğrusallık PA66 polimeri için korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0,9686, PA66/30KE kompozitin için ise 0,775 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. Katkısız PA66 Polimeri ile %30 KE Katkılı PA66 Kompozitin Sürtünme Katsayısı-Aşınma Oranı Değişimi



Şekil 6. Aşınma Sonrası Elde Edilen Disk ve Pim Yüzeylerine Ait Optik Mikroskop Fotoğrafları

Şekil 6 (a-h)'da, triboloji testleri sonrasında PA66 polimeri ile PA66/KE kompozitlerinin disk ve pim yüzeylerine ait optik mikroskop fotoğrafları gösterilmiştir. Polimerin kuru koşullar altında aşınma modu, öncelikle adhezif aşınma olarak açıklanır ve polimerin sürtünme katsayısı ve aşınma davranışı, metalik yüzey üzerinde bir transfer filminin oluşumundan güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Bu transfer filmi, polimer ile metalik yüzey arasındaki yapışmayı önlemekte ve metalik pürüzlerin yumuşak polimer yüzeyi üzerindeki sürtünme etkisini azaltmaktadır (Suresha

ve ark., 2010). Disk fotoğraflarında görüldüğü gibi numunelerin yüzeylerinde transfer film tabakasının (TFT) oluştuğu gözlenmiştir. Ancak katkısız PA66 polimeri ile düşük karbon fiber katkılı PA66 kompozitlerde, kayma yönünde, kayış-benzeri (belt-like) ve üniform olmayan transfer film tabakası oluştuğu gözlenmiştir. PA66/30KE kompozitinde ise üniform dağılmış ve sürekli bir TFT oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu TFT ve bu tabakanın yoğunluğu PA66 kompozitlerinin aşınma ve sürtünme davranışlarını etkilemiştir (Kumar & Panneerselvam, 2018). Gao ve arkadaşları da (2018) aşınma kalıntılarını uzaklaştırdığı ve sürtünme ısısını absorbe ettiği için yağlayıcı varlığının tribolojik özellikleri etkilediğini belirtmişlerdir. Pim fotoğrafları incelendiğinde ise katkısız PA66 polimerinin yüzeylerinde derin ve geniş oyuklar gözlenmiştir. Yüksek abrasif şartlar altında aşınma kalıntılarının metal yüzeye yapışma azalmaktadır (Şekil 6-a). Metal karşı yüzeyindeki daha büyük pürüzler, polimer yüzeyini deforme ederek abrasif aşınma mekanizmasının meydana geldiğini gösteren pulluk ve mikro-kesmeye neden olarak derin aşınma izlerinin oluşmasına sebep olmuştur (Şekil 6-b). PA66 polimerine ilave edilen KE ile oyukların sayısı ve etkisi azalmış, daha yumuşak bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 6 d-f-h). Grafitleştirilen karbon fiberin yağlayıcılık özelliğinin polimer kompozitin çelik diske teması esnasında sürtünme katsayısının azalmasında etkili olduğu bilinmektedir. Karbon fiber çok iyi yağlayıcılık özelliğine sahip grafit kristallerine ayrışabilmektedir. Grafit kalıntıları (debris) karşı disk yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak aşınma sürecini önemli oranda azaltacaktır. Li ve arkadaşları (2013) KE ilaveli PA6 kompozitin, PA6 polimeri ile cam elyaf ilaveli PA6 kompozite göre daha düzgün bir yüzeye sahip olduğunu belirtmişlerdir. KE katkının yoğunluğunun düşük olması nedeni ile elyafın kolay bir şekilde bağlandığı ve mükemmel bir termal iletken zincir oluşturdukları belirtilmiştir. Karbon fiberin üstün yağlayıcılık özelliği nedeniyle katkısız PA6 polimerinin abrasif aşınma mekanizması adhesif aşınma mekanizmasına dönüşmüştür. Bu durum PA6/30KE kompozit numunesinde elde edilen yumuşak yüzey görüntüsünden de anlaşılmaktadır.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Katkısız PA66 polimeri ile farklı oranlarında karbon fiber ilaveli PA66 kompozitlerin uygulanan yük ve kayma hızlarına bağlı olarak aşınma ve sürtünme davranışlarının araştırıldığı çalışma ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranının kayma hızı ve yüke bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Kayma hızı, aşınma ve sürtünme davranışını etkileyen en önemli parametre olmuştur. PA66 polimerine ilave edilen %10, %20 ve %30 oranlarındaki karbon fiber aşınma oranlarını sırasıyla %19,9, %38,9 ve %82,0 oranında azaltmıştır. Artan P.V faktörü ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. PA66 polimeri ve PA66/KE kompozitleri için aşınma oranının artması sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Karbon fiberin yağlayıcılık özelliği nedeniyle oluşan transfer film tabakası tribolojik davranışların şekillenmesinde önemli rol oynamıştır. Abrasif aşınma mekanizması transfer film tabakası nedeniyle adhesif aşınma mekanizmasına dönüşmüştür. %30 karbon elyaf katkılı PA66 kompozitin düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci ile tribolojik uygulamalar için alternatif bir malzeme olabileceği belirlenmiştir.

#### Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## KAYNAKÇA

- Abdelbary, A. (2015). Wear of polymers and composites. *Elsevier Ltd.*
- Autay R., Missaoui, S., Mars, J. & Dammak, F. (2019). Mechanical and tribological study of short glass fiber-reinforced PA 66. *Polymers and Polymer Composites*, 27(9), 587–596.
- Baker, D.A. & Rials, T.G. (2013). Recent advances in low-cost carbon fiber manufacture from lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(2), 713–728.
- Byett, J.H. & Allen, C. (1992). Dry sliding wear behavior of polyamide 66 and polycarbonate composites. *Tribology International*, 25, 237–246.
- Cai, Z. & Wenxia, W. (2011). Friction and wear properties of polyamide 66 composites filled with carbon fiber under dry sliding and oil lubricated condition. *Applied Mechanics and Materials*, 148-149, 612-615.
- Chang, L., Zhang, Z., Zhang, H. & Schlarb, A.K. (2006). On the sliding wear of nanoparticle filled polyamide 66 composites. *Composites Science and Technology*, 66, 3188–3198.
- Chen, Z., Liu, X., Lu, R. & Li, T. (2006). Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend – III reinforced with glass fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 523-529.
- Chukov, D.I., Stepashkin, A.A., Maksimkin, A.V., Tcherdyntsev, V.V., Kaloshkin, S.D., Kuskov, K.V. & Bugakov, V.I. (2015). Investigation of structure, mechanical and tribological properties of short carbon fiber reinforced UHMWPE-Matrix composites. *Composites Part B*, 76, 79-88.
- Essabir, H., Denis, R., Rachid, B. & Abou, K.Q. (2018). Effect of nylon 6 (PA6) addition on the properties glass fiber reinforced Acrylonitrile-Butadiene-Styrene. *Polymer Composites*, 14-21.
- Gao, C., Fan, S., Zhang, S., Zhang, P. & Wang, Q. (2018). Enhancement of tribofilm formation from water lubricated PEEK composites by copper nanowires. *Applied Surface Science*, 444, 364–376.
- Harrass, M., Friedrich, K. & Almajid, A.A. (2010). Tribological behavior of selected engineering polymers under rolling contact. *Tribology International*, 43, 635–646.
- Ibrahim, G., Tayfun, U. & Atila, G.Ç. (2021). Tribological Properties of Fly Ash Blended Polymer Composites. *Materia*, 26(1), 12929.
- Karabulut, F.Y. & Helvacı, C. (2017). Büyük şehirlerde ulaşım sistemleri ve sorunları: İzmir ili özelindeki sorunlara çözüm önerileri, *TMMOB Şehir Plancıları Odası*, 215-221.
- Kausar, A. (2019). Advances in carbon fiber reinforced polyamide-based composite materials. *Advances in Materials Science*, 19(4), 62.
- Kim, J.W., Jang, H. & Kim, J.W.O. (2014). Friction and wear of monolithic and glass-fiber reinforced PA66 in humid conditions. *Wear*, 309, 82–88.
- Kukureka, S.N., Hooke, C.J., Rao, M., Liao, P. & Chen, Y.K. (1992). The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. *Tribology International*, 32, 107-116.



- Kumar, S. & Panneerselvam, K. (2018). Investigation on dry sliding wear behaviour of nylon-6 and GFR nylon-6 composites using Taguchi technique. *Indian Journal of Engineering and Materials Science*, 25, 89-97.
- Takeshi, K., Yasuharu, N., Gaetan, B., Jean-Christophe, A., Vincent, F. & Philippe, K. (2021). Comparison of the tribological properties of carbon/glass fiber reinforced PA66-based composites in contact with steel, with and without grease lubrication. *Wear*, 477, 203899.
- Kunishima, T., Nagai, Y., Kurokawa, T., Bouvard, G., Abry, J.-C., Fridrici, V. & Kapsa, P. (2020a). Tribological behavior of glass fiber reinforced-PA66 in contact with carbon steel under high contact pressure, sliding and grease lubricated conditions. *Wear*, 456–457, 203383.
- Kunishima, T., Nagai, Y., Nagai, S., Kurokawa, T., Bouvard, G., Abry, J.-C., Fridrici, V. & Kapsa, P. (2020b). Effects of glass fiber properties and polymer molecular mass on the mechanical and tribological properties of a polyamide-66-based composite in contact with carbon steel under grease lubrication. *Wear*, 462–463, 203500.
- Kunishima, T., Kurokawa, T., Arai, H., Fridrici, V. & Kapsa, P. (2020c). Reactive extrusion mechanism, mechanical and tribological behavior of fiber reinforced polyamide 66 with added carbodiimide. *Materials and Design*, 188, 108447.
- Li, M., Wan, Y., Gao, Z., Xiong, G., Wang, X., Wan, C. & Luo, H. (2013). Preparation and properties of Polyamide 6 thermal conductive composites reinforced with fibers. *Materials and Design*, 51, 257–261.
- Lingesh, B.V., Rudresh, B.M. & Ravikumar, B.N. (2014). Effect of short glass fibers on mechanical properties of Polyamide66 and Polypropylene (PA66/PP) thermoplastic blend composites. *Procedia Materials Science*, 5, 1231-1240.
- Luo, W., Qi, L., Yi, L., Shengtai, Z., Huawei, Z. & Mei, L. (2016). Enhanced mechanical and tribological properties in Polyphenylene Sulfide/Polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber. *Composites Part B*, 91, 579-588.
- Niyaraki, M.N., Famaraz, A.G., Ismail, G., & Sajjad, D. (2021). Predicting of impact strength and elastic modulus of polypropylene/EPDM/graphene/glass fiber nanocomposites by response surface methodology. *Technical Journal*, 15(2), 169-177.
- Nuruzzaman, D.M., Iqbal Asif, A.K.M., Oumer, A.N., Ismail, N.M. & Basri, S. (2016). Experimental investigation on the mechanical properties of glass fiber reinforced nylon. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 114, 012118.
- Raajeshkrishna, C.R., Pradeep, A.S. & Rishi Kumar, R.D. (2019). Influence of fiber content on mechanical, tribological properties of short basalt fiber-reinforced nylon 6 and polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(6), 1-19.
- Sarita, B. & Senthivelan, S. (2019). Effects of lubricant on the surface durability of an injection molded polyamide 66 spur gear paired with a steel gear. *Tribology International*, 137, 193–211.
- Shaofeng, Z., Chaoqun, W., Lianhui, C. & Qiaoxin, Z. (2012). Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of PA6/PPS composites. *Advanced Materials Research*, 476-478, 2323-2327.

- Shelke, S.D. & Pawar, D.S. (2017). Tribological behavior of Polyamide 66 blend with CF & PTFE. *International Journal for Scientific Research & Development*, 5(5), 237-242.
- Srinath, G. & Gnanamoorthy, R. (2005). Effect of short fiber reinforcement on the friction and wear behavior of nylon 66. *Applied Composite Materials*, 12, 369–383.
- Suresha, B., Chandramohan, G., Samapthkumaran, P. & Seetharamu, S. (2007). Three-body abrasive wear behaviour of carbon and glass fiber reinforced epoxy composites. *Materials Science and Engineering: A*, 443(1), 285-291.
- Suresha, B., Kumar, K.S., Seetharamu, S. & Kumaran, P.S. (2010). Friction and dry sliding wear behavior of carbon and glass fabric reinforced vinyl ester composites. *Tribology International*, 43, 602–609.
- Tanaka, K. (1997). Friction and wear of glass and carbon fiber-filled thermoplastic polymers. *Journal of Tribology*, 99(4), 408-414.
- Tavcar, J., Grkman, G. & Duhovnik, J. (2018). Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 12, 1–13.
- Tewari, U.S., Bijwe, J., Mathur, J.N. & Sharma, I. (1992). Studies on abrasive wear of carbon fibre (short) reinforced polyamide composites. *Tribology International*, 25, 53–60.
- Wenhu, Z., Sier, D., Guoding, C. & Yongcun, C. (2017). Impact of lubricant traction coefficient on cage's dynamic characteristics in high-speed angular contact ball bearing. *Chinese Journal of Aeronautics*. 30,–835.
- Zhang, Y., Pursell, C., Mao, K. & Leigh, S. (2020). A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears. *Tribology International*, 141, 105953.
- Zhaobin, C., Xujun, L., Renguo, L. & Tongsheng, L. (2006). Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend. III. Reinforced with GF. *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 523–529.
- Zhou, S., Qiaoxin, Z., Chaoqun, W. & Jin, H. (2013). Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of Polyamide6/Polyphenylene Sulfide composites. *Materials and Design*, 44, 493–499.