

Karbon Fiber Takviyesinin Poli-fital-amit (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Gizem HATIPOĞLU¹  Hüseyin ÜNAL²  Salih Hakan YETGİN^{3*} 

¹Power Co SE, Industriestraße Nord 38239, Salzgitter, Germany

²Sakarya University of Applied Science, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya, Turkey

³Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mersin, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/04/2023
Düzeltilme: 01/08/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Poli-fital-amid
Karbon fiber
Aşınma
Sürtünme

Article Info

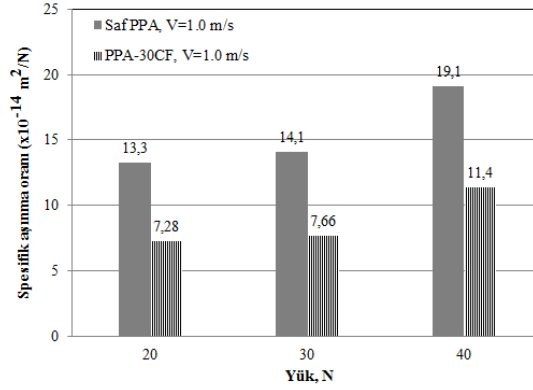
Research article
Received: 27/04/2023
Revision: 01/08/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Polyphthalamide
Carbon fiber
Wear
Friction

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada kuru kayma şartları altındaki poli-fital-amit (PPA) ve %30 karbon fiber takviyeli PPA kompozitin (PPA-30CF) 0.5 ve 1.0 m/s kayma hızlarında ve 20,30,40N yükler altında kuru kayma şartlarındaki tribolojik özellikleri araştırılmıştır. / In this study, tribological properties of polyphthalamide (PPA) and 30% carbon fiber reinforced PPA composite (PPA-30CF) were investigated under dry sliding conditions at 0.5 and 1.0 m/s sliding speeds and 20,30,40N loads.



Şekil A: Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi / **Figure A:** The variation of the specific wear rate of pure PPA polymer and PPA-30CF composite with applied load

Önemli noktalar (Highlights)

Saf PPA polimerine %30 oranında karbon elyaf ilavesi, kompozitin aşınma oranının önemli oranda azalmasını sağlar. Saf PPA polimerine %30 oranında karbon elyaf ilavesi, kompozitin mukavemetinin önemli oranda artmasını sağlar. Bu da yüksek yükler altında aşınmaya maruz kalan ortamlarda çalışma imkanı sağlar. / Adding 30wt.% carbon fiber to the pure PPA polymer significantly reduces the wear rate of the composite. The addition of 30wt.% carbon fiber to the pure PPA polymer significantly increases the strength of the composite. This enables operation under high loads in environments subject to friction and wear.

Amaç (Aim): Bu çalışma kuru kayma şartları altındaki poli-fital-amit ve %30 karbon fiber takviyeli PPA kompozitin tribolojik özelliklerini araştırmıştır. / This study investigated the tribological properties of polyphthalamide (PPA) and 30wt.% carbon fiber reinforced PPA composites under dry sliding conditions.

Özgünlük (Originality): PPA polimeri ile PPA-30CF kompozitinin endüstride tribolojik uygulamalarda döküm poliamit (PA), poli-oksi-metilen (POM), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve Politetraflor etilen (PTFE) gibi geleneksel malzemelere alternatif yüksek performanslı polimer malzemelerin kullanılması. / PPA-30CF composite with PPA polymer is a high performance polymer material alternative to traditional materials such as cast polyamide (CPA), poly-oxy-methylene (POM), high density polyethylene (HDPE) and polytetrafluorethylene (PTFE) in tribological applications in industry.

Bulgular (Results): PPA/30CF kompoziti endüstride dişli çark gibi makine elemanı imalatında kullanıldığında saf PPA ya göre dişli ömrü yaklaşık %78 oranında artmıştır. / When the PPA/30CF composite is used in industry for the manufacture of machine elements such as gears, the gear life is increased by about 78% compared to pure PPA polymer.

Sonuç (Conclusion): PPA-30CF kompozitin aşınma oranı saf PPA polimerine göre yaklaşık %78 oranında daha düşük elde edilmiştir. / The wear rate of the PPA-30CF composite was approximately 78% lower than that of the pure PPA polymer.



Karbon Fiber Takviyesinin Poli-fital-amit (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Gizem HATIPOĞLU¹ Hüseyin ÜNAL² Salih Hakan YETGİN^{3*}

¹Power Co SE, Industriestraße Nord 38239, Salzgitter, Germany

²Sakarya University of Applied Science, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya, Turkey

³Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mersin, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/04/2023
Düzeltilme: 01/08/2023
Kabul: 13/06/2023

Anahtar Kelimeler

Poli-fital-amid
Karbon fiber
Aşınma
Sürtünme

Öz

Endüstrinin birçok alanında üretim makinalarında hareket iletiminde polimer ve polimer esaslı kompozit malzemelerden imal edilmiş dişliler kullanılmaktadır. Uygun malzeme çiftlerinin seçimi dişli malzemelerinin çalışma ömrünü belirlemektedir. Yüksek performanslı poli-fital-amit (PPA) polimer ve PPA kompozitlerin kullanımıyla makine elemanlarının ömrü artacaktır. Bu çalışmada, katkısız poli-fital-amit polimeri ile ağırlık olarak %30 oranında karbon fiber takviyeli poli-fital-amit (PPA-30CF) kompozitinin tribolojik performansları incelenmiştir. Aşınma deneyleri çelik diske karşı kuru ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir. Karbon fiber takviyeli PPA kompoziti ikiz vidalı endüstriyel bir ekstruderde granül olarak üretilmiş ardından enjeksiyon makinasında aşınma test numuneleri basılmıştır. Aşınma testleri 20 N, 30 N ve 40 N yükler altında ve 0.5 ile 1.0 m/s kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonucunda, karbon fiber takviyeli PPA polimer kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı katkısız PPA polimerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Uygulanan yükün artırılması ile sürtünme katsayısı artarken kayma hızının artırılması ile sürtünme katsayısı değerleri azalmıştır. Aşınma oranı ise uygulanan yük ve kayma hızının artması ile artmıştır. Uygulanan aşınma ve sürtünme test çalışma şartlarında %30 oranında karbon fiber takviyeli poli-fital-amit kompozitin, katkısız PPA polimerine göre yaklaşık %78 oranında daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, makine elemanı olarak kullanılan dişlilerin çalışma ömrünün doğru malzeme kullanımı ile artırılabilceği sonucu ortaya çıkmıştır.

Investigation of the Effect of Carbon Fiber Reinforced on the Tribological Properties of Poly-phthalate-amide (PPA) Polymer

Article Info

Research article
Received: 27/04/2023
Revision: 01/08/2023
Accepted: 13/06/2023

Keywords

Polyphthalamide
Carbon fiber
Wear
Friction

Abstract

In many areas of the industry, gears made of polymer and polymer-based composite materials are used to transmit motion in production machines. The selection of suitable material pairs determines the working life of the gear materials. Using high performance polyphthalateamide (PPA) polymers and PPA composites will increase the lifetime of machine elements. In this study, the tribological performances of polyphthalateamide polymer and 30 wt% carbon fiber reinforced polyphthalateamide composite (PPA-30CF) were investigated. Wear tests were carried out against a steel disc under dry ambient conditions. Carbon fiber reinforced PPA composite was produced as granules in a twin screw extruder, then wear test specimens were moulded in an injection moulding machine. The wear tests were carried out under loads of 20-40 N and sliding speeds of 0.5-1.0 m/s. The tests were carried out under dry ambient conditions and at room temperature using a pin-on-disc wear tester. As a result of the tests, it was determined that friction coefficient and wear rate of the PPA-30CF composite were lower than the PPA polymer. While the coefficient of friction increased with increasing the load, the coefficient of friction values decreased with increasing the sliding speed. The wear rate increased with increasing applied load and sliding speed. In the applied wear and friction test operating conditions, PPA-30CF composite was found to be approximately 78% more resistant than the PPA polymer. As a result, it was concluded that the working life of the gears used as machine elements can be increased by using the right material.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimerler ve polimer esaslı kompozitler, geleneksel malzemelere göre daha hafif olmaları, korozyona karşı dirençli olmaları ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlamaları nedeniyle otomotiv, makine, sağlık, elektrik/elektronik, havacılık/uzay, gıda ve petrol endüstrisi gibi farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak polimer malzemelerin tekrarlı yükler altında düşük ömür, düşük mekanik, termal ve tribolojik özellik göstermelerinden dolayı endüstride kullanım alanları sınırlanmaktadır. Bu yüzden endüstride kullanım alanlarını artırmak, mekanik, termal ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için polimerlere talk, kalsit, kaolin, cam bilya, molibden disülfid, Vaks gibi dolgu/katkı malzemeleri ile cam fiber, karbon fiber ve aramit fiber gibi mukavemet artırıcı katkıları ilave edilmektedir. Cam fiberler, polimer kompozitlere düşük maliyet, yüksek çekme dayanımı, yüksek rijitlik, mükemmel korozyon direnci, iyi boyutsal kararlılık ve iyi yalıtım özellikleri sağlarken [1-5] karbon fiberler (CF) ise, düşük yoğunluk, yüksek dayanım, elastiklik modülü, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik özelliği sağlamaktadır [5-7].

Cam fiber ve karbon fiber takviyeli kompozitler, düşük sürtünme katsayısı özellikleri ile tribolojik amaçlar için yaygın kullanılmaktadır [5]. Tablo 1'de gösterildiği gibi literatürde çok sayıda araştırmacı farklı polimerler üzerinde tribolojik deneyler gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmalarda, malzeme özellikleri, karşı disk malzeme çeşidi, katkı türü ve % katkı oranı, uygulanan yük, kayma hızı, sıcaklık ve ortam şartları (kuru/sulu) gibi parametreler incelenmiştir [5, 7-11]. Bu araştırmacılarından bazıları [5, 7-14] farklı polimer matrisler üzerinde çalışmışlar ve karbon elyafların mekanik ve tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda genel olarak karbon fiberlerin kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranını belirgin oranda azalttığını tespit etmişlerdir. Bazı çalışmalarda ise polimer esaslı kompozitlerin farklı ortam şartları altındaki tribolojik özellikleri incelenmiştir [6, 15-17]. Bu çalışmalarda genellikle kuru ve sulu ortam şartları karşılaştırılmıştır. Golchin ve arkadaşları [15] CF/grafit /çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı PPS kompozitlerin sulu ortam şartlarındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kısa karbon fiberler, PPS polimer kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranını önemli oranda azalttığı belirtilmiştir. Chukov ve arkadaşları [6] farklı oranlarda CF takviyeli çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) kompozitlerin sulu ortam şartları

altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, katkısız ÇYMAPE polimerine göre ÇYMAPE/12CF kompozitin sürtünme katsayısının sulu ortam şartlarında daha düşük olduğu belirtilmiştir. CF ilavesi ile aşınma oranı azalmıştır. Zhang ve arkadaşları [16] kısa karbon fiber takviyeli poli-eter-imit (PEI) kompozitlerin sulu ortam şartları altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, kısa CF/PEI kompozitler sulu ortam şartlarında daha düşük sürtünme özellikleri göstermiştir. Ancak, kuru ve sulu ortam şartları altında aşınma direncinde pek farklılık gözlenmemiştir. Huimin ve arkadaşları [17] kısa CF/PTFE/poli-imit (PI) ve aramit/PTFE/ PI kompozitlerin tribolojik özelliklerini kuru ve sulu ortam şartları altında incelemişlerdir. Kuru kayma şartları altında, kısa CF/PI kompozitin sürtünme ve aşınma özellikleri aramit/PI kompozitine göre daha yüksek elde edilmiştir. Aramit katkının kuru ortam şartlarında tribolojik özellikleri kısa karbon fibere göre geliştirdiği ancak sulu ortam şartlarında ise kötüleştirdiği belirtilmiştir.

Polimer çalışma sıcaklığı da, malzemelerin tribolojik özelliklerini etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Temas noktasında oluşan ısı ve deney süresince sıcaklık artışı ile polimer malzemeler deforme olmakta ve tribolojik özellikleri değişmektedir. Katkı çeşidi ve artan çalışma sıcaklığı kompozit malzemelerin aşınma oranı ve sürtünme katsayılarını etkilemektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda araştırmacılarından bazıları [18] poliimid polimerinin farklı sıcaklıklardaki (23, 100, 180 ve 280 °C) tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında PI polimerinin artan sıcaklıklarda sürtünme ve aşınma dirençlerinin geliştiği belirtilmiştir. Chang ve arkadaşları [19] kısa CF, grafit, TiO₂ ve ZnS partikül katkılı poli-eter-eter-eton (PEEK) ve poli-eter-imit (PEI) kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki (23, 70, 120 ve 150 °C) tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. CF ve grafit katkıların kompozitlerin hem aşınma direncini hem de yük taşıma kapasitesini artırdığı belirtilirken sıcaklığın aşınma direncini azalttığı da belirtilmiştir. Zhong ve arkadaşları [20] karbon fiber takviyeli yüksek yoğunluklu poli-etilen (YYPE) kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki (20-40-60 °C) tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, KCF/YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı katkısız YYPE polimerine göre önemli oranda azalmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak, KCF ilavesi ile YYPE kompozitlerin aşınma direnci artmıştır. Singh ve arkadaşları [21] grafen kaplı CF/ epoksi kompozitlerin farklı yüklerde, farklı kayma frekanslarında ve farklı ortam sıcaklıklarındaki

tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, grafen kaplı fiberler kompozitin aşınma direncinin iyileşmesine katkı sağladığı ifade edilmiştir. Kayma frekansı ve sıcaklık arttıkça da, kompozitin sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Cui ve arkadaşları [22] karbon fiber/MoS₂/grafit/grafen/SiO₂ katkılı PEEK/PTFE kompozitlerin tribolojik özelliklerini oda sıcaklığında ve vakum altında incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, hem oda sıcaklığında hem de vakum altında (20 ile -100 °C sıcaklık arasında) sürtünme katsayısı 0.1 değerinin altında elde edilmiştir. PEEK/PTFE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Literatürde bazı çalışmalarda [23-28] uygulanan yükün, kayma hızının tribolojik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışmaların bazılarında [23-27] malzemeye göre değişmekle birlikte uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranının arttığı bazılarında [28] ise azaldığı belirtilmiştir. Uygulanan hızın artması ile azaldığı belirtilmiştir [25-27].

Poli-fital-amid (PPA) polimeri, hem yüksek termal dirençli olup hem de fiyat/performans açısından ön plana çıkan bir polimerdir [29]. Aynı zamanda, yüksek elastiklik modülüne, yüksek ısıl sapma sıcaklığına (HDT) ve yüksek ergime sıcaklığına da sahiptir [30-32]. PPA polimerinin genel kullanım alanları Şekil 1'de verilmiştir [32]. Yüksek termal özellikler ve yüksek kimyasal direnç özellikleri ile PPA polimeri aşınma ve sürtünmenin ön plana çıktığı uygulamalarda geleneksel polimerlere alternatif olarak kullanılabilir. PPA polimeri, pahalı olmasına rağmen sıcaklık direnci istenen tribolojik uygulamalarda ön plana çıkmaktadır [33-36]. PPA polimerinin tribolojik özellikleri ile ilgili az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Hatipoğlu [29] %5 PTFE/PPA karışımlarının paslanmaz çelik diske karşı tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda artan yük miktarı ile sürtünme katsayısının ve aşınma oranının arttığını belirtmiştir. Takayuki ve Yosuke [37] PTFE ilaveli ve karbon fiber takviyeli yarı-aromatik PA (PA10T) kompozitin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Matrise ilave edilen PTFE katkı, polimerin sürtünme katsayısı, spesifik aşınma oranı ve P:V (pressure x velocity) faktörü gibi tribolojik özellikleri geliştirdiği belirtilmiştir. Literatürde PPA polimeri ile kompozitlerinin tribolojik özelliklerine yük ve kayma hızının etkisi üzerine az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu deneysel çalışma ile literatürdeki bu eksikliği gidermek ve konuya ışık tutmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, katkısız PPA polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli PPA polimer kompozitin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tribolojik deneylerde iki farklı hız (0.5 ve 1.0 m/s) ile 20, 30 ve 40 N gibi üç farklı yük kullanılmıştır. Bu test şartları altında çalışan malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. PPA polimer ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 2'de katkısız PPA polimeri ve %30 karbon fiber katkılı PPA kompozitten imal edilen ve tribolojik uygulamalarda kullanılan dişli sistemleri verilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzeme ve Kompozitlerin Hazırlanması

(Preparation of Materials and Composites)

Deneylerde katkısız poli-fital-amit polimeri matris malzemesi Eurotec Mühendislik Plastikleri/İstanbul firmasından temin edilmiştir. Tecomid HT ticari isimli, 1.18 g/cm³ yoğunluğa, 310 °C ergime sıcaklığına ve %2.4 oranında nem oranına sahip olarak kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak 6 mm uzunluğundaki kısa karbon fiber, AC 4101 ismi ile DOWAKSA İleri Kompozit Malzemeler Sanayi Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. %30 karbon fiber takviyeli poli-fital-amit kompozit granül formunda endüstriyel tip çift vidalı bir compound makinesi kullanılarak üretilmiştir. Ekstrüzyon prosesinde besleme hunisi ile ekstrüzyon kalıbı arasındaki ısıtıcı sıcaklıkları 310-345 °C arasında ayarlanmıştır. Enjeksiyonla aşınma test numune üretimi yapılmadan önce granüller kurutulmuştur. Ekstrüde edilen karbon fiber takviyeli PPA polimer granüller 120 °C'de 4 saat fırında kurutulduktan sonra enjeksiyon kalıplama yöntemi ile basılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan pim numuneler, çapı 6 mm ve uzunluğu 50 mm olacak şekilde özel olarak tasarlanmış kalıp kullanılarak üretilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile üretimlerde sıcaklık değerleri 310-340 °C arasında iken enjeksiyon basıncı 150 bar olarak ayarlanmıştır. Tablo 2'de kullanılan malzemeler, kısaltmaları ve üretim şartları verilmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen kırık yüzeyler JSM 6060LV kodlu JEOL marka taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüleri incelenmeden önce numune yüzeyleri 40A° kalınlığında altın ile kaplanmıştır.








2.2. Aşınma Testleri (Wear Tests)

Aşınma testleri, DIN X40CrMoV5-1 çelik diske karşı katkısız PPA ve %30 karbon fiber takviyeli PPA kompoziti kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aşınma testleri kuru ortam şartlarında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Tablo 3'te deneylerde kullanılan polimer malzemeler ve aşınma deneyi proses şartlarının detayları verilmiştir. Pim numunelerin deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri Precia 220 marka 0,0001 gr hassasiyetli hassas terazi ile yapılmış ve spesifik aşınma oranı (K_o) hesaplanmıştır. Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma

mesafesi (m), ρ : malzemelerin yoğunluğu (g/cm^3), F: uygulanan yük (N)'dur.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L \cdot \rho \cdot F} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (1)$$

PPA Uygulamaları			
Otomotiv Endüstrisi	Tüketim Malları Endüstrisi	Elektrik Parçaları Endüstrisi	Petrol Çıkarma Endüstrisi
			
Elektrikli su pompası	Spatula	LED soketler	Pompa aşınma halkası
			
Hava emme monifoldu	Fan koruyucu	Hafıza kartı okuyucu	Gaz boruları
			
Motor koruyucu	Kahve makinesi parçaları	USB Tip-C 3.1 konektör	Çubuk klavuzu

Şekil 1. PPA polimerinin genel kullanım alanları (General usage areas of PPA polymer) [32]



Şekil 2. PPA malzemeden imal edilen dişli uygulamaları (Gear applications made of PPA material) [38-40]

Tablo 1. Karbon fiber katkılı polimerler için literatür taraması ve sonuçları (Literature review and results for carbon fiber filled polymers)

Referans	Test türü	Katkının türü	Matris Malzemesi	Karşı disk malzemesi	Ortam Şartları	Yük	Kayma Hızı	Kayma mesafesi/Test süresi	Sürtünme katsayısı/Aşınma oranı
5	Bilye-disk	%5-10-15 CF	%80PA6/%20PPS	Bilye: 6mm çapında krom çelik bilye	Kuru	10-15-20N	500-1000-1500rpm	-	CF ilavesi ile dayanım, modül ve sertlik değerleri artmış kopma uzaması ve darbe dayanımları azalmıştır. Kararlı hal aşınmasında, PA6/PPS/KF kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin PA6/PPS karışımına göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. CF miktarı arttıkça PA6/PPS/CF kompozitlerin aşınma oranı artmıştır. Yüksek yük ve yüksek kayma hızlarında sürtünme katsayısının azalışı aşınma oranı artmıştır.
15	Pim-disk	%15 Kısa CF, %3 Çok duvarlı karbon nanotüp, %10 Grafit	PPS	Inconel 625 plaka, (Ra=0.07 µm)	Sulu	80 N	0.13 m/s	468-18.720m	Saf PPS ile karşılaştırıldığında, kısa CF katkılı PPS kompozitlerin sürtünme katsayısı %60 oranında azalmış, aşınma oranını ise 3 kat daha fazla oranda artmıştır. ÇDKNT ve Gr ilavesi ile PPS kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını etkilenmemiştir.
6	Pim-disk	%2, 4, 8, 12 CF	ÇYMAPE	Paslanmaz çelik, (Ra=0.35)	Sulu	100 N	0.25 m/s	2 saat	ÇYMAPE/12CF kompozitlerin sürtünme katsayısının oluşan transfer film tabakasına bağlı olarak 27 dakika sonrasında, ÇYMAPE polimerinden daha düşük olduğu belirtilmiştir. CF ilavesi ile aşınma oranı azalmış ancak artan CF miktarı ile aşınma oranı artmıştır. En düşük aşınma oranı, %8 CF içeriğinde elde edilmiştir. Katkısız ÇYMAPE polimerine göre 2 kat daha düşük aşınma oranı elde edilmiştir.
8	Plaka-disk	%5, 10, 15 CF	PPS/PTFE	Çelik disk	Kuru	200 N 500 N	0.42 m/s	15.000m	%15 CF içeriğine ulaşıldığında PPS/PTFE kompozitlerin spesifik aşınma oranı ve ortalama sürtünme katsayısı 5.2×10^{-6} mm ³ /Nm ve 0.0085 değerine ulaşmış ve bu değerlerin PPS/PTFE karışımına göre sırasıyla %88 ve %47 oranlarında azalmıştır. Yükün artması ile sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı artmıştır.
16	Pim-disk	% 10 Kısa CF	PEI	100Cr6 (Ra=0.35)	Sulu	0.1-8 MPa	1-3 m/s	3600 m	Kısa CF/PEI kompozitler sulu ortam şartları altında kuru ortam şartlarına göre daha düşük sürtünme özellikleri elde edilmiştir. Kuru ve sulu ortam şartları altında aşınma direncinde farklılık gözlenmemiştir. Spesifik aşınma direnci 1×10^{-6} mm ³ /N.m olarak elde edilmiştir.
18	Bilye-disk	% 5, 10, 20, 30 CF (hacimsel)	PI	GCr15 çelik bilye, çapı:3 mm, Ra: 0.02 µm).	Kuru	5N	0.3 m/s	30 dakika	Artan sıcaklıklarda PI polimerinin sürtünme ve aşınma direnci gelişmiştir. 180 ve 260 °C gibi yüksek sıcaklıklarda, %20 karbon içeriğinde en düşük aşınma oranı ile birlikte, 0.054 ve 0.1 gibi en düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Uygulanan kayma hızı ve yük ile sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri değişmiştir.
18	Pim-disk	Kısa CF, Grafit, Mikron altı TiO2, Mikron altı ZnS	PEEK PEI	Parlatılmış çelik disk, Ra: 220 nm	Kuru	1-4 MPa	1, 2, 3 m/s	-	Geleneksel katkılar (CF ve grafit) hem aşınma direncini hem de yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Mikron altı partiküller ise artan sıcaklıklarda sürtünme katsayısını ve aşınma oranını daha fazla azaltmıştır.
7	Bilye-Plaka	% 10, 20, 30 CF	PVDF	Paslanmaz çelik	Kuru	6-9-12-15 N	0.5, 4, 8, 12 Hz	30 dakika	CF katkılı PVDF kompozitlerin saf PVDF polimerine göre tribolojik özellikleri geliştirmiştir. Optimum aşınma azalımı %20 CF içeriğinde elde edilmiştir. Artan kayma frekansı ve uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve hacimsel aşınma oranı artmıştır.
23	Bilye-Plaka	%0-20 CF	Epoksi	Cr6 çelik pim	Kuru	3 cm/s	2-6 N	-	Artan CF miktarı ile sürtünme katsayısının ve aşınma şiddeti azalmıştır. Yükün 2 N'dan 6 N'a artırılması ile sürtünme katsayısı ve aşınma şiddeti artmıştır.
17	Pim-disk	%10 kısa CF/%10 PTFE %10 aramit partikül/%10PTFE	PI	Bakır (Cu)	Kuru Sulu	0.5 m/s 1.0 m/s	1, 3, 6 MPa	2 saat	Kuru kayma şartları altında, kısa CF katkılı PI kompozitlerin sürtünme ve aşınma özellikleri aramit partikül katkılı PI kompozitine göre daha yüksektir. Aramit partiküllerinin kuru ortam şartlarında tribolojik özellikleri kısa karbon fibere göre gelişmiş ancak sulu ortam şartlarında ise kötüleşmiştir. Sulu ortam şartları altında kayma meydana geldiğinde, zayıf arayüzey etkileşimi, aramit partikül katkılı PI kompozit yerine kısa CF katkılı PI kompozit için daha iyi bir sınır filmi oluşumu için faydalı olmuştur.
24	Bilye-disk	%10-20-30 CF (Hacimsel)	PA6	GCr15 çelik bilye, çapı:2 mm	Kuru	6-9-12-15 N	0.5, 4, 8, 12 Hz	2 saat	Artan yük ve kayma frekansı ile sürtünme katsayısının ve aşınma miktarı artmıştır. Optimum aşınma azalımı %20 karbon içeriğinde elde edilmiştir.
11	Pim-disk	%5-10-20-30 (Hacimsel) kısa CF %5-10-20-30 (Hacimsel) kısa KF	PES	Çelik, yüzey sertliği: HRC44-55	Kuru	800 gram	364 rpm	5 saat	KCF katkısı ile sürtünme katsayısı artarken bu artış %30 KCF oranında %48.8 elde edilmiştir. KKF ilavesi ise sürtünme katsayısını azaltmıştır. Katkısız PES ile karşılaştırıldığında, %20 KKF içeriğinde sürtünme katsayısı %29.8 oranında azalmıştır. PES polimerinin aşınma direnci KCF ve KKF ilavesi ile önemli oranda gelişmiştir. Fiber ilavesi ile PES kompozitlerin spesifik aşınma oranları %71.4 ve %95.7 oranlarında azalmıştır.
25	Bilye-Plaka	%5-15-25 (Hacimsel) CF	POM	Paslanmaz çelik	Kuru	6-9-12-15 N	1-4-8-12 Hz	-	Artan yük ile sürtünme katsayısı artmış, artan kayma frekansı ile azalmıştır. Hacimsel aşınma miktarları ise artan yük ve kayma frekansı ile artmıştır. POM polimerine ilave edilen %15 karbon içeriğinde optimum aşınma azalımı elde edilmiştir.
10	Pim-disk	%10-20 Kısa CF	PEEK	-	Kuru	1 MPa	200 r min	2 saat	PEEK polimerine ilave edilen KCF sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azaltmıştır. Ancak, artan KCF miktarı ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı artmıştır. Çalışma sonucunda %10 KCF içeriğinde optimum tribolojik özellikler elde edilmiştir.
26	Pim-disk	%10 CF %10 CF/%0.5 ÇDKNT	PA66	AISI 1040 çelik disk	Kuru	20-30-40 N	0.4, 0.8 ve 1.2 m/s	1000 m	Artan kayma hızı ve uygulanan yük ile sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı artmıştır. PA66 ve PA66 kompozitlerin aşınma oranı 10^{-10} mm ³ /N.m civarında elde edilmiştir. ÇDKNT ve CF ilavesi PA66 polimerinin aşınma direnci azalmıştır.

Tablo 1'in devamı

20	Pim-disk	%0-25 CF	YYPE	-	Sulu	180 N	100 R/min	-	KCF/YYPE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma kayıpları katkısız YYPE polimerine önemli oranda azalmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak, KCF ilavesi ile YYPE kompozitlerin aşınma direnci artmıştır. En düşük sürtünme katsayısı 40 °C altında 0.076 değeri ile %20 KCF takviyeli YYPE kompozit numunesinde elde edilmiştir.
21	Bilye-plaka	Grafitlen kaplı CF	Epoksi	Sertleştirilmiş krom çelik bilye	Kuru	55-75-95 N	8-12-16 Hz	20 dakika	Karbon fiberlerin grafit ile kaplanması sonucunda, fiberlerin matrisi ile bağlanma eğilimi artmış ve aşınma direncinin gelişmesine katkı sağlamıştır. Karbon fiberlerin kaplanması ile aşınma oranı %52.39 oranında azalmıştır. 75 N'a kadar sürtünme katsayısı artmış bu değerden sonrasında azalmıştır. Kayma frekansı ve sıcaklık arttıkça, sürtünme katsayısı azalmıştır.
22	Bilye-disk	%5CF/%10MoS ₂ /%5Grafit/%5Grafit/%3SiO ₂	%60PEEK/%12PTFE	GGr15 çelik bilye,	Kuru	10 N	73.3 mm/s	-	Hem ortam atmosferinde (oda sıcaklığında) hem de vakum altında (20 ile -100 °C sıcaklık aralığında) sürtünme katsayısı 0.1 değerinin altında elde edilmiştir. PEEK/PTFE kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sıcaklığa bağlı olarak değişmiş ve en düşük değerlere -70 °C'de ulaşmıştır. Grafit ve grafit -30 °C üzerindeki sıcaklıklarda yağlayıcılık etkisi göstermiştir. Oluşan transfer film tabakasının sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde kritik bir faktör olduğu belirtilmiştir.
9	Bilye-disk	%2-3-5 Aramit fiber %2-3-5 PTFE	ÇYMAPE	Tungsten karbür	Kuru	10 N	20 cm/s	500 m	ÇYMAPE polimerine ilave edilen PTFE ve aramit fiber ile spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı azalırken, PTFE oranına bağlı olarak spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı artmıştır. PTFE polimerinin düşük sürtünme katsayısı nedeni ile kayma prosesi süresince aramit fibere göre daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

Tablo 2. Karbon fiber katkılı polimerler için literatür taraması ve sonuçları (Literature review and results for carbon fiber filled polymers)

Sıra No	PPA (ağırlık olarak)	Karbon fiber (ağırlık olarak)	Proses şartları
1	100	-	Çift vidalı compound makinası ısıtıcı sıcaklık aralığı: 310-345 °C, Enjeksiyon makinası ısıtıcı sıcaklık aralığı: 310-340 °C, Enjeksiyon basıncı:150 bar
2	70	30	

Tablo 3. Polimer malzemeler ve deney şartları (Polymer materials and test conditions)

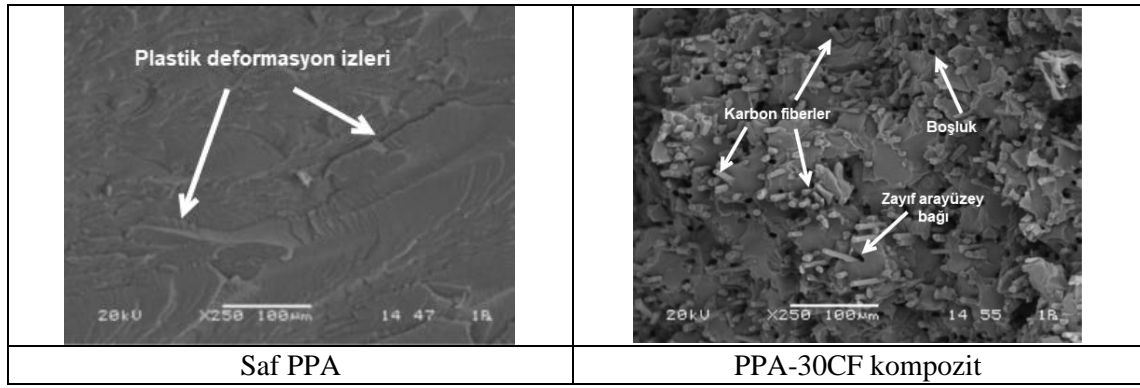
Malzeme	Kayma hızı (m/s)	Yük (N)	Kayma mesafesi (m)	Ortam sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)
PPA	0.5	20	2000	21±2	1.18
PPA-30CF	1.0	30			1.40
		40			

3. BULGULAR (RESULTS)

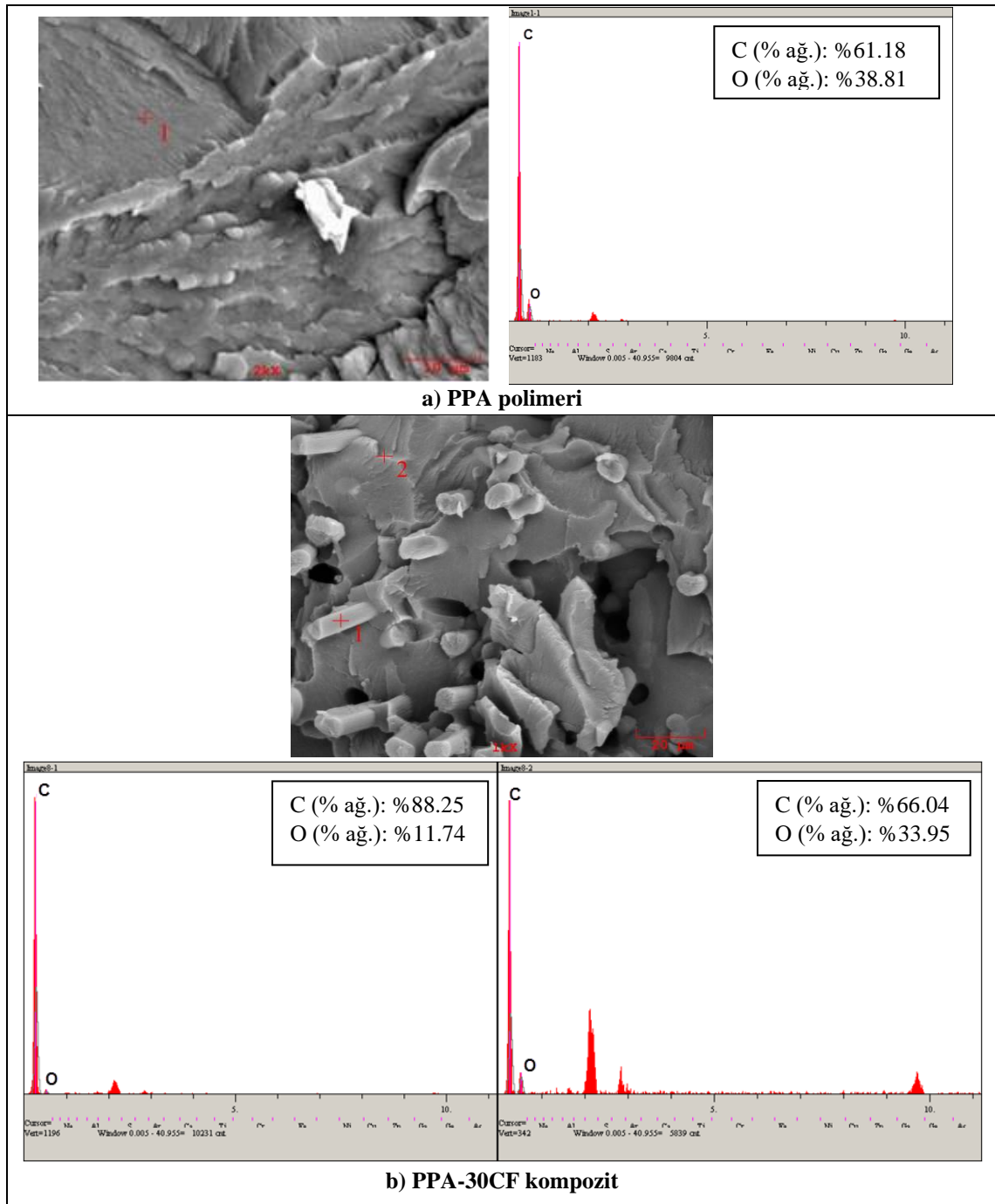
Şekil 3'te saf PPA polimeri le %30 oranında CF katkılı PPA kompozitin kırık yüzeylerinden alınan taramalı elektron mikroskop (SEM)

görüntüleri verilmiştir. Şekil 3-a'da görüldüğü gibi saf PPA polimerinin kırılma yüzeyinde plastik deformasyonun olduğu gözlenmiştir. Şekil 3-b ise CF takviyeli PPA kompozitin kırık yüzeyini göstermekte olup karbon fiberlerin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı, CF ilavesi ile PPA polimer kompozitin gevrekleştiği ve kırık yüzeyin düzgün olarak kırıldığı gözlenmiştir. Bazı bölgelerde karbon fiberin PPA polimeri ile iyi bir bağ yapmadığı ve matris malzemesinden sıyrılarak boşluk oluşturduğu da gözlenmiştir.

Şekil 4 a ve 4 b'de sırasıyla saf PPA polimeri ile %30 karbon fiber takviyeli PPA kompozitin EDS analizi ve belirtilen noktalarda yapılan EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, gerek saf PPA polimeri gerekse PPA-30CF kompoziti için yapısındaki karbon ve oksijen elementlerinin varlığı görülmektedir. Saf PPA polimeri için ağırlıkça karbon oranı %61.18 oranında iken ağırlıkça oksijen oranı %38.81 oranındadır. PPA-30CF kompozit numunesinin farklı yerlerinden alınan EDS analizlerinde de yapıdaki karbon ve oksijen varlığı görülmektedir.

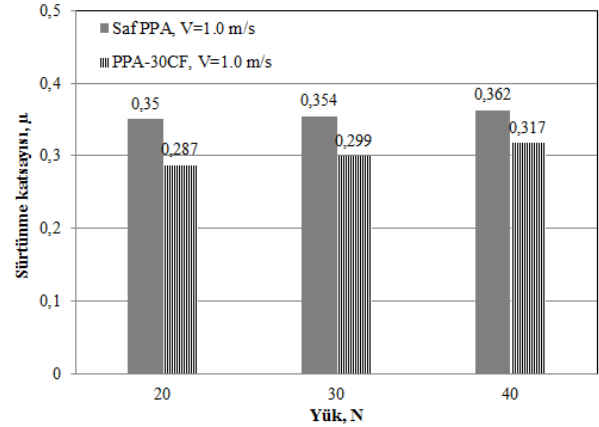


Şekil 3. Saf PPA ve %30 oranında karbon fiber takviyeli PPA kompozitin kırık yüzey mikroyapı görüntüsü (Fractured surface microstructure image of pure



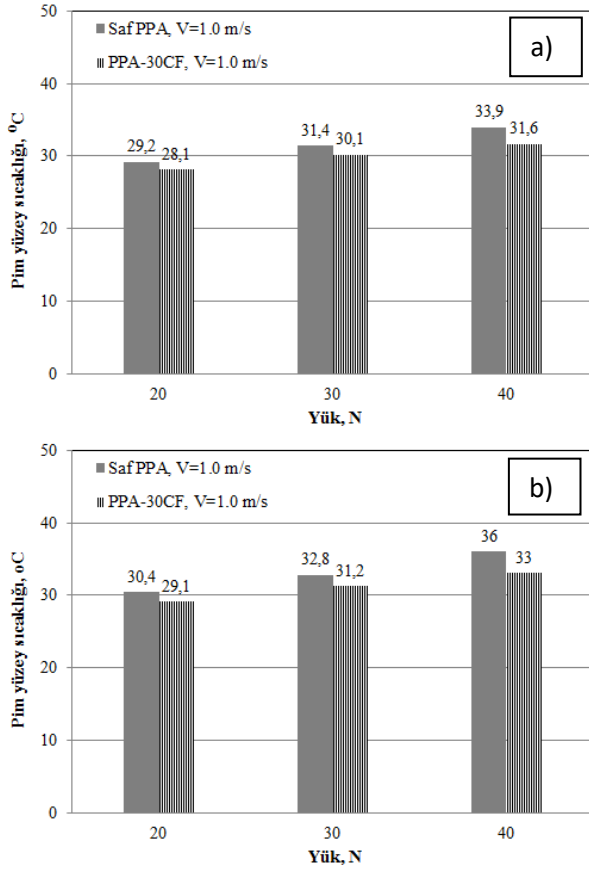
Şekil 4. EDS analizi ve belirtilen noktalarda yapılan EDS analiz sonuçları (% ağı.) (EDS analysis and results of EDS analysis at specified points (% wt.))

Şekil 5'te saf PPA polimeri ile %30 CF takviyeli PPA kompozitin yük-sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yük miktarının 20 N'dan 40 N'a artırılması ile sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Saf PPA polimeri için 20 N'da sürtünme katsayısı 0.35 değerinde iken 40 N yük altında 0.362 olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişim %3.42 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, PPA-30CF kompozit malzemesi için 20 N'da sürtünme katsayısı 0.287 değerinde iken 40 N yük altında 0.317 olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişim %10.45 olarak belirlenmiştir. Benzer sonuçlar Li ve Li [7], Li ve Xia [24] tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Ancak, Zhou ve arkadaşları [5] artan yük ile PA6/PPS karışımı kompozitlerin sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Uygulanan yükün artmasıyla birlikte grafit kristal elyafın daha fazla kırılması ve sıkışması sonucu sürtünme katsayısını azalttığı belirtilmiştir. Katkısız PPA polimeri ile PPA-30CF kompozitin sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırıldığında 20 N yük altında PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki karbon fiber sürtünme katsayısını %21.95 oranında, 30 N yük altında %18.3 oranında ve 40 N yük altında %14.19 oranında azaltmıştır. PPA polimerine ilave edilen CF, mukavemet ve elastiklik modülü değerlerini artırmıştır [41]. Yumuşak olan polimer matris içerisindeki sert faz olan karbon fiber, uygulanan yük altında karşı temas yüzeyi ile gerçek temas alanını azaltarak yapışma kuvvetini ve pulluk (kazıma) etkisini azaltabilir [8, 42]. Dolayısıyla saf PPA polimerine göre sürtünme katsayısı önemli oranda azalmıştır. Golchin ve arkadaşları [15] tarafından yapılan çalışmada da PPS polimerine ilave edilen KCF, Gr ve ÇDKNT dolgu malzemeleri içerisinde en düşük sürtünme katsayısının KCF-PPS kompozitinde elde edildiğini ve sürtünme katsayısını azaltmanın etkili dolgu malzemesinin karbon fiber olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin yük-sürtünme katsayısı grafiği (Load-friction coefficient graph of pure PPA polymer and PPA-30CF composite)

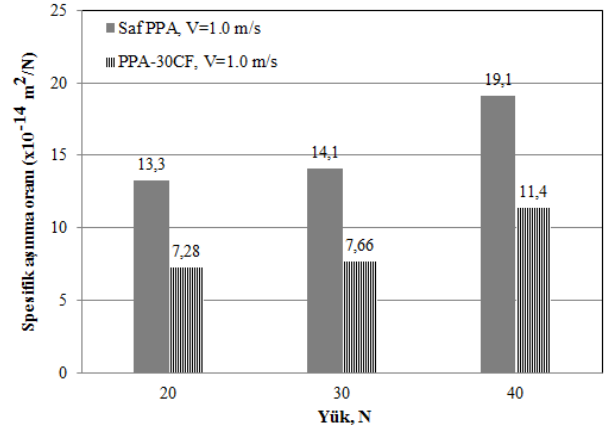
Şekil 6'da saf PPA polimeri ile PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak pim ve disk yüzey sıcaklıklarındaki değişim verilmiştir. Şekil 6-a'da gösterildiği gibi hem saf PPA polimeri hem de PPA-30CF kompozitin pim yüzey sıcaklıklarının artan yük ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Uygulanan yükün 20 N'dan 40 N'a artırılması ile PPA polimerinin sıcaklığı 29 °C'den 34 °C'ye, PPA-30CF kompozitin sıcaklığı 28 °C'den 31.6 °C'ye arttığı belirlenmiştir. Şekil 6-b'de ise çelik disk yüzeyin sıcaklık değişimi verilmiştir. Çelik disk yüzey sıcaklığının uygulanan yüke bağlı olarak 30-36 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Hem pim hem çelik disk yüzey sıcaklıklarına karbon fiberin etkisi incelendiğinde sıcaklığın azaldığı belirlenmiştir. PPA polimerine ilave edilen karbon fiber termal iletkenliği etkileyerek PPA kompozitin ısı transferini etkilemiştir. Uygulanan yük ve kayma hızı aralıklarında, yüzey sıcaklıklarının azalmasının sebebi karbon fiber katkının sürtünme kaynaklı termal etkiyi engellemesidir [25]. Dong ve arkadaşları da [18] karbon fiber takviyesi ile kompozitin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) arttığını ve yüksek sıcaklıklarda yüksek termo-mekanik özelliklerin korunduğunu belirtmiştir.



Şekil 6. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak a) pim yüzey sıcaklıkları b) çelik disk yüzey sıcaklığı değişimi (Variation of depending on the applied load of pure PPA polymer and PPA-30CF composite; a) pin surface temperatures b) steel disc surface temperature variation)

Şekil 7’de saf PPA polimeri ile %30 CF katkılı PPA kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranındaki değişim verilmiştir. Saf PPA polimeri için uygulanan yükün artması ile spesifik aşınma oranı %43.6 oranında artmıştır. Benzer şekilde PPA-30CF kompozitin spesifik aşınma oranı %56.5 oranında artmıştır. PPA polimerine ilave edilen CF 20 N yük altında aşınma oranını %82.6 oranında, 30 N yük altında %84.0 oranında ve 40 N yük altında %67.5 oranında azaltmıştır. Kayma hızı ve yükün etkisi genel olarak değerlendirildiğinde, en yüksek aşınma oranı $19.1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile saf PPA polimerinde elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı ise $7.28 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ değeri ile PPA-30CF kompozit numunesinde elde edilmiştir. Görüldüğü gibi PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki karbon fiber PPA polimerinin aşınma direncini önemli oranda artırmıştır. 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 [43]. 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 [44]. Bu çalışmada SEM resimlerinde de görüldüğü gibi karbon fiber ve PPA polimerleri arasında genel olarak iyi bir yapışma sağlandığı ve dolayısıyla sürtünme ve aşınma özelliklerinin geliştiği düşünülmektedir. Golchin ve arkadaşları [15] sürtünme katsayısının azaltılmasında en etkili dolgu malzemesinin karbon fiber olduğunu belirttikleri çalışmada aşınma direncini de saf PPS polimerine göre 3 kat daha fazla geliştiren dolgu malzemesinin yine karbon fiber olduğunu belirtmişlerdir. Li ve Zhang [45] malzemelerin aşınma direncini etkileyen diğer bir faktörün yüzey sertliği olduğunu belirtmişlerdir. Daha sert bir yüzey sertliğinin daha yüksek aşınma direnci ile sonuçlanacağı belirtilmiştir. Karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerde, sertliği artıran ve aşınma oranı ile sürtünme katsayısını azaltan, yumuşak faz içerisinde dağılmış sert ikinci bir fazın (CF) ilave edilmesi olarak açıklanmıştır.

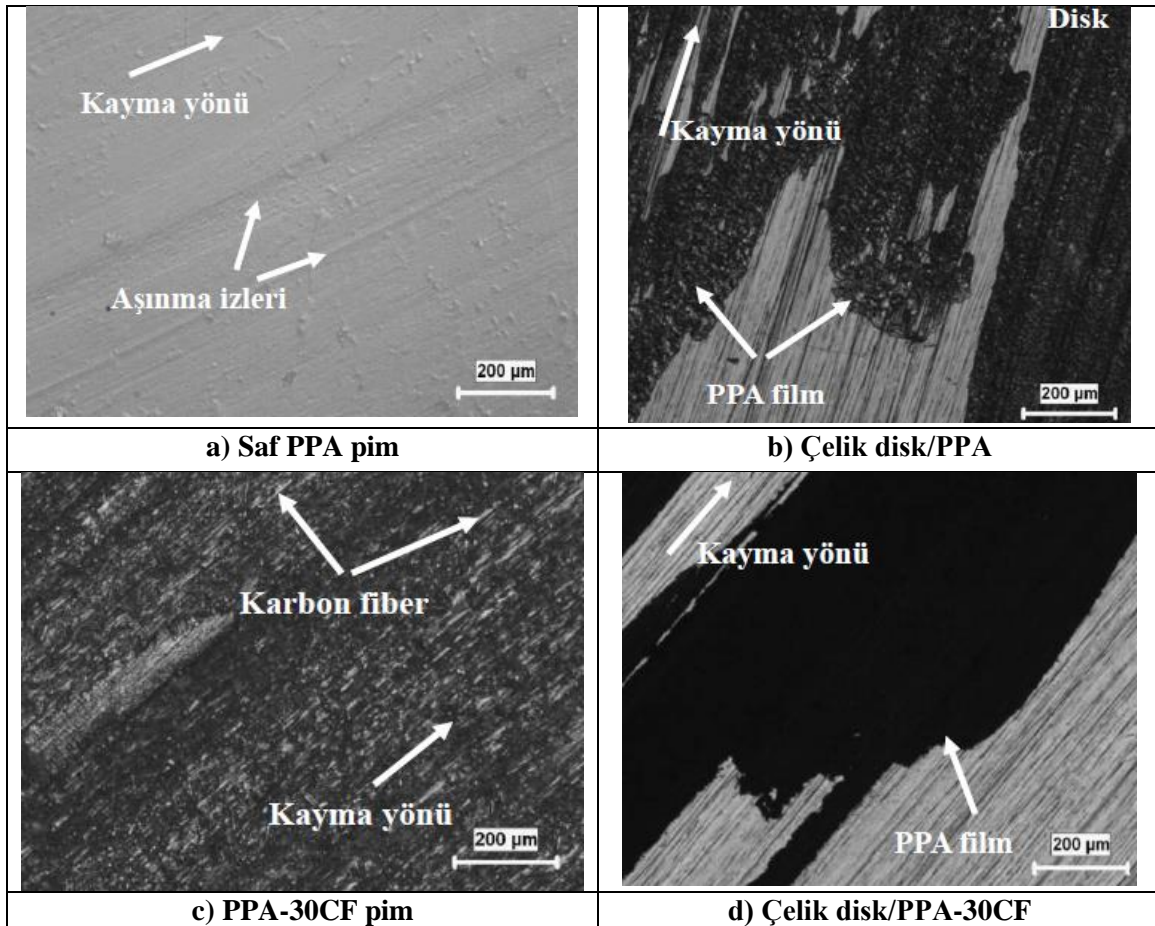


Şekil 7. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi (The variation of the specific wear rate of pure PPA polymer and PPA-30CF composite with applied load)

Şekil 8’de ise saf PPA polimeri ile PPA-30CF kompozit numunelere ait aşınma testleri sonucu elde edilen disk ve pim yüzey optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Her iki disk yüzeyi incelendiğinde transfer film tabakası adı verilen ve disk yüzeyini kaplayarak metal-polimer temasını engelleyen tabakanın oluştuğu gözlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da transfer film tabakasının sürtünme katsayısı ve aşınma direncinin şekillenmesinde önemli bir rol

oynadığı belirtilmiştir. Grafitleştirilen karbon fiberin yağlayıcılık özelliğinin polimer kompozitin çelik diske teması esnasında sürtünme katsayısının azalmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Karbon fiberin çok iyi yağlayıcılık özelliğine sahip grafit kristallerine ayrışabileceği bilinmektedir. Grafit kalıntılarının (debris) karşı disk yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak aşınma sürecini önemli oranda azaltacağı belirtilmiştir [7, 11, 18]. Bu çalışmada da PPA polimerinde yoğun olmayan bir film tabakası gözlenirken PPA-30CF kompozitinde daha yoğun ve yüzey alanını kaplayan bir film tabakası olduğu gözlenmiştir. Pim optik yüzey görüntüleri incelendiğinde ise saf PPA polimerinde kayma yönü doğrultusunda aşınma izlerinin olduğu belirlenmiştir. PPA-

30CF kompozitin pim yüzeyinde karbon fiberlerin varlığı görülmektedir. Gerek karbon fiber gerekse oluşan transfer film tabakası aşınma izlerinin oluşumunu azaltmıştır. Zhao ve arkadaşları [11] fiber takviyeli kompozitlerin aşınma prosesinin, fiber-matris bağının ayrılmasını takiben mikro-çatlama ve mikro-kesme sonucu fiber kırılması ve kayma gerilimi nedeniyle mikro-pulverize aşınmalarından oluştuğunu belirtmişlerdir. Kısa cam fiber tarafından toz haline gelen parçacıkların GF/PES kompozitin sürtünme katsayısını artırdığı belirtilirken, kısa karbon fiberlerin toz haline gelmesiyle oluşan grafit parçacıklarının yüzeyde yağlayıcı bir transfer film tabakası oluşturarak sürtünme ve aşınma direncini geliştirdiği belirtilmiştir [11].



Şekil 8. Saf PPA polimeri ve PPA-30CF kompozitin pim ve disk aşınma yüzeylerine ait optik mikroskop mikroyapı görüntüleri (Yük: 40N, Hız 1.0m/s) (Optical microscope microstructure images of pin and disc wear surfaces of pure PPA polymer and PPA-30CF composite (Load: 40N, Speed 1.0m/s))

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Saf PPA polimeri ve PPA/30CF kompozitlerin sürtünme katsayısı uygulanan yük artışı ile artış göstermiştir.

- PPA polimerinin sürtünme katsayısı 0.35-0.36 aralığında değişirken karbon fiber takviyeli PPA kompozitinde 0.28-0.31 aralığında elde edilmiştir.
- Yükün artırılması ile PPA polimeri ile PPA/30CF kompozitlerin spesifik aşınma oranları artmıştır.
- PPA polimerine ilave edilen %30 oranındaki karbon fiber kompozitin spesifik aşınma oranının ortalama %78 oranında azaldığını göstermiştir.
- Transfer film tabakası sürtünme katsayısının azalması ve aşınma direncinin artmasında önemli rol oynamıştır.
- PPA/30CF kompoziti dişli çark gibi makine elemanı imalatında endüstrinin birçok alanında özellikle triboloji alanında kullanılabilecek olup dişli ömrünün artmasını sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2013-50-01-006).

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gizem HATİPOĞLU, Hüseyin ÜNAL ve Salih Hakan YETGİN: Deneylerin yapılması, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazım aşamalarında eşit katkı sağlamışlardır.

They contributed equally to the experiments, the analysis of the results and the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nuruzzaman D.M., Iqbal Asif A.K.M., Oumer A.N., Ismail N.M., Basri S., Experimental Investigation on the

- Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Nylon, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 114 (2016) 012118.
- [2] Essabir H., Denis R., Rachid B., Abou el K.Q., Effect of Nylon 6 (PA6) Addition on the Properties Glass Fiber Reinforced Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, Polymer Composites, (2018) 14-21.
- [3] Niyaraki M.N., Faramarz A.G., Ismail G., Sajjad D., Predicting of Impact Strength and Elastic Modulus of Polypropylene/EPDM/Graphene/Glass Fiber Nanocomposites by Response Surface Methodology, Technical Journal, 15 No. 2 (2021) 169-177.
- [4] Ünal H., Yetgin S.H., Köse S., Tribological Performance of Polyamide 6/wax Blend for Rolling Bearing, Bushing and gear applications, International Journal of Chemistry and Technology, 7 No. 1 (2023) 77-83.
- [5] Zhou S., Qiaoxin Z., Chaoqun W., Jin H., Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Mechanical and Tribological Properties of Polyamide6/Polyphenylene Sulfide Composites, Materials and Design, 44 (2013) 493-499.
- [6] Chukov D.I., Stepashkin A.A., Maksimkin A.V., Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D., Kuskov K.V., Bugakov V.I., Investigation of Structure, Mechanical and Tribological Properties of Short Carbon Fiber Reinforced UHMWPE-Matrix Composites, Composites Part B, 76 (2015) 79-88.
- [7] Li J., Li X.Z., Evaluation of the Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced Poly(vinylidene fluoride) Composites, Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG), 19 No. 7 (2010) 1025-1030.
- [8] Luo W., Qi L., Yi L., Shengtai Z., Huawei Z., Mei L., Enhanced Mechanical and tribological Properties in Polyphenylene Sulfide/Polytetrafluoroethylene Composites Reinforced by Short Carbon Fiber, Composites Part B, 91 (2016) 579-588.
- [9] Gürgen S., Osman N.Ç., Melih C.K., Tribological Behavior of UHMWPE Matrix Composites Reinforced with PTFE Particles and Aramid Fibers, Composites Part B, 173 (2019) 106949.
- [10] Li F., Ying H., Xiaochen H., Xiyu H., Dong J., Thermal, Mechanical, and Tribological Properties of Short Carbon Fibers/PEEK composites, High Performance Polymers, 30 No. 6 (2018) 657-666.

- [11] Zhao Z.K, Sen-Sen D., Fei L., Hong-Mei X., Yuan-Qing L., Wei-Gang Z., Ning H., Shao-Yun F., Mechanical and Tribological Properties of Short Glass Fiber and Short Carbon Fiber Reinforced Polyethersulfone Composites: A Comparative Study, *Composites Communications*, 8 (2018) 1–6.
- [12] Mahesha C.R, Shivarudraiah, Mohan N., Suprabha R., Three Body Abrasive Wear Studies on Nanoclay/NanoTiO₂ filled Basalt-Epoxy Composites, *Materials Today: Proceedings*, 4, No. 2, Part A, (2017) 3979-3986.
- [13] Suresha B., Mechanical and Three-Body Abrasive Wear Behaviour of SiC Filled Glass Epoxy Composites, *Polymer Composites*, 29 No. 9 (2008) 1020-1025.
- [14] Chairman, C.A., Kumaresh Babu S.P., Three-Body Abrasive Wear Behavior of Basalt and Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Applied Mechanics and Materials*, 121-126 (2011) 534-538.
- [15] Golchin A., Klaus F., Andreas N., Braham P., Tribological Behavior of Carbon-Filled PPS Composites in Water Lubricated Contacts, *Wear*, 328-329 (2015) 456–463.
- [16] Zhang Y.Y., Qing C., Xiao-Long M., Pei H., Yuan-Qing L., Cai-Chao Z., Ning H., Shao-Yun F., Tribological Behavior of Short Carbon Fiber Reinforced Polyetherimide Composite under Water Lubrication Conditions, *Composites Science and Technology*, 216 (2021) 109044.
- [17] Huimin Q., Chao H., Ga Z., Jiabin Y., Yafeng Z., Hongtu H., Comparative Study of Tribological Properties of Carbon Fibers and Aramid Particles Reinforced Polyimide Composites under Dry and Sea Water Lubricated Conditions, *Wear*, 436–437 (2019) 203001.
- [18] Dong F., Guoliang H., Hao L., Liang L., Fengxiang C., Jianzhang W., Fengyuan Y., An Investigation on the Mechanical and Tribological Properties of Carbon Fiber/Polyimide Composites at Elevated Temperatures, *Polymer Composites*, 39, No. 2 (2018) 869-882.
- [19] Chang L., Zhong Z., Lin Y., Klaus F., Tribological Properties of High Temperature Resistant Polymer Composites with Fine Particles, *Tribology International*, 40 (2007) 1170–1178.
- [20] Zhong W., Siqiang C., Zhe T., High-Temperature Tribological Behavior of HDPE Composites Reinforced by Short Carbon Fiber under Water-Lubricated Conditions, *Materials* 15 (2022) 4508.
- [21] Singh M., Srihari D., Rakesh K.G., Vijay Kumar S., Effect of Load, Sliding Frequency, and Temperature on Tribological Properties of Graphene Nanoplatelets Coated Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites, *Journal of Composite Materials*, 57 No. 1 (2023) 121–132.
- [22] Cui W., Khalid R., Zhijun Z., Chengguo Y., Liming T., Weihua Z., Wanhua C., Shiguang P., Qiang X., Liran M., Yuanzhong H., Daxiong L., Bo L., Tingmei W., Tianbao M., Role of Transfer Film Formation on the Tribological Properties of Polymeric Composite Materials and Spherical Plain Bearing at Low Temperatures, *Tribology International*, 152 (2020) 106569.
- [23] Khun N.W., He Z., Lee Hoon L., Chee Yoon Y., Xiao H., Jinglei Y., Tribological Properties of Short Carbon Fibers Reinforced Epoxy Composites, *Friction* 2 No. 3 (2014) 226–239.
- [24] Li J., Xia Y.C., Evaluation of Tribological Properties of Carbon Fiber-Reinforced PA6 Composites, *Polymer Composites* 31, No. 3 (2010) 536-542.
- [25] Yuqin T., Junlong H., The mechanical and Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced POM Composites, *Applied Mechanics and Materials*, 182-183 (2012) 135-138.
- [26] Ozsarıkaya B., Yetgin S.H., Unal H., Tribological Properties of Carbon Fiber and Multi-Walled Carbon Nanotube Filled Polyamide 66 Composites, *Proceedings of the International Conference BALTRIB'2019*, 14–16 November 2019, 33-41.
- [27] Kamendra V., Shubrajit B., Sumit P. Effect of Graphite on Tribological and Mechanical Properties of PA6/5GF Composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (2023) <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11939-8>
- [28] Kumar S.S., Kanagaraj G., Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016) 4347–4357.
- [29] Hatipoğlu G., Poli-tetra-flor-etilen Katkılı Poli-Fital-Amid Polimer Karışımlarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, II-III (2014) 09-14.
- [30] Mateo G de G., Manjusri M., Arturo R.U., Amar K.M., Insights on the Structure-

- Performance Relationship of Polyphthalamide (PPA) Composites Reinforced with High-Temperature Produced Biocarbon, RSC Advances - The Royal Society of Chemistry, 10 (2020) 26917.
- [31] Mateo G de G., Manjusri M., Stefano G., Amar K.M., Statistical Design of Biocarbon Reinforced Sustainable Composites from Blends of Polyphthalamide (PPA) and Polyamide 4,10 (PA410). *Molecules*, 26 (2021) 5387.
- [32] Mateo G de G., Manjusri M., Amar K.M., Polyphthalamide Polymers: A review on Synthesis, Properties, and Advance Manufacturing and Emerging Applications, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (2022) 52965.
- [33] Glenn P.D., Characterization and Properties of Polyphthalamide/Polyamide Blends and Polyphthalamide/Polyamide/Polyolefin Blends, *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2 No. 3 (1996) 229-234.
- [34] Djukic S., Anthony B., Jerome B., Didier R.L., Mechanical Properties of Amorphous and Semi-crystalline Semi-aromatic Polyamides, *Heliyon*, 6 (2020) 03857.
- [35] Cao L., Shuling D., Ziqin H., Zhidan L., Mingqing L., Peng Z., Wei L., Effects of Carbon Nanotube on Mechanical, Crystallization, and Electrical Properties of Binary Blends of Poly(phenylene sulfide) and Polyphthalamide, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125 (2016) 927–934.
- [36] Sandro D.M., Antidio de O.S.N., Maria Odila H.C., Eduardo C.B., Replacement of Metallic Parts for Polymer Composite Materials in Motorcycle Oil Pumps, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36 No. 2 (2017) 149–160.
- [37] Takayuki O., Yosuke N., Influence of Addition of PTFE on the Tribological Properties of CF Reinforced Plant-Derived Semi-Aromatic Polyamide (PA10T) Biomass Composites. *AIP Conference Proceedings*, 2065 (2019) 040008.
- [38] <https://www.stagnoligears.com/en/motor-gears/polyamide-ppa/> (Erişim 03.03.2023).
- [39] <http://www.hxgcs.com/en/product/288.htm> 1 (Erişim 03.03.2023)
- [40] <https://picclick.it/Ingranaggio-Main-gear-corpo-farfallato-Drosselklappe-Audi-Volkswagen-165450877162.html>
- [41] Gizem H., Polifitalamid Kompozitlerin Mekanik, Termal ve Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri, Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, 2014.
- [42] Kukureka S. N., Hooke C. J., Rao M., Liao P., Chen Y. K., The Effect of Fibre Reinforcement on the Friction and Wear of Polyamide 66 Under dry Rolling–Sliding Contact, *Tribology International*, 32 (1999) 107–116.
- [43] Tanaka K., Friction and Wear of Glass and Carbon Fiber-Filled Thermoplastic Polymers, *Journal of Tribology*, 99 No. 4 (1977) 408-414.
- [44] Suresha B., Chandramohan G., Samapthkumaran P., Seetharamu S., Three-body Abrasive Wear Behaviour of Carbon and Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Materials Science and Engineering: A*, 443 No. 1 (2007) 285-291.
- [45] Li J., Zhang L.Q., The Research on the Mechanical and Tribological Properties of Carbon Fiber and Carbon Nanotube-Filled PEEK Composite, *Polymer Composites*, 31 No. 8 (2010) 1315-1320.