

Araştırma Makalesi / Research Article

Burç ve Yatak Uygulamaları için Saf Poli-eter-eter-eton Polimer ve Karbon Elyaf Takviyeli Poli-eter-eter-eton Kompozitin Sürtünme ve Aşınma Performanslarının Karşılaştırılması

Ahmet MASLAVI¹, Hüseyin ÜNAL², Alim KAŞTAN^{3*}

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9571-0640>, ahmad.abdulkarim@ogrsakarya.edu.tr

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-6647>, unal@sakarya.edu.tr

³ Düden Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Antalya Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6514-3796>, kastanalim@gmail.com

Geliş/ Received: 08.04.2022;

Kabul / Accepted: 11.06.2022

ÖZET: Endüstrinin değişik alanlarında, makinelerin bazı aksamalarında plastik malzemeden üretilen burç, makara ve rulman gibi makine elemanları kullanılır. Bu makine elemanlarına bazen kullanım şartlarına bağlı olarak farklı yükler etki etmekte bazen de bu parçalar farklı hızlarda çalışmaktadır. Etki eden şartlara bağlı olarak malzemenin çalışma ömrü belirlenir. Bu çalışmada, saf poli-eter-eter-eton (PEEK) polimeri ile ağırlıkça %30 oranında karbon elyaf (CE) takviyeli poli-eter-eter-eton (PEEK-30KE) kompozitin tribolojik performansları araştırılmıştır. Tribolojik deneyler disk üzerinde pim cihazı kullanılarak oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 30N ve 100N olmak üzere iki farklı yük, 1, 2, 3 ve 4m/s olmak üzere dört farklı hız kullanılmıştır. Deneyler sonucunda saf PEEK polimer ve %30 oranında karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin sürtünme katsayısı, pim sıcaklığı ve spesifik aşınma oranı belirlenmiştir. Optik mikroskop kullanılarak deney malzemelerinin aşınma yüzeyi incelenmiştir. Deneyler sonucunda kayma hızına bağlı olarak hem saf PEEK hem de karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin sürtünme katsayısı azalırken aşınma oranı artış göstermiştir. Karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin saf PEEK polimerine göre ortalama %50 oranında daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEEK, Karbon Elyaf, Aşınma Oranı, Sürtünme Katsayısı, Kompozit.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: kastanalim@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Maslavi, A., Ünal, H., Kaştan A. (2022). Burç ve Yatak Uygulamaları için Saf Poli-eter-eter-eton Polimer ve Karbon Elyaf Takviyeli Poli-eter-eter-eton Kompozitin Sürtünme ve Aşınma Performanslarının Karşılaştırılması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 3(2), 137-150.

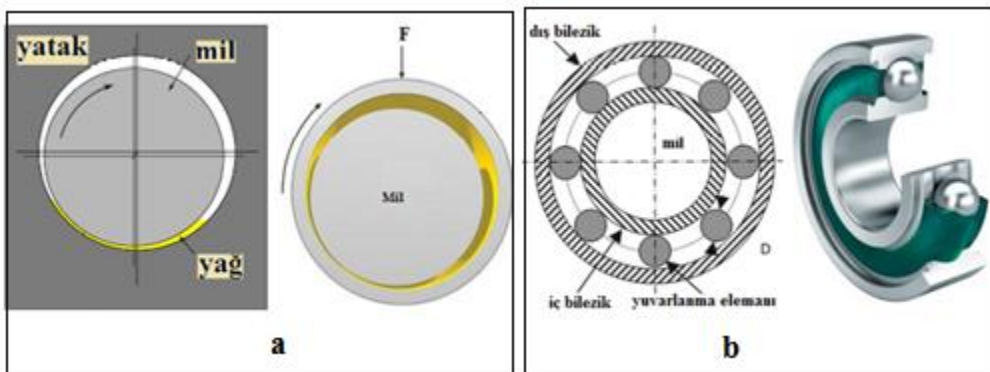
Comparison of Friction and Wear Performances of Pure Poly-ether-ether-ketone Polymer and Carbon Fiber Reinforced Poly-ether-ether-ketone Polymer Composite for Bushing and Bearing Applications

ABSTRACT: Machine elements such as bushings, rollers and bearings made of plastic materials are used in some parts of the machines in different areas of the industry. Sometimes different loads affect these machine elements depending on the usage conditions and sometimes they work at different speeds. Depending on the affecting conditions, the working life of the material is determined. In this study, the tribological performances of pure poly-ether-ether-ketone (PEEK) polymer and 30% by weight carbon fiber (CE) reinforced poly-ether-ether-ketone (PEEK-30CE) composite were investigated. Tribological experiments were carried out using pin-on-disk device at room temperature and dry sliding conditions. Two different loads, both 30N and 100N, and four different speeds (1, 2, 3 and 4 m/s) were used in the experiments. As a result of the experiments, the friction coefficient, pin temperature and specific wear rate of the pure PEEK polymer and 30% carbon fiber reinforced PEEK composite were determined. In addition, the microstructures of the wear surfaces were examined using an optical microscope. As a result of the experiments, depending on the sliding speed, the friction coefficient of both pure PEEK and carbon fiber reinforced PEEK composite decreased while the wear rate increased. It has been determined that the carbon fiber reinforced PEEK composite has an average of 50% higher wear resistance compared to the pure PEEK polymer.

Keywords: PEEK, Carbon Fiber, Wear Rate, Friction Coefficient, Composite.

1. GİRİŞ

Birçok geleneksel malzeme ile karşılaştırıldığında polimerler, üretim kolaylığı, hafiflik, kendinden yağlama etkisi ve mükemmel korozyon direnci gibi üstün avantajlara sahip olduğundan, endüstrinin neredeyse her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Yan ve ark., 2020; Yang ve ark. 2020). Rulmanlı ve burçlu yataklar, birbirlerine göre izafi hareket eden iki parça arasındaki doğrusal veya dönme hareketi sırasında sürtünmeyi azaltmak ve kuvvet doğrultusunda hareketlerine engel olmak için kullanılan makine parçalarıdır. Yatağın şekli, yatak için kullanılan malzemenin cinsi, yağlayıcı özellikleri ve yağlama şekli yatakların sürtünme mekanizmalarını belirler (Harris ve Kotzalas, 2007). Kayar sürtünme prensibinden faydalanılarak üretilen yataklara kaymalı, yuvarlanma sürtünme prensibinin kullanıldığı yataklara rulmanlı yataklar denir (Koç, 2006). Şekil 1’de kaymalı ve rulmanlı yataklar şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1. Kaymalı ve rulmanlı yatakların şematik resimleri a) kaymalı yatak b) rulmanlı yatak (Güngör, 2016)

Çeşitli polimerik malzemelerden ve polimer matrisli kompozitlerden rulmanlar ve burçlar yapılabilmektedir. Polimerik malzemelerin özellikleri metal esaslı malzemelerden bir hayli farklılık göstermektedir. Polimer matrisli malzemelerin en büyük avantajları korozyon ve kimyasallara karşı yüksek direnç, elektrik yalıtkanlığı, iyi sönümlenme kabiliyeti, kolay işlenebilirlik, hafif olmaları ve düşük maliyetleridir. Polimerik malzemeler düşük sürtünme katsayısı, kuru ortamda yağlayıcı gerektirmeden çalışabilmeleri, yüksek aşınma ve yorulma dayanımları sayesinde nem ve kimyasallara karşı direncin yüksek olması istenilen ortamlarda rulman ve burç uygulamalarında tercih edilmektedir (Karaçam, 2012). Şekil 2’de polimer malzemelerden üretilmiş rulman ve burç görülmektedir.



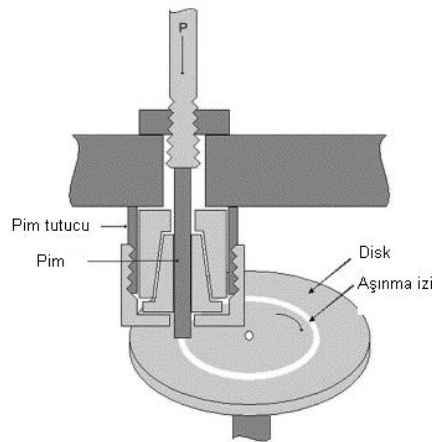
Şekil 2. Polimer malzemedan üretilmiş rulman ve yatak

PEEK polimeri ilk defa 1980’lerin başında ‘ICI Advanced Materials’ firması tarafından üretilerek ‘Victrex PEEK’ adı altında piyasaya sürülmüştür. PEEK polimeri, yarı kristalin termoplastik yapılı bir malzemedir. PEEK karbon, hidrojen ve oksijen atomları sayesinde tam aromatik, yüksek kararlılıkta ve yarı kristalin yapıya sahiptir. Termal özellikleri mükemmel olan PEEK -60 °C ile 260 °C sıcaklıklar arasında özelliklerinde herhangi bir kayıp olmadan kullanılmaktadır. Aynı zamanda PEEK rijit ve tok bir malzemedir. Sürtünme ve aşınma dayanımı yüksek, sürtünme katsayısı düşüktür. Bu özellikleri sayesinde sterilizasyon ve radyasyona karşı oldukça dirençlidir (Şafak, 2001). PEEK uçak sanayinde, elektrik endüstrisinde, takım aletlerinde, giysi parçalarında, ölçme pistonlarında, sürtünmeli yataklarda, yuvarlak valf contalarında, petrol kuyularında, plaka desteklerinde ve kablo endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca reçine olarak da kullanılabilen PEEK rüzgâr türbin kanatlarında, batarya kılıflarında, tutuşması zor olan tekstil ürünlerinde, robotik ve otonom sistemlerde de tercih edilmektedir (Yılmaz, 2002). PEEK lif olarak da kullanılmaktadır. Polieter eter keton (PEEK) lifleri iyi fiziksel özellikleri ve dayanıklılığı ile günümüzde birçok endüstri dalının vazgeçilmez hammaddesi haline gelmiştir. Monofilament, multifilament ya da stapel lifler olarak çeşitli formlarda ve yapılarda üretilen PEEK lifleri; örme, dokuma, dokusuz yüzey gibi temel tekstil formlarında, üç boyutlu kumaşlarda, kompozit ve membran yapılarda da kullanım alanına sahiptir (Hu, 2008; Hanchi ve ark., 1997). PEEK lifleri saf bir yapıya sahip olduğu için üretimi sırasında stabilizasyon için ilave kimyasallar kullanılmamaktadır. Bundan dolayı EEC (European Economic Commission) ve FDA (Food and Drug Administration) tarafından medikal alanda ve yiyecekler ile temas halinde kullanılması uygun görülmüştür (Hearle, 2001; Kalaycı ve ark., 2017). PEEK on yıldan daha uzun süredir yapay kafa plakalarında, parmak ve diz eklemlerinin bileşenlerinde, omurga implantlarında, kemik splintleme vidalarında, kardiyak uygulamalarda ve nörolojik uygulamalarda kullanılmaktadır (Schmidlin ve ark., 2010; May, 1998). Karbon elyafın ilk üretimi 1800’lerin sonunda gerçekleşmiştir. Bambu liflerinin karbonizasyonu sonucunda elde edilen karbon elyaflar akkor lambalarda filament olarak kullanılmıştır. Kompozit

malzemelerdeki kullanımı ise 1950'lerde başlamıştır. Union Carbide Corporation firması gelişmiş malzemeler üretmek amacıyla poliakrilonitrilin karbonizasyonu ile karbon elyaf üreterek Rayon ticari ismi ile satışa sunmuştur. Poliamidler, fenolik reçineler polisterler ve polivinil alkol gibi polimerlerden de karbon elyaf üretimi yapılmışsa da zift ve PAN'ın karbonizasyonu ile üretilen elyafların mekanik özelliklerinin diğer elyaflardan daha üstün olduğu tespit edilmiştir. Günümüzde karbon elyaflar %90 civarında PAN'dan üretilmektedir (Mazumdar, 2002; Baird, 2001; Çatak, 2016). Karbon elyafların birim fiyatlarının düşmesi sonucunda kullanım alanları giderek artmaktadır. Birçok araştırmacı, polimerlerin, metallerin, seramik matris fazlı malzemelerin özelliklerini geliştirmek için karbon nanotüpü ve karbon elyafı katkı malzemesi olarak kullanmaktadır (Topcu, 2018). Karbon elyafların hafif ve yüksek mukavemetli olması özellikle havacılık sektöründe kullanımını arttırmıştır. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler otomobil ve tren kaportalarında, şaftlarında, rulmanlı yataklar ile hidrojen kullanan otomobillerin yakıt depolarında tercih edilmektedir. Karbon elyaflar bisikletler, kanolar, tenis masaları, golf sopaları, sörf tahtaları gibi kullanımlarının yanında, enerji alanında rüzgâr güllerinde, medikal sektörde tekerlekli sandalye, yapay kol ve bacak protezlerinde ve elektronik alanındaki birçok uygulamalarda tercih edilmektedir (Genç, 2008). Daha önce (Kumar ve Rajmohan, 2019; Gao ve ark., 2022; Koç ve ark., 2019; Yetkin ve ark., 2013, Yi-Lan ve ark., 2019; Zhua ve ark. 2020; Houve ark., 2018; Juanjuan ve ark., 2020; Samyn ve ark., 2007) benzer çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada burç ve yatak uygulamaları için saf PEEK ve karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin sürtünme ve aşınma performansları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Aşınma deneylerinde kullanılan saf PEEK, Ketron PEEK-1000 ticari koduyla 10 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda çubuk formunda temin edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli PEEK ise Ketron PEEK-CA30 ticari koduyla yine 8 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda çubuk formunda temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan saf PEEK ve %30 karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sürtünme ve aşınma testleri, pim-disk aşınma test cihazında 2000 m kuru kayma şartları altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 3'te pim-disk cihazının şematik resmi verilmiştir.



Şekil 3. Pim-disk aşınma test cihazı şematik gösterimi

Aşınma deneylerinde 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda test numuneleri kullanılmaktadır. Çubuk formundaki numuneleri bu ölçülere getirebilmek için revolver torna tezgâhı kullanılmış ve

numuneler hassas bir şekilde tornada işlenmiştir. AISI 304 paslanmaz çelik ise karşı disk malzeme olarak kullanılmıştır. Çelik disk malzemesi 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde önce kesilmiş sonra alın ve silindirik yüzey tornalaması yapılmış ve daha sonrasında ise düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Taşlama yapılan diskin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü 0,30-0,40 Ra aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, normal uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilir ve eşitlik 1 ile hesaplanır. Burada, μ : Sürtünme katsayısını, F_S : polimerin yanal sürtünme kuvveti (N) ve F_N ise Normal kuvveti (N) ifade eder.

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

Her bir aşınma testinden önce ve sonra saf PEEK polimeri ile cam elyaf takviyeli PEEK kompozit pimlerin ağırlıkları ölçülmüş, aradaki fark alınarak ağırlık kaybı (Δm) tespit edilmiştir. Aşağıda verilen formül kullanılarak, aşınma test numunelerinin spesifik aşınma oranları(W) Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır. Burada; Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m), ρ : malzemenin yoğunluğu (g/cm^3), F: uygulanan yük (N).

$$W = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (2)$$

Pim yüzey sıcaklıkları kızılötesi termometre ile deney süresince ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Çelik disk yüzey pürüzlülüğü için PCE-RT 2300 marka cihaz kullanılmıştır.

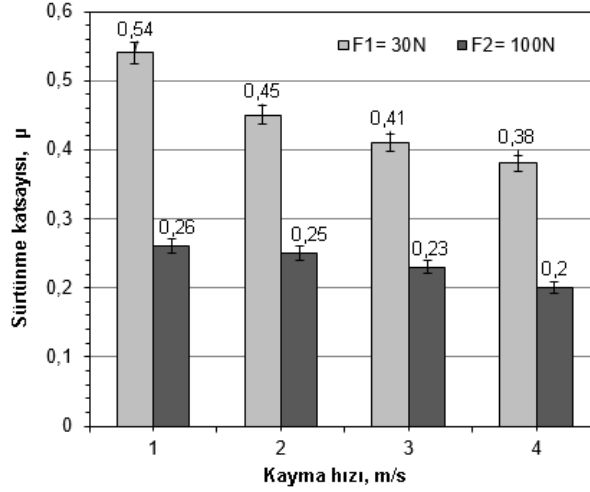
Çizelge 1. Saf PEEK ve %30 karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri

Özellik	Saf PEEK	PEEK+%30KE	Birimi	Test standardı
	Değeri			
Yoğunluk	1.31	1.40	g/cm^3	ASTM D792
Su emme, (24 saat)	0.06	0.05	%	ASTM D570(2)
Çekme mukavemeti	115	144	MPa	ASTM D638
Elastik modülü (çekmede)	4300	9200	MPa	ASTM D638
Kopmadaki % uzama	7	5	%	ASTM D638
Termal iletkenlik	0.25	0.92	W/ m. $^{\circ}$ K	-
Sertlik	105	102	Rockwell M	ASTM D785
Ergime sıcaklığı	340	340	$^{\circ}$ C	ASTM D3418
Maksimum sürekli çalışma sıcaklığı	250	250	$^{\circ}$ C	

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

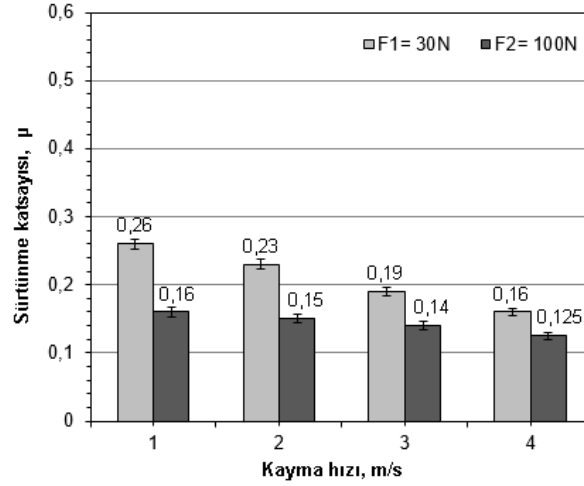
Şekil 4'te saf PEEK polimerinin farklı yükler ve farklı hızlarda yapılan deneylerden elde edilen sürtünme katsayısı kayma hızı grafikleri verilmiştir. Kayma hızının artması ile birlikte hem 30 N ve hem de 100 N yükte yapılan deneylerde sürtünme katsayısı azalmıştır. 30 N aşındırma yükü altında yapılan tüm deneylerin sürtünme katsayısı 100 N ile yapılan deneylerden daha yüksek çıkmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı 30 N yük ve 1m/s hızda yapılan deneyde μ : 0,54, en düşük sürtünme katsayısının değeri ise 100 N aşındırma yükü altında 4m/s hızda μ : 0,2 olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısında en fazla azalma 1m/s hızda aşındırma yükünün 30 N'dan 100 N'a çıkarılması ile elde edilmiştir. Bu azalma yaklaşık %52 oranındadır. Daha önce yapılan çalışmada (Kumar ve Rajmohan, 2019) yüksek yükte çelik disk üzerinde aşındırıcı etkinin daha fazla olduğunu, sürtünme kuvvetinin PEEK matris kompozitlerini daha yumuşak hale getirmek için yüksek bir termal etki

sağladığını belirtmişlerdir. Daha yüksek kayma hızlarında, çelik disk yüzeyinin daha kolay modifiye edilebildiğini ve transfer filmin daha hızlı oluşması sonucunda yumuşak polimer yüzeyin sert metal yüzeyden koruma sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca kayma hızının artması ile sürtünme katsayısındaki azalmayı ise düşük kayma hızında, hem PEEK kompozitlerinin hem de çelik muadili kayma yüzeylerinin pürüzlü olması nedeniyle yüksek sürtünme katsayısı ile sonuçlanan güçlü bir "kilitleme" meydana getirdiğini ancak hızın artması ile bu mekanizmanın zayıflaması sonucunda sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Sonuçlar literatür ile uyum göstermektedir.



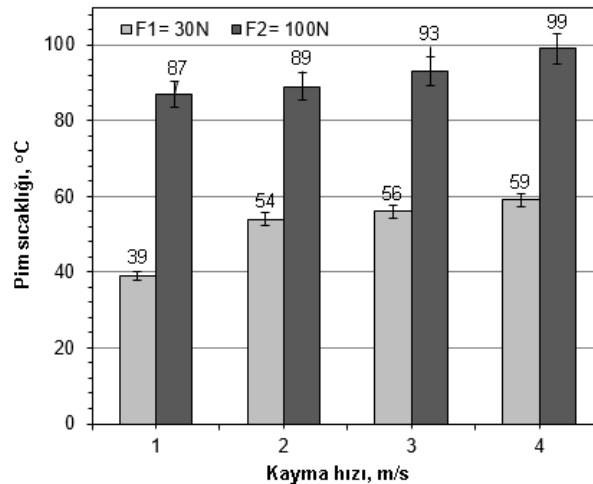
Şekil 4. Saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

Şekil 5'te %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitlerin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Katkısız PEEK polimerinde olduğu gibi kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında azalma gözlemlenmiştir. Benzer şekilde aşındırma yükünün artması ile de sürtünme katsayısında da azalma olmuştur. Ancak PEEK+%30KE içeren kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerinde katkısız PEEK ile kıyaslandığında çok önemli oranlarda azalma olmuştur. Katkısız PEEK polimerinin 30 N yük ve 1 m/s hızda sürtünme katsayısı değeri 0,54 iken PEEK+%30 KE'in ise sürtünme katsayısında %52 azalma olmuş ve bu değer 0,26'ya gerilemiştir. 30 N aşındırma yükü altında yapılan deneylerde ve 2 m/s hızda sürtünme katsayısında %49, 3 m/s hızda %54, 4 m/s hızda yapılan deneylerde ise %52 azalma olmuştur. 100 N aşındırma yükünde ise 1 m/s hızda %39, 2 m/s hızda %40, 3 m/s hızda %39 ve 4 m/s hızda ise %37 azalma olduğu tespit edilmiştir. PEEK içerisine ilave edilen %30 KE sürtünme katsayısını önemli oranda azaltmıştır. Başka bir çalışmada (Gao ve ark., 2022) PEEK içerisine ilave edilen KE'nin sürtünme katsayısını düşürdüğünü, aşınma yüzeyinde transfer film oluşturmada etkili olduğunu ve oluşan filmin aşınma yüzeyinin topoğrafik yapısıyla ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Sürtünme katsayısındaki azalma malzemenin servis sırasındaki performansını olumlu yönde etkileyecektir.



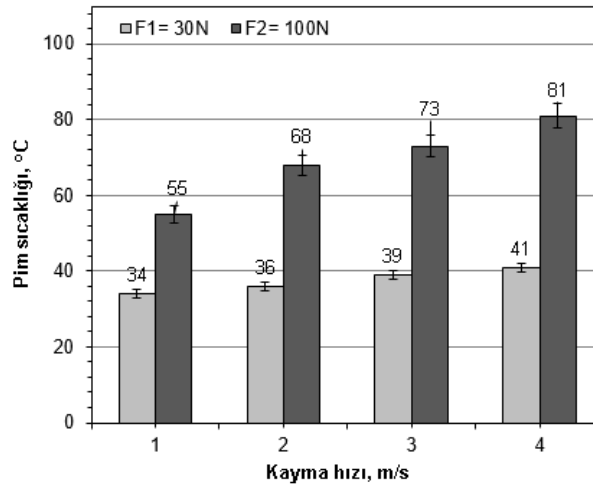
Şekil 5. %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

Şekil 6’da saf PEEK polimerinin farklı yükler ve farklı hızlarda yapılan deneylerden elde edilen kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi verilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler incelendiğinde yükün ve hızın artması ile pim sıcaklığının da arttığı söylenebilir. En düşük pim sıcaklığı 1 m/s hızda ve 30 N aşındırma yükünde 39°C ve en yüksek pim sıcaklığı ise 4 m/s hızda 100 N aşındırma yükü altında 99°C olarak ölçülmüştür. Kayma hızının benzer olduğu yükün 30 N’den 100 N’a çıkarılması ile pim sıcaklığındaki değişim en çok 1 m/s hızda 48 °C, en az değişim ise 2 m/s hızda 35 °C olmuştur. Aşındırma yükünün 30 N olduğu deneylerde 1 m/s hızda pim sıcaklığı 39 °C, 2 m/s hızda 54 °C, 3 m/s hızda 56 °C ve 4 m/s hızda 59 °C’ye yükselmiştir. Aynı yükte hızın 1 m/s’den 2 m/s’ye çıkması ile pim sıcaklığında 15 °C artış olmuştur. Ancak 2 m/s-4 m/s hız aralığında yapılan deneylerde pim sıcaklığında sadece 5 °C’lik artış gerçekleşmiştir. 30 N alıdırma yükünde 1-4 m/s hızlarda yapılan deneylerde pim sıcaklığındaki değişim 20 °C’dir. 100 N aşındırma yükünde ise 1 m/s hızda pim sıcaklığı 87 °C, 2 m/s hızda 89 °C, 3 m/s hızda 93 °C ve 4 m/s hızda 99 °C olmuştur. Aynı yükte 1-4 m/s hızlarda yapılan deneylerde pim sıcaklığındaki değişimi 12 °C olarak ölçülmüştür. Bu veriler doğrultusunda kayma hızına ve aşındırma yüküne bağlı olarak pim sıcaklığında önemli oranda değişimlerin olduğu söylenebilir. Benzer şekilde (Koç ve ark., 2019) artan yük ile deney numunelerinin sıcaklığının da yükseldiğini belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada ise (Yetgin ve ark., 2013) benzer sonuçlar bulmuşlardır.



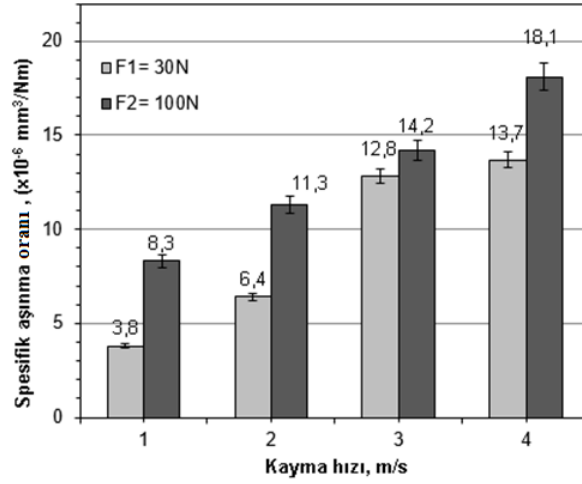
Şekil 6. Saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi

Şekil 7’de %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitlerin farklı yükler altındaki kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi verilmiştir. Katkısız PEEK polimerinde olduğu gibi kayma hızının ve aşındırma yükünün artması ile pim sıcaklığında artış meydana gelmiştir. Ancak bu artış daha sınırlı olmuştur. PEEK+%30 KE kompozitlerin pim sıcaklığı tüm deneylerde katkısız PEEK polimerinden daha düşüktür. PEEK+%30 KE kompozitlerde en düşük yüzey sıcaklığı 1 m/s kayma hızında ve 30 N aşındırma yükü altında 34 °C olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklık değeri katkısız PEEK polimerine göre 5 °C daha düşüktür. En yüksek pim 81 °C sıcaklığına 4 m/s kayma hızında ve 100 N aşındırma yükünde ulaşılmıştır. Benzer şartlarda yapılan deneyde katkısız PEEK polimerine göre 18 °C daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yükün 30 N’den 100 N’a çıkarılması ile pim sıcaklığı 1 m/s kayma hızında 21 °C, 2 m/s kayma hızında 32 °C, 3 m/s kayma hızında 37 °C ve 4 m/s kayma hızında 40 °C artış olmuştur. Katkısız PEEK polimerlerde benzer deneylerde sıcaklık artışının daha fazla olduğu görülmüştür. Pim sıcaklığındaki bu azalma, PEEK içerisine eklenen KE ile ısıl iletkenliğin artması ve kendi kendine yağlama özelliğinin gelişmesinden kaynaklanmaktadır. Benzer çalışmada (Yi-Lan ve ark., 2019) grafitin yüksek termal iletkenliğinden dolayı kayma sırasında temas sıcaklığını düşürdüğünü ve temas alanını azaltarak sürtünmeyi azalttığını belirtmişlerdir. Pim sıcaklığındaki önemli azalmanın gerçek çalışma sırasında çok önemli avantajlar sağlayacağı aşikârdır.



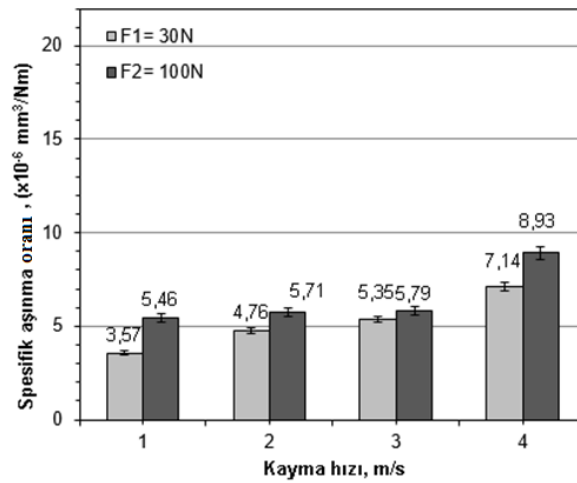
Şekil 7. %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin farklı yükler altındaki kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi

Şekil 8’de Saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki spesifik aşınma oranının yüke ve kayma hızına göre değişimi verilmiştir. Polimere uygulanan aşındırma yükünün artması ile aşınma oranında artış görülmüştür. Aşındırma yükünün 30 N’den 100 N’arttırılması ile 1 m/s hızda $3,8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’den $8,3 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’ye, 2 m/s hızda $6,4 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’den $11,3 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’ye, 3m/s hızda $12,8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’den $14,2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’ye, 4 m/s hızda ise $13,7 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’den $18,1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’ye yükselmiştir. En fazla değişim 2 m/s hızda $4,9 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve en az değişim 3m/s hızda $2,4 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olmuştur. Kayma hızının artması ile aşınma oranı da artmıştır. Kayma hızı en düşük 1 m/s hızda $3,8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve en yüksek ise 4 m/s hızda $18,1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine ulaşmıştır. 30 N aşındırma yükü altında kayma hızının 1 m/s hızdan 4 m/s hıza yükselmesi ile aşınma oranında %360 artış olmuştur. Bu oran 100 N aşındırma yükünde ise %218 civarında olmuştur. Başka bir çalışmada (Zhua ve ark., 2020) aşındırma yükünün artması ile birlikte spesifik aşınma oranının da arttığını belirtmişlerdir. Şekil 7’de görüldüğü gibi deney sırasında yükün ve hızın artması ile sıcaklıkta ciddi artış olmuştur. Sıcaklık artışının polimer zincirlerinin gevşemesine ve PEEK matrisin mukavemetinin düşmesine neden olduğu sanılmaktadır. Bunun sonucunda aşınma oranında artış gözlemlenmiştir.



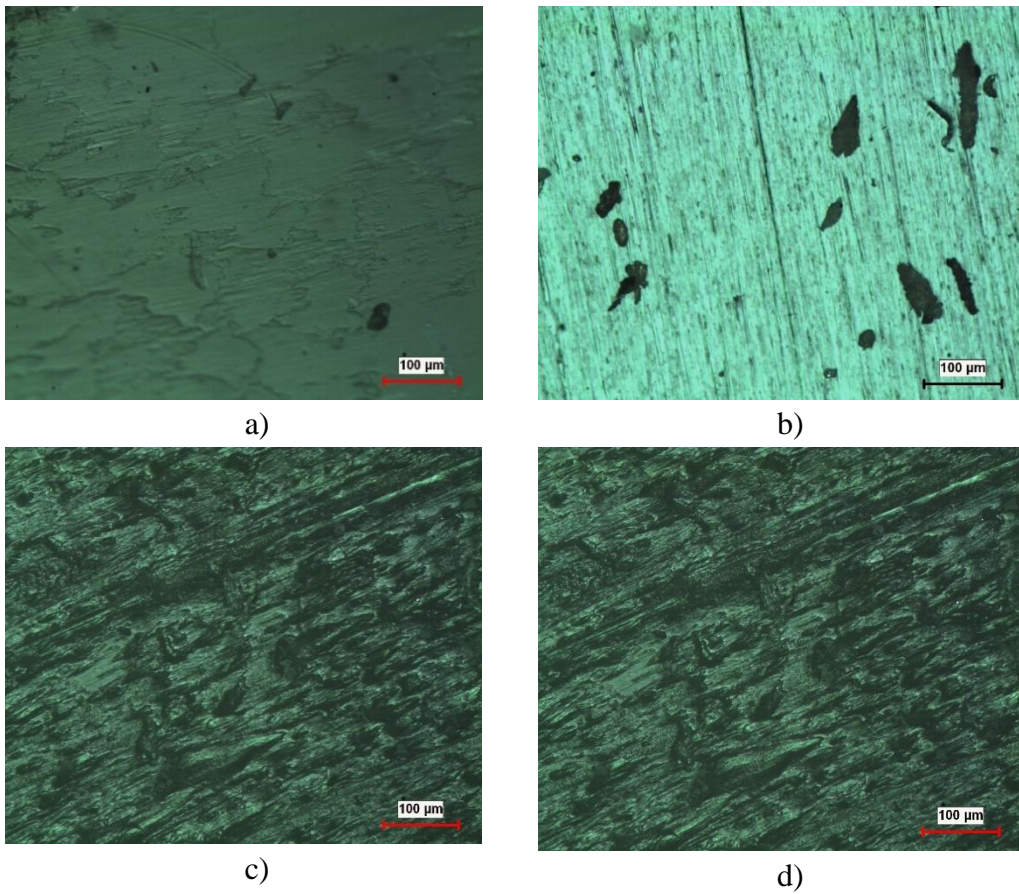
Şekil 8. Saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki aşınma oranı- kayma hızı ilişkisi

Şekil 9’da %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitlerin farklı yükler ve hızlardaki aşınma oranında meydana gelen değişim verilmiştir. Kayma hızının artması ile birlikte hem 30 N aşındırma yükünde ve hem de 100 N aşındırma yükünde aşınma oranında artış görülmüştür. Aşınma oranının yük ve hıza göre değişimi bakımından katkısız PEEK ile KE katkılı PEEK polimerlerin benzer davranış gösterdiği söylenebilir. Ancak aşınma oranı değerlerinde çok ciddi farkların olduğu gözden kaçmaması gereken önemli bir parametredir. Tüm deney parametrelerinde KE katkılı PEEK polimerlerin aşınma oranı değerleri katkısız PEEK’e göre çok daha düşüktür. Katkısız PEEK’in 4 m/s hız ve 30 N yükteki aşınma oranı $13,7 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken KE katkılı PEEK’i $7,14 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’dir. Bu polimerlerin 100 N’deki aşınma oranları ise katkısız PEEK’in $18,1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken KE katkılı PEEK’in $8,93 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ’dir. 100 N yük ve 4 m/s hızda aşınma oranında azalma %52 olmuştur. Başka bir çalışmada (Hou ve ark., 2018) PEEK matrisine ilave edilen grafen oksit sayesinde, aşınma yüzeyinde yüksek mukavemet ile mükemmel aşınma davranışına sahip olan yoğun ve düzgün bir transfer filminin oluşması sayesinde, kayma yüzeyine uygulanan yükün büyük bir kısmını taşıyabileceği, bunun sonucunda da aşınma oranında azalma olduğu ifade edilmiştir. PEEK içerisine ilave edilen KE ile spesifik aşınma oranındaki büyük oranda azalma, malzemenin servis ömrünü uzatarak maliyetinde düşüş sağlayacaktır.



Şekil 9. %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitlerin farklı yükler altındaki aşınma oranı- kayma hızı ilişkisi

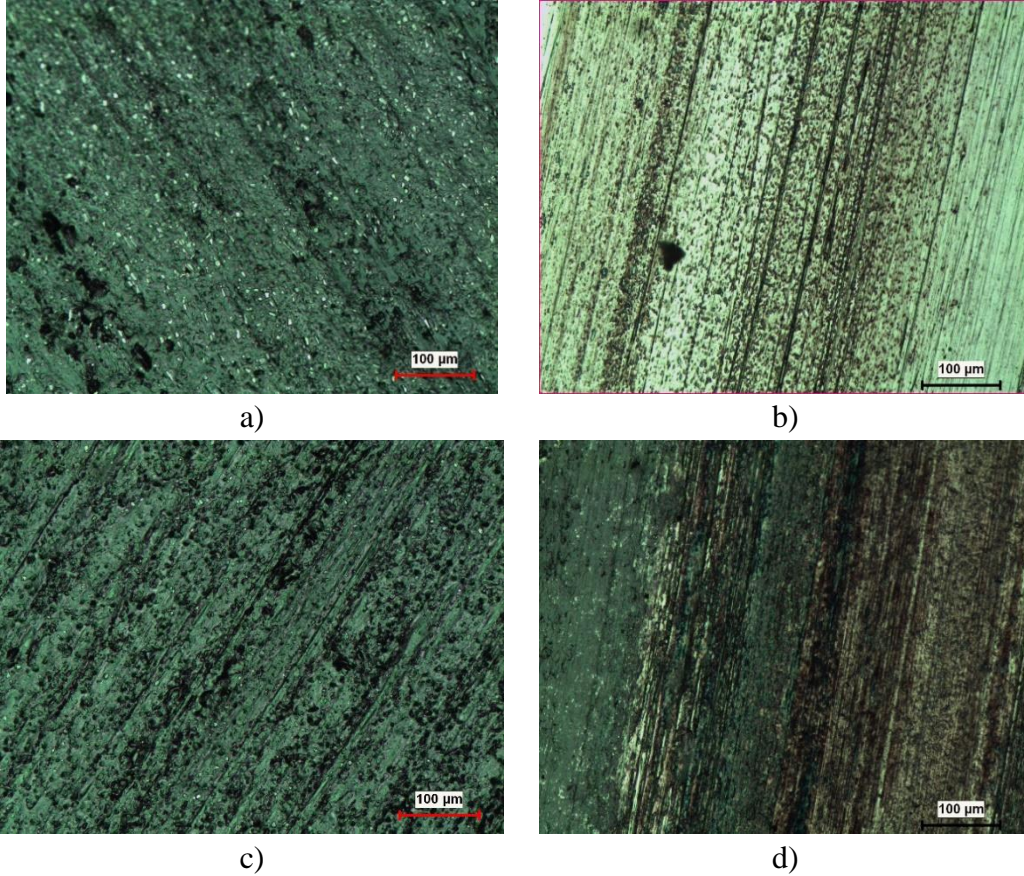
Şekil 10'da katkısız PEEK polimerinin 1 m/s ve 4 m/s hızda 100 N yükteki pim ve disk yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Katkısız PEEK polimerinin pim ve disk yüzeylerinde aşınma izleri oldukça belirgindir. Şekil 10a'da aşınmaya maruz kalan pim yüzeyinden tabakalar halinde polimerin koparak ayrıldığı, Şekil 10b'de ise disk yüzeyinde herhangi bir koruyucu film tabakasının olmadığı, sadece pim yüzeyinden kopan polimer parçalarının olduğu görülmektedir. Şekil 4 ve 5'te görülen sürtünme katsayısının daha yüksek olmasının sebeplerinden biri de budur. Şekil 10c incelendiğinde hız 4 m/s olduğunda pim yüzeyindeki aşınmanın karakterinin değiştiği çok sayıda küçük parçaların yüzeye yapıştığı, aşınma mekanizmasında adezyonun etkili olduğu söylenebilir. Şekil 10d'de gösterilen disk yüzeyi de bu aşınma mekanizmasını doğrulamaktadır. Artan ısı etkisiyle polimer parçalarının disk yüzeyine yapışmış ve homojen olmayan kalınlıkta film tabakası oluşturmuştur. Genel olarak katkısız polimerlerin birçoğunda benzer aşınma mekanizmasıyla karşılaşıldığı söylenebilir.



Şekil 10. Katkısız PEEK polimerinin 1 m/s ve 4 m/s kayma hızında aşınan pim ve disk yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri (Yük:100 N), a) saf PEEK pim (100 N, 1 m/s), b) saf PEEK/çelik disk (100 N, 1 m/s), c) saf PEEK pim (100 N, 4 m/s), ve d) saf PEEK/çelik disk (100 N, 4 m/s)

Şekil 11'de %30 karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin 1 m/s ve 4 m/s kayma hızında 100 N yükteki aşınan pim ve disk yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri mevcuttur. Şekil 11a'da görülen pim yüzeyi incelendiğinde derin tabaka halinde kopmaların, çiziklerin ve oyukların olmadığı, katkısız PEEK'e göre aşınma yüzeyinin düzgün olduğu söylenebilir. Şekil 11b'de ise pim yüzeyinde aşınma mekanizmasını olumlu yönde etkileyen film tabakasının Şekil 10b'ye kıyasla çok daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 11c'de derin olmayan kayma yönünde aşınma çizgileri vardır. Ancak aşınma yüzeyinde tabaka ayrılması ve yapışması gözükmemektedir. Şekil 11c'deki resim

incelendiğinde ise disk yüzeyinin neredeyse tamamen koruyucu film tabakası ile kaplandığı söylenebilir. Karbonun katı yağlayıcı özelliğinin olması aşınma mekanizması üzerindeki etkinliğini göstermiştir. Bunun sonucunda malzemedeki kütle kaybı azalmış ve PEEK+%30KE kompozitlerin aşınma direnci artmıştır. Samyn ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (Samyn ve ark., 2007) katı yağlayıcıların, aşınma sırasında daha homojen bir transfer film oluşturması nedeniyle düşük sürtünme ve aşınma için en uygun katkıları olduğunu belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada ise Gao ve arkadaşları (Gao ve ark., 2022) karbon fiberlerin kuru sürtünme ortamında transfer film oluşturmada etkin olduklarını ifade etmişlerdir. Şekil 8’de bu olumlu etki açık bir biçimde görülmektedir.



Şekil 11. %30 karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin 1 m/s ve 4 m/s kayma hızında aşınan pim ve disk yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri (Yük: 100 N), a) 30 KE-PEEK pim (100 N, 1 m/s), b) 30 KE-PEEK/çelik disk (100 N, 1 m/s), c) 30 KE-PEEK pim (100 N, 4 m/s), d) 30 KE-PEEK/çelik disk (100 N, 4 m/s)

4. SONUÇ

Bu çalışmada burç ve yatak uygulamaları için saf PEEK ve karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin sürtünme ve aşınma performansları karşılaştırılmalı olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- PEEK içerisine %30KE ilave edilmesi sonucunda sürtünme katsayısında %52’ye kadar azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu azalma malzemenin aşınma direncini arttıracaktır.
- Katkısız PEEK polimerlerin aşınma sırasında pim sıcaklıkları 39-99 °C arasında iken PEEK+%30KE ilave edilmiş kompozitlerin aşınma sıcaklıkları 34-81 °C aralığında ölçülmüştür. Pim sıcaklığındaki azalma çalışma sırasında avantaj sağlayacaktır.

- KE ilave edilmiş tüm PEEK kompozitlerin aşınma oranında %52'ye kadar azalma olduğu tespit edilmiştir. Aşınma oranındaki bu azalma servis ömrünün uzamasını sağlayacaktır.
- Aşınma yüzeylerinin optik resimleri incelendiğinde katkısız PEEK polimerinin pim yüzeylerinde daha derin aşınma izlerinin olduğu, disk yüzeylerinde ise koruyucu film tabakasının yeterince oluşmadığı görülmüştür. KE katkılı PEEK polimerlerin aşınma yüzeylerinde ise daha az derinlikte çizilmeler ve özellikle disk yüzeyinde transfer film oluştuğu tespit edilmiştir. Oluşan koruyucu film aşınma sırasında avantaj sağlayacaktır.
- Yapılan çalışma sonucunda KE katkılı PEEK polimerlerin rulman ve yatak uygulamalarında kullanımının avantaj sağlayacağı söylenebilir.

5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, desteklerinden dolayı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 008-2020) teşekkürü bir borç bilir.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Ahmet MASLAVİ, Hüseyin ÜNAL ve Alim KAŞTAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesine katkı sağlamışlardır ve Alim KAŞTAN son onay ve tam sorumluluk kısmında da katkıda bulunmuştur.

8. KAYNAKLAR

- Baird D. G., Encyclopedia of Physical Science and Technology, Third Edition, Elsevier Science Ltd, pp. 621-640, 2001.
- Cao H., Dong X., Qu D., Dong C., Zhao C., Sun D., Gu L., Wu B., Transfer film growth of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic poly (ether ether ketone) facilitated by surface texture during dry sliding, Journal of Material Science 57, 383-397, 2022.
- Çatak K., Fonksiyonlanmış ve silanlanmış karbon elyaf takviyeli poliamid kompozitlerin ısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2016.
- Genç G., Elyaf sarma yöntemiyle üretilen karbon elyaf kompozitlerde ön gerilme parametrelerinin elyaf ve kompozit mukavemetine etkisi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi (Basılmış), 2008.
- Güngör K., Sinterlenmiş Bronz Esaslı Kaymalı Yataklarda Polimer Kullanımının Tribolojik Özelliklere Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi (Basılmış), 2016.
- Hanchi J., Eiss Jr. N. S., Dry sliding friction and wear of short carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone (PEEK) at elevated temperatures, Wear 203-204, 380-386, 1997.
- Harris T., Kotzalas M., Advanced Concepts of Bearing Technology, Fifth Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2007.

- Hearle J.W.S., High-performance Fibres, CRC Press, Cambridge, England, 2001.
- Hou X., Hu Y., Hu X., Jiang D., Poly (ether ether ketone) composites reinforced by graphene oxide and silicon dioxide nanoparticles: Mechanical properties and sliding wear behavior. *High Performance Polymers* 30(4), 406-417, 2018.
- Hu J., 3-D Fibrous Assemblies: Properties, Applications and Modelling of Three-Dimensional Textile Structures, Elsevier, Woodhead Publishing, 2008.
- Zhu J., Ma L., Dwyer-Joyce R., Friction and wear behaviours of self-lubricating peek composites for articulating pin joints. *Tribology International* 149, 105741, 2020.
- Kalaycı E., Avinç O., Yavaş A., Polieter Eter Keton (Peek) Lifleri. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi* 38(2), 168-186, 2017.
- Karaçam Dinç S., Yağlayıcıların polimer rulmanlı yatak gürültü karakteristiğine etkisinin deneysel analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi (Basılmış), 2012.
- Koç E., Makina Elemanları, Cilt-II, Nobel Yayınları, Adana, 2006.
- Koç V., Demirel M., Epoksi Reçine-MgO Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Pin On Disk Abrasiv Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 31(1), 1-10, 2019.
- Kumar D., Rajmohan T., Experimental investigation of wear of multiwalled carbon nanotube particles-filled poly-ether-ether-ketone matrix composites under dry sliding. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 32(4), 521-543, 2019.
- May R., Polyetheretherketones, in: Mark H. F., Bikales N. M., Overberger C. G., Menges G., Kroschwitz J.I., (Eds.), *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, John Wiley and Sons, New York, pp. 313-320, 1988.
- Mazumdar S. K., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press, pp. 20-73, 2002.
- Samyn P., Baets P. D., Schoukens G., Driessche I. V., Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales. *Wear* 262(11-12), 1433-1449, 2007.
- Schmidlin P. R., Stawarczyk B., Wieland M., Attin T., Hämmerle C. H. F., Fischer J., (2010). Effect of different surface pre-treatments and luting materials on shear bond strength to PEEK. *Dental Materials* 26(6), 553-559, 2010.
- Şafak D., Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Tasarım Bakımından İncelenmesi ve Uygulamalı Kalıp Örneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2001.
- Topcu İ., Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Matrisli AlMg/KNT Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 4(1), 99-109, 2018.
- Yan Y., Meng Z., Liu H., Wang J., Chen B., Yan F., Nano-MoS₂ modified PBO fiber hybrid for improving the tribological behavior and thermal stability of TPI/PEEK blends. *Tribology International* 144, 106117, 2020.
- Yang M., Zhang Z., Yuan J., Wu L., Zhao X., Guo F., Men X., Liu W., Fabrication of PTFE/Nomex fabric/phenolic composites using a layer-by-layer self-assembly method for tribology field application. *Friction* 8, 335-342, 2020.

- Yetgin S. H., Ünal H., Mimaroglu A., Fındık F., Influence of Process Parameters on the Mechanical and Foaming Properties of PP Polymer and PP/TALC/EPDM Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 52(5), 433-439, 2013.
- Yılmaz T., PEEK (polyetheretherketone) ve kompozitlerinde kısa fiber takviyesi ve mikro yapının tribolojik özelliklere etkisi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi (Basılmış), 2002.
- You Y., Liu C., Li D., Liu S., He G., Tribological and flame-retardant modification of polyamide-6 composite. *Journal of Central South University* 26, 88-97, 2019.
- Zhu J., Ma Le., Dwyer-Joyce R., Friction and wear behaviours of self-lubricating peek composites for articulating pin joints. *Tribology International* 149, 105741, 2020.