

**Atif İçin:** Maslavi A, Ünal H, Kaştan A, 2022. Saf ve Cam Elyaf Katkılı PEEK Polimerin Sürtünme ve Aşınma Performanslarına Yük ve Kayma Hızının Etkisi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(4): 2437 - 2449.

**To Cite:** Maslavi A, Ünal H, Kaştan A, 2022. The Effect of Load and Sliding Speed on Friction and Abrasion Performances of Pure and Glass Fiber Added PEEK Polymer. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(4): 2437 - 2449.

## **Saf ve Cam Elyaf Katkılı PEEK Polimerin Sürtünme ve Aşınma Performanslarına Yük ve Kayma Hızının Etkisi**

Ahmet MASLAVI<sup>1</sup>, Hüseyin ÜNAL<sup>2</sup>, Alim KAŞTAN<sup>3\*</sup>

**ÖZET:** Endüstrinin değişik sektörlerinde kullanılan makinaların bazı aksamalarında plastik esaslı burç ve yataklar kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık, korozyon, kimyasal direnç ve aşınma direnci istenen uygulamalarda doğru malzeme seçimi, makina elemanının çalışma ömrü açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, saf poli-eter-eter-eton (PEEK) polimeri ile ağırlık olarak %30 oranında cam elyaf (CE) takviyeli poli-eter-eter-eton (PEEK-30CE) kompozitin tribolojik performansları araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemeler, ekstrüzyon yöntemiyle endüstriyel amacıyla üretilmiş çubuk formunda malzemelerdir. Tribolojik deneyler disk üzerinde pim cihazı kullanılarak oda sıcaklığında 2000 m kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iki farklı yük (30 N ve 60 N) ve dört farklı hız (1, 2, 3 ve 4 m s<sup>-1</sup>) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda saf PEEK polimer ve %30 oranında cam elyaf takviyeli PEEK kompozitinin sürtünme katsayısı, pim sıcaklığı ve spesifik aşınma oranı belirlenmiştir. Deneyler sonucunda kayma hızının artması ile hem saf PEEK hem de cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin aşınma oranı artarken sürtünme katsayısı değerleri ise azalmıştır. Düşük yük (30 N) ve hızda (1 m s<sup>-1</sup>) PEEK kompoziti saf PEEK polimerine göre 2.46 kez daha aşınma dirençli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca optik mikroskop kullanılarak deney malzemelerinin aşınma yüzeyi mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Her iki deney malzemesi için düşük yük ve hızlarda adhezif aşınma, yüksek hız ve yüklerde ise abrazyif aşınma mekanizması gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** PEEK, cam elyaf, triboloji, aşınma oranı, sürtünme katsayısı, kompozit

### **The Effect of Load and Sliding Speed on Friction and Abrasion Performances of Pure and Glass Fiber Added PEEK Polymer**

**ABSTRACT:** Plastic-based bushings and bearings are used in some parts of the machines used in different sectors of the industry. In applications where high temperature, corrosion, chemical resistance and wear resistance are required, choosing a right material is very important for the service life of the machine element. In this study, the tribological performances of pure poly-ether-ether-ketone (PEEK) polymer and 30% by weight glass fiber (GF) reinforced poly-ether-ether-ketone (PEEK-30GF) composite were investigated. The materials used in the experiments are in the form of rods produced for industrial purposes by the extrusion method. Tribological experiments were carried out 2000 m under dry sliding conditions at room temperature using a pin-on-disc wear test device. Two different loads (30 N and 60 N) and four different speeds (1, 2, 3 and 4 m s<sup>-1</sup>) were used in the experiments. As a result of the experiments, the friction coefficient, pin temperature and specific wear rate of pure PEEK polymer and 30% glass fiber reinforced PEEK composite were determined. As a result of the experiments, with the increase of the sliding speed, the wear rate of both pure PEEK and glass fiber reinforced PEEK composite increased, while the friction coefficient values decreased. At low load (30 N) and speed (1 m s<sup>-1</sup>), PEEK composite was found to be 2.46 times more wear resistant than pure PEEK polymer. In addition, microstructure examinations of the wear surface of the test materials were carried out using an optical microscope. Adhesive wear at low loads and speeds and abrasive wear mechanisms at high speeds and loads were observed for both test materials.

**Keywords:** PEEK, glass fiber, tribology, wear rate, friction coefficient, composite

<sup>1</sup> Ahmet MASLAVI (Orcid ID: 0000-0002-9571-0640), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup> Hüseyin ÜNAL (Orcid ID: 0000-0003-0521-6647), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup> Alim KAŞTAN (Orcid ID: 0000-0002-6514-3796), Düden Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Kepez/Antalya, Türkiye  
**\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Alim KAŞTAN, e-mail: kastanalim@gmail.com

## GİRİŞ

Kompozitler, farklı kimyasal yapıda olan iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesi sonucunda oluşur. Kompozit malzemelerde bir veya daha fazla katkı maddesi matris içerisine eklenir. Süreksiz faz katkı olarak, sürekli faz ise matris olarak adlandırılır. Matris metalik, polimerik veya seramik malzeme olabilir. Takviye malzemesi ise elyaf veya parçacık formunda ilave edilir (Sharma ve Gupta, 2012; Pihli ve Tosun, 2002; Demir ve ark., 2019). Polimerler ve polimer bazlı kompozitler genellikle otomotiv, havacılık ve tıp sektörlerinde dişliler, yataklar, burçlar ve contalar gibi çeşitli tribolojik parçalarda kullanılmaktadır. Metallerle kıyasla daha hafif, daha az gürültülü, daha ucuz, kimyasallara karşı daha dayanıklı olmalarının yanında kendi kendini yağlama özelliklerine de sahiptir (Myshkin ve ark., 2015; Gandhi ve ark., 2018; Friedrich, 2018). PEEK termoplastik polimeri, yüksek performanslı polimerler arasında yer alan yarı kristal yapıya sahip bir polimerdir. Mükemmel termal özelliklere sahip olan PEEK -60 °C ile 260 °C sıcaklıkları arasında özelliklerini kaybetmeden kullanılabilir. 260 °C sıcaklıkta 5000 saat çalışma durumunda bile mekanik özelliklerini korur. Bu sebeple bu sıcaklıkta uzun süreli çalışabilen bir polimer çeşididir. Aynı zamanda 300 °C sıcaklıklarda bile kısa süreli çalışabilir. PEEK aynı zamanda rijit ve tok bir malzeme olmasının yanında aşınma dayanımı yüksek, sürtünme katsayısı ise düşüktür. PEEK polimeri çok çeşitli organik ve inorganik sıvılara dirençli olup tüm yaygın kullanılan kimyasallara karşı dirençlidir. Aynı zamanda buhar ve sıcak sudan etkilenmez. Bundan dolayı boyutsal stabilite sağlar. Sterilizasyona uygun olup ve radyasyona karşı oldukça dirençlidir (Şafak, 2001). Bu özellikleri ile havacılık, otomotiv sektörü, elektrik/elektronik, makine, medikal, tekstil ve kimyasal proses uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. PEEK uçak sanayinden elektrik endüstrisine, takım aletlerinden pompalara, ölçme pistonlarından, sürtünmeli yatak ve burçlara, yuvarlak valf contalarından, elektrik kablo yalıtımına kadar birçok zorlu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bunun yanında reçine olarak ta kullanılabilen PEEK rüzgâr türbin kanatlarında, batarya kılıflarında, tutuşması zor olan tekstil ürünlerinde, robotik ve otonom sistemlerde de kullanılmaktadır (Yılmaz, 2002). PEEK lif olarak monofilament, multifilament ya da stapel lifler olarak çeşitli formlarda ve yapılar da üretilip örme, dokuma, gibi temel tekstil formlarında, üç boyutlu kumaşlarda, kompozit ve membran yapılar da kullanım alanına sahiptir (Hu, 2008; Hanchi, 1997). PEEK lifleri saf bir yapıya sahip olduğundan üretimi sırasında stabilizasyon için ilave kimyasallar kullanılmamaktadır. Bundan dolayı European Economic Commission (EEC) ve Food and Drug Administration (FDA) tarafından medikal ve yiyecek sektöründe kullanılmasına onay vermiştir (Hearle, 2001; Kalaycı ve ark., 2017). On yıldan daha uzun süredir PEEK yapay kafa plakalarında, parmak ve diz eklemlerinin bileşenlerinde, omurga implantlarında, kemik vidalarında, kardiyak uygulamalarda ve nörolojik operasyonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Schmidlin ve ark., 201; May, 1998). Matris malzeme içine ilave edilen elyaflar kompozit yapının en önemli mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluk, yüksek elastik modülü ve sertliğe sahip olan elyafların kimyasal korozyon direnci de yüksektir. Üretimde yaygın kullanılan en eski elyaflar cam elyaflardır (Ashby ve Jones, 1998). Cam elyaf takviyesi plastikten imal edilen ürünlerin hemen hemen %90'ında yer alır. Bunun nedeni cam elyafların ucuz olması ve ağırlık/mukavemet oranının iyi olmasıdır. Cam elyaf, silika, kolemanit, kireç taşı, soda, kil, alüminyum oksit ve bazı metal oksitler belirli oranlarda karıştırılıp harmanlanarak yaklaşık 1600 °C civarında fırında ısıtılarak sıvı hale getirilir. Çok ince kovanlardan geçirilen sıvı camdan, 9 ile 25 mikron arasındaki çaplarda, cam elyaf iplikler üretilir (Greene, 1999). Cam elyafların çekme mukavemeti ve özgül mukavemetinin çeliğe göre oldukça yüksek olması, kimyasal malzemelere karşı dirençli olmaları, nem absorbe etmemeleri, elektriği iletmemeleri, yanmamaları gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda tercih edilmektedir (Özer, 2015).

Cam elyafların bu kadar geniş alanda tercih edilmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve PEEK polimerinin özelliklerinin geliştirilmesi alanında birçok araştırma yapılmıştır. Daha önce Davim & Cardoso, 2009; Doumeng ve ark., 2019; Hamilton ve Muñoz-Escalona, 2019; Hanchi ve Eiss, 1997; Harsha ve Wasche, 2018; Hausberger ve ark., 2021; Jacobs ve ark., 2005; Jin ve ark., 2022; Li ve ark., 2013; Padhan ve ark., 2020; Song ve ark., 2017; Sümer ve ark., 2008; Tatsumi ve ark., 2018; Teng ve ark., 2018; Ünal ve Ermiş, 2021; Xie ve ark., 2011; Yamamoto ve ark., 2004; Li ve ark., 2013; bu alanda çalışmalar yaparak test parametrelerinin ve katkı maddelerinin PEEK polimerinin aşınma ve sürtünme davranışları üzerine etkisini incelemişlerdir. Hafiflik, mukavemet, rijitlik, birçok yaygın kimyasala direnç, sertlik ve yüksek termal direnç gibi özellikleri bünyesinde barındıran PEEK polimeri aşınma ve sürtünmenin olduğu birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Ancak PEEK polimerinin hangi çeşidinin aşınmaya daha dirençli olduğu konusunda yeterli bir karşılaştırma çalışması bulunmadığından, bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Malzeme ve parça tasarımcıları ile makine parça seçimi yapan ve işleyen teknik elemanlara bu konuda ışık tutabilmek için %30 oranında cam elyaf takviyeli PEEK kompoziti ile saf PEEK polimerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı performansları araştırılmıştır. Rulmanlı yatak ve burç gibi parçaların üretimlerinde kullanılan PEEK esaslı malzemelerin (bakınız Şekil 1) tribolojik özelliklerine etki eden en önemli parametre olan kayma hızının etkisi incelenmiştir. Aşınma ve sürtünme deneyleri 30 N ve 60 N yüklerde ve 4 farklı hızda (1, 2, 3 ve 4 m s<sup>-1</sup>) kuru kayma şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



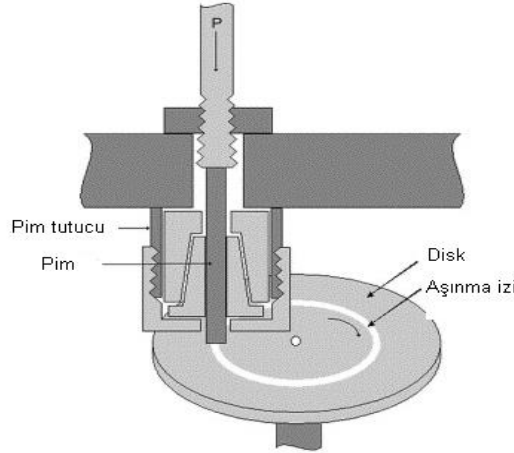
Şekil 1. PEEK malzemeden imal edilen rulmanlı yatak ve burç uygulamaları (<https://turkish.alibaba.com/product-detail/PEEK-plastic-shaft-sleeve-PEEK-CA30-556044962,html><https://tr.bestrubberplastic.com/cnc-machining-service/peek-machining-service/peekbushing.html>)

## MATERYAL ve METOT

%30 cam elyaf takviyeli PEEK kompoziti Ketron GF30 PEEK ticari adı ile saf PEEK polimeri ise Ketron1000 PEEK ticari adı ile çubuk formunda piyasaya sunulmuş olup Quadrant Plastics firmasından satın alınmıştır. Saf PEEK polimeri ile %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Saf PEEK polimeri ve PEEK+%30 CE polimer kompozitin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri

| Özellikler                     | Birimi               | Standart     | Saf PEEK | PEEK+%30CE |
|--------------------------------|----------------------|--------------|----------|------------|
| Yoğunluk                       | (g/cm <sup>3</sup> ) | ISO1183/-1   | 1.31     | 1.51       |
| Çekme mukavemeti               | (MPa)                | ISO527-1/-2  | 115      | 80         |
| Kopmadaki uzama                | %                    | ISO527-1/-2  | 17       | 4.5        |
| Elastiklik modülü              | (MPa)                | ISO527-1/-2  | 4300     | 7000       |
| Charpy çentik darbe mukavemeti | (kJ/m <sup>2</sup> ) | ISI179-1/1eA | 3.5      | 3          |
| Ergime sıcaklığı               | (°C)                 | ISO11357-1/3 | 340      | 340        |
| Isıl sapma sıcaklığı, 1.8MPa   | (°C)                 | ISO575-1/-2  | 160      | 230        |
| 24 saatte su emme (23 °C)      | (%)                  | ISO62        | 0.06     | 0.05       |
| Doymada su emme (23 °C)        | %                    | -            | 0,45     | 0,35       |
| Sertlik                        | HRM                  | ISO2039-2    | 105      | 100        |
| Sürekli çalışma sıcaklığı      | (°C)                 | -            | 250      | 250        |
| Minimum çalışma sıcaklığı      | (°C)                 | -            | -60      | -20        |



Şekil 2. Pim-disk aşınma test cihazı şematik gösterimi

Tribolojik deneyler disk üzerinde pim cihazı kullanılarak oda sıcaklığında 2000 m kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de tribolojik testlerin gerçekleştirildiği pim-disk aşınma cihazının şematik resmi verilmiştir. Deney sırasında aşınma cihazından alınan tüm veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Tablo 2’de aşınma deneyinin test şartları verilmiştir.

Tablo 2. Pim-disk aşınma testi için deney şartları

| Parametreler                    | Deney şartları |
|---------------------------------|----------------|
| Yük (N)                         | 30, 60         |
| Kayma hızı (m s <sup>-1</sup> ) | 1, 2, 3 ve 4   |
| Sıcaklık (°C)                   | 22±2           |
| Nem (%)                         | 55±2           |
| Kayma mesafesi (m)              | 2000           |
| Yüzey pürüzlülüğü (Ra, µm)      | 0.36-0.45      |

Sürtünme katsayısı yanal kuvvetin, normal uygulanan kuvvete oranıdır ve eşitlik 1’de ki formül ile hesaplanır. Bu eşitlikte,  $\mu$ : Sürtünme katsayısını,  $F_s$ : polimerin yanal sürtünme kuvvetini (N) ve  $F_N$  ise normal kuvveti (N) ifade etmektedir.

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

Her bir aşınma testinden önce ve sonra saf PEEK polimeri ile cam elyaf takviyeli PEEK kompozit pimlerin ağırlıkları ölçülmüş, aradaki fark hesaplanarak ağırlık kaybı ( $\Delta m$ ) bulunmuştur. Eşitlik 2’de ki formül ile de numunelerinin spesifik aşınma hızları ( $W$ ) hesaplanmıştır. Burada;  $\Delta m$ : ağırlık kaybını (g),  $L$ : kayma mesafesini (m),  $\rho$ : malzemenin yoğunluğunu (g/cm<sup>3</sup>) ve  $F$ : uygulanan yükü (N) ifade eder.

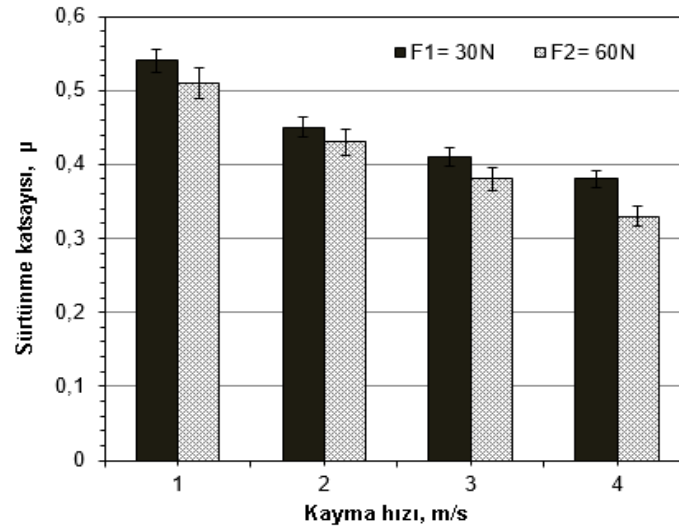
$$W = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (2)$$

Saf PEEK ve CE katkılı PEEK kompozitlerin aşınma yüzeylerinin ve çelik diskin kayma yüzeylerinin optik mikroskop resimleri çekilerek aşınma mekanizmaları gözlemlenmiştir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3’te saf PEEK polimerinin 30 N ve 60 N yükler altındaki sürtünme katsayısının kayma hızına göre değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kayma hızının artması ile saf PEEK polimerinin sürtünme katsayısında azalma tespit edilmiştir. Benzer şekilde uygulanan yükün artması ile de sürtünme katsayısında azalma gözlenmiştir. 30 N yük altında kayma hızının 1.0 m s<sup>-1</sup> den 2.0, 3.0 ve 4.0 m s<sup>-1</sup>’ye artırılmasıyla PEEK polimerinin sürtünme katsayısında sırasıyla %16.3, %24.5 ve

%30.2 oranında azalma tespit edilmiştir. Buna ilaveten 60 N yük altında sürtünme katsayısındaki azalma ise sırasıyla %15.4, %25.3 ve %34.3 oranında olmuştur. 30 N aşındırma yükü altında yapılan tüm deneylerin sürtünme katsayısı 60 N aşındırma yükü altında yapılan deneylerden daha yüksek çıkmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı  $1 \text{ m s}^{-1}$  kayma hızında ve 30 N yük altında 0.545 olarak tespit edilmiştir. 30 N yük altında kayma hızının dört kat artırılması ile sürtünme katsayısında yaklaşık %30.2 oranında azalma meydana gelmiştir. Kayma hızının  $1 \text{ m s}^{-1}$  ve uygulanan yükün 60 N olduğu deneyde ise PEEK polimerinin sürtünme katsayısı 0.512'dir. Uygulanan aşındırma yükü sabit tutularak hızın dört kat artırılması ile sürtünme katsayısında %34.3 oranında azalma olmuş ve 0.336 değerine düşmüştür. Genel olarak uygulanan yükün artırılmasıyla malzemelerin aşınma yüzeyleri arasındaki gerçek temas alanı artmaktadır. Fakat gerçek temas alanındaki artış miktarı, uygulanan yükteki artışa göre çok daha az olduğundan yükün artması ile sürtünme katsayısında azalma olur. Sümer ve ark., (2008) PEEK yüksek performans polimerine %30 oranında cam elyaf ilave ederek hazırlamış oldukları kompozitlerin sulu ve kuru ortam şartlarındaki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında azalma meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Artan kayma hızı ile birlikte çelik disk yüzeyinde ince film tabakası meydana gelmiş ve bu durum hızın artması ile daha hızlı oluşmuştur. Düşük kayma hızında, hem PEEK polimerinin hem de çelik muadili kayma yüzeylerinin pürüzlü olması nedeniyle yüksek sürtünme katsayısı ile sonuçlanan güçlü bir kilitleme meydana gelmektedir. Fakat kayma hızının artması ile bu mekanizmanın zayıflaması sonucunda sürtünme katsayısının azaldığı düşünülmektedir.

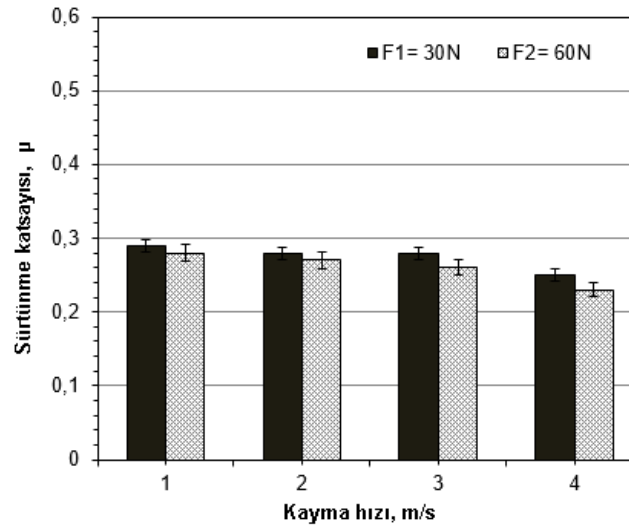


Şekil 3. Saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

Şekil 4'te %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin 30 N ve 60 N yükler altındaki sürtünme katsayısı kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Sürtünme katsayısında katkısız PEEK polimerinde de olduğu gibi kayma hızının artması ile azalma gözlemlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PEEK+%30 CE kompozitinin sürtünme katsayısı tüm deneylerde ve şartlarda katkısız PEEK polimerine göre daha düşüktür. Uygulanan yükün artması ile katkısız PEEK'e benzer şekilde sürtünme katsayısı değerleri azalmıştır. Katkısız PEEK polimeri ile PEEK+%30 CE kompozitin sürtünme katsayısı değerleri kıyaslandığında PEEK+%30 CE içeren kompozitlerin sürtünme katsayısında belirli oranlarda azalma olduğu tespit edilmiştir. %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin sürtünme katsayısı da kayma hızının artmasına bağlı olarak azalmıştır. Uygulanan hızın  $1 \text{ m s}^{-1}$ 'den sırasıyla 2, 3 ve  $4.0 \text{ m s}^{-1}$ 'ye artırılmasıyla sürtünme katsayısındaki azalma %1.7, %2.4 ve %11.5 oranında olmuştur. 60 N yük altındaki sürtünme katsayısındaki azalma oranı ise sırasıyla %2.1, %5.0 ve %15.2 olarak tespit edilmiştir. Katkısız PEEK'in sürtünme katsayısı  $1 \text{ m s}^{-1}$  kayma hızında ve 30 N aşındırma yükü altında



0.545 iken, PEEK+%30CE takviyeli kompozitin sürtünme katsayısında %48 azalma olmuş ve 0.285 olarak ölçülmüştür. Katkisız PEEK ile kıyaslandığında PEEK+%30CE'nin sürtünme katsayısında 30 N aşındırma yükünde  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızda %37,  $3 \text{ m s}^{-1}$  hızda %30 ve  $4 \text{ m s}^{-1}$  hızda ise %34 oranında azalma olmuştur. 60 N aşındırma yükünde ise  $1 \text{ m s}^{-1}$  hızda %47,  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızda %39,  $3 \text{ m s}^{-1}$  hızda %32 ve  $4 \text{ m s}^{-1}$  hızda ise %28 azalmıştır. Katkisız PEEK ve PEEK+%30CE'nin sürtünme katsayıları arasındaki fark kayma hızının artması ile azalmıştır. Song ve ark., (2017) yaptıkları çalışmada katkisız PEEK polimerinin sürtünme katsayısını 0.100, PEEK+%30CE kompozitin 0.070 ve PEEK+%30KE kompozitin ise 0.056 olarak tespit etmişlerdir. PEEK polimerine ilave edilen cam ve karbon elyafın aşınma deneyinde iz derinliğini azalttığı, bunun sonucunda sürtünme katsayısının da azaldığı yönünde bir sonuç elde ettiklerini belirtmişlerdir.

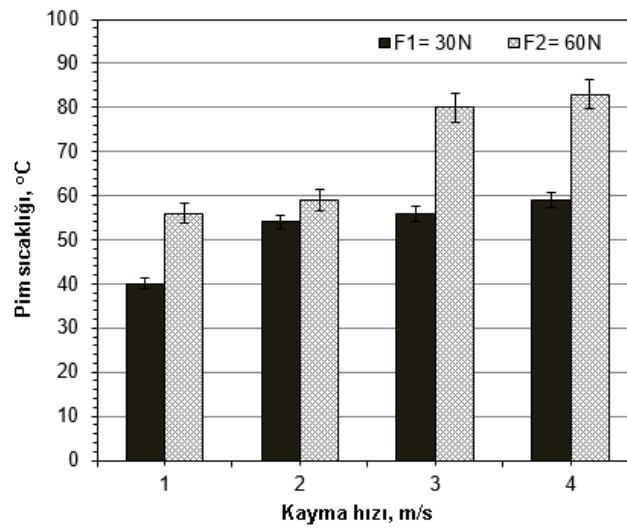


Şekil 4. %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimerkompozitinin 30N ve 60N yükler altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

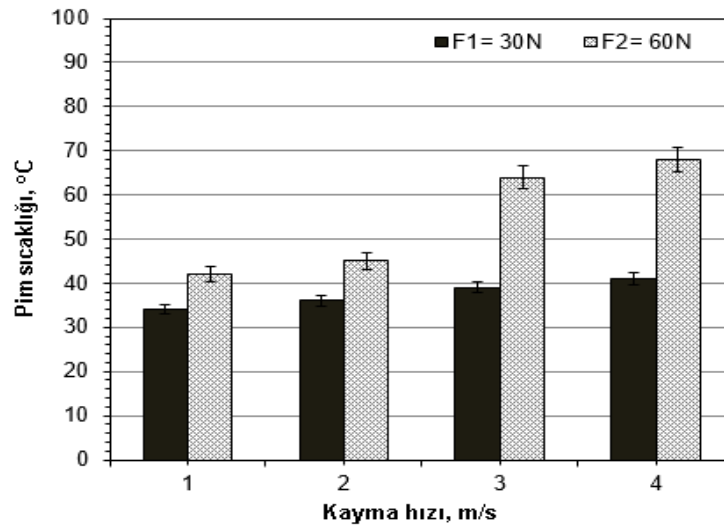
Şekil 5'te saf PEEK polimerinin farklı yükler ve hızlardaki kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi görülmektedir. Hem 30 N ve hem de 60 N aşındırma yükü altında yapılan deneylerde artan kayma hızına bağlı olarak pim sıcaklığı yükselmiştir. Yapılan deneylerde pim sıcaklığı  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $83 \text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında değişmiştir. En düşük pim sıcaklığı 30 N yük ve  $1 \text{ m s}^{-1}$  kayma hızında, en yüksek pim sıcaklığı ise 60 N yük ve  $4 \text{ m s}^{-1}$  kayma hızında yapılan deneyde ölçülmüştür. 30 N aşındırma yükü altında yapılan deneylerde pim sıcaklığı  $1 \text{ m s}^{-1}$  hızda  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızda  $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $3 \text{ m s}^{-1}$  hızda  $56 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $4 \text{ m s}^{-1}$  hızda  $59 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmiştir. 60 N aşındırma yükü altında yapılan deneylerde ise pim sıcaklığı  $1 \text{ m s}^{-1}$  hızda  $57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızda  $59 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $3 \text{ m s}^{-1}$  hızda  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $4 \text{ m s}^{-1}$  hızda ise  $83 \text{ }^{\circ}\text{C}$  olmuştur. Pim sıcaklığında hıza bağlı en az artış 30 N yükte kayma hızının  $2 \text{ m s}^{-1}$ 'den  $3 \text{ m s}^{-1}$  hıza çıkmasıyla, en fazla artış ise 60 N yükte kayma hızının  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızdan  $3 \text{ m s}^{-1}$  hıza çıktığı deneylerde tespit edilmiştir. Kayma hızının eşit olduğu yükün 30 N'dan 60 N'a çıkarıldığı deneylerde ise pim sıcaklığında en az artış  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızda yapılan deneyde, en fazla artış ise  $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $3 \text{ m s}^{-1}$  hızda yapılan deneyde görülmüştür. Davim ve Cardoso, (2009) katkisız PEEK polimeri kullanarak 2.68 MPa yük ve  $0.75 \text{ m s}^{-1}$  hızda aşınma deneyleri yapmışlardır. Deney başlangıcında  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  olan pim sıcaklığının ilk 4000 m kayma yolunda artarak  $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığını daha sonra 1600 m kayma yolunca neredeyse sabit kaldığını rapor etmişlerdir.

Şekil 6'da %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin farklı yükler altındaki kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi verilmiştir. Aşındırma yükünün artmasıyla pim sıcaklığı artmıştır. Benzer şekilde artan kayma hızıyla birlikte pim sıcaklığı artmıştır. Ancak katkisız PEEK ile kıyaslandığında tüm deneylerde PEEK+%30CE'nin pim sıcaklığının daha düşük olduğu söylenebilir. 30 N aşındırma

yükünde ve 1 m s-1 hızda katkısız PEEK'in pim sıcaklığı 40 °C iken PEEK+%30 CE'nin ise 34 °C'dir. Aynı hızda 60 N aşındırma yükünde katkısız PEEK'in pim sıcaklığı 57 °C iken PEEK+%30CE'nin 43 °C olarak ölçülmüştür. Katkısız PEEK ile yapılan deneylerde en düşük pim sıcaklığı 40 °C iken PEEK+%30CE'nin 6 °C azalarak 34 °C'ye gerilemiştir. Katkısız PEEK'in yüksek pim sıcaklığı 83 °C iken, PEEK+%30CE'nin ise 68 °C'dir. Benzer şartlarda yapılan deneylerde PEEK+%30 CE'nin pim sıcaklığı 15 °C daha düşüktür. Bu değer PEEK matris içerisindeki CE'nin sürtünme sırasında taşıyıcı rol oynaması ve artan yüke göre temas alanını azaltmasından kaynaklanmıştır. Davim ve Cardoso (2009) PEEK içerisine ilave ettikleri CE'nin katkısız PEEK'e göre pim sıcaklığının yaklaşık 12 °C daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Polimer esaslı malzemelerin servis sırasında yüzey sıcaklığının düşük olması avantaj sağlamaktadır. Zira artan yüzey sıcaklığı sonucunda visko-elastik sınırın aşılması yük taşıma kapasitesinin azalması, aşınma ve sürtünmenin artması olarak sonuçlanır. Bu durum malzemenin çalışma ömrünün kısalmasına neden olmaktadır.



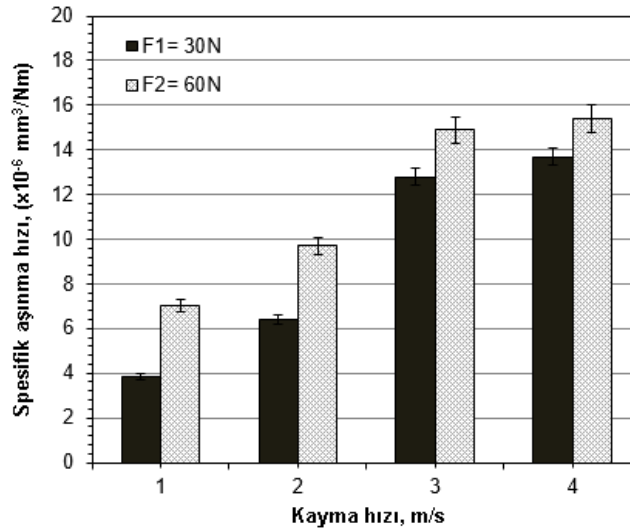
Şekil 5. Saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi



Şekil 6. %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin farklı yükler altındaki kayma hızı-pim sıcaklığı ilişkisi

Şekil 7'de saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Kayma hızının artması ile spesifik aşınma oranı artmıştır. 30 N yük ve 1 m s-1 kayma hızında spesifik aşınma oranı  $3.9 \times 10^{-6}$  iken 2 m s-1 hızda  $6.8 \times 10^{-6}$  yükselmiştir. Bu değer 3 m s-1 hızda  $12.9 \times 10^{-6}$  ve 4 m s-1 hızda ise  $13.8 \times 10^{-6}$  olarak hesaplanmıştır. 60 N yükte ise spesifik aşınma oranı 1 m s-1 hızda  $7.1 \times 10^{-6}$  ve 2 m s-1 hızda ise  $9.9 \times 10^{-6}$  değerine yükselmiştir. Hız 3 m s-1

olduğunda spesifik aşınma oranı  $15 \times 10^{-6}$  iken  $4 \text{ m s}^{-1}$  hızda ise  $15.6 \times 10^{-6}$  seviyesine çıkmıştır. Uygulanan aşındırma yükünün artması ile de spesifik aşınma oranı artmıştır.  $1 \text{ m s}^{-1}$  hızda ve  $30 \text{ N}$  aşındırma yükünün  $60 \text{ N}$ 'a çıkarılması ile spesifik aşınma oranı %82,  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızda %45,  $3 \text{ m s}^{-1}$  hızda %16 ve  $4 \text{ m s}^{-1}$  kayma hızında ise %13 oranında artış göstermiştir. Hamilton ve Muñoz-Escalona (2019) cam ve karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerle ilgili yaptıkları çalışmada genel olarak kayma hızının artması ile aşınma oranında artış olduğunu ifade etmişlerdir. Bu artışın sebebinin, artan kayma hızı ile polimerin yumuşama noktasına doğru sıcaklıkta bir artışa neden olduğunu ve bunun da daha yüksek yapışma seviyelerine yol açtığını, böylece spesifik aşınma oranını arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, takviye malzemesi türünün ve ağırlık yüzdesinin de aşınma oranı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu söylemişlerdir.



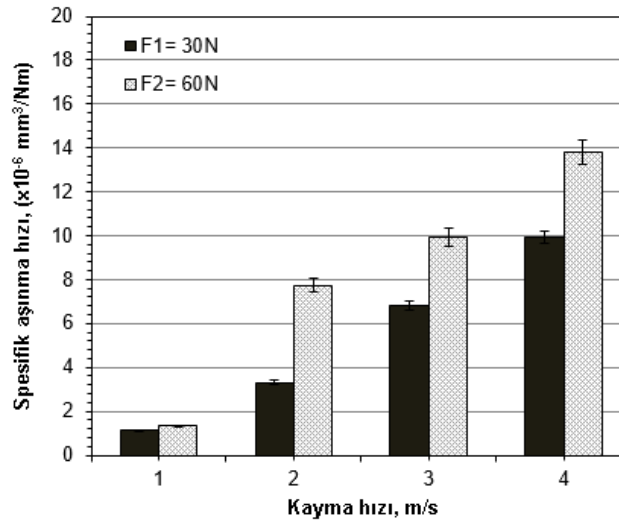
Şekil 7. Saf PEEK polimerinin farklı yükler altındaki aşınma oranı- kayma hızı ilişkisi

Şekil 8'de %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitin  $30 \text{ N}$  ve  $60 \text{ N}$  yükler altındaki kayma hızına bağlı olarak aşınma oranının değişimi verilmiştir. Kayma hızının artması ile birlikte hem  $30 \text{ N}$  aşındırma yükünde ve hem de  $60 \text{ N}$  aşındırma yükünde spesifik aşınma oranı artmıştır. Katkısız PEEK ile CE takviyeli PEEK'in spesifik aşınma oranının uygulanan yük ve hıza göre değişimi incelendiğinde benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Fakat aşınma oranı değerlerinde önemli farkların olduğu aşikârdır. Yapılan tüm deneylerde CE takviyeli PEEK polimer kompozitin aşınma oranı değerleri katkısız PEEK polimerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.  $30 \text{ N}$  aşındırma yükü altında yapılan deneylerde CE takviyeli PEEK kompozitin spesifik aşınma oranı  $1 \text{ m s}^{-1}$  hızda %67,  $2 \text{ m s}^{-1}$  hızda %53,  $3 \text{ m s}^{-1}$  hızda %47 ve  $4 \text{ m s}^{-1}$  hızda ise %18 oranında azalma olmuştur. Hamilton ve Muñoz-Escalona (2019) PEEK polimer matrisine ilave ettikleri %30 oranındaki cam elyafın kompozitin spesifik aşınma oranını %26 oranında azalttığını belirtmişlerdir. Katkısız PEEK'in sertliğinin  $211 \text{ HV}$  iken PEEK+%30CE'nin ise  $630 \text{ HV}$  değerine yükseldiğini rapor etmişlerdir. Araştırmacılar cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin aşınma oranındaki bu azalmayı Archard denkleminde göre açıklamışlardır. Bu denkleme göre aşınma oranının azalması, pimin sertliğinin artması sonucunda malzemenin temas alanının azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Cam elyaf, polimer ana matrisine göre daha sert ve aşınmaya karşı daha dirençli olduğu için, PEEK polimer ana matrisine ilave edilmesi sonucunda, kompozitlerin aşınma oranının azalmasına neden olmuştur. Aşınma oranındaki bu azalma kullanım sırasında malzemenin daha uzun, daha ekonomik, problemsiz ve/veya daha az problemliler olarak çalışmasına katkı sağlayacaktır.

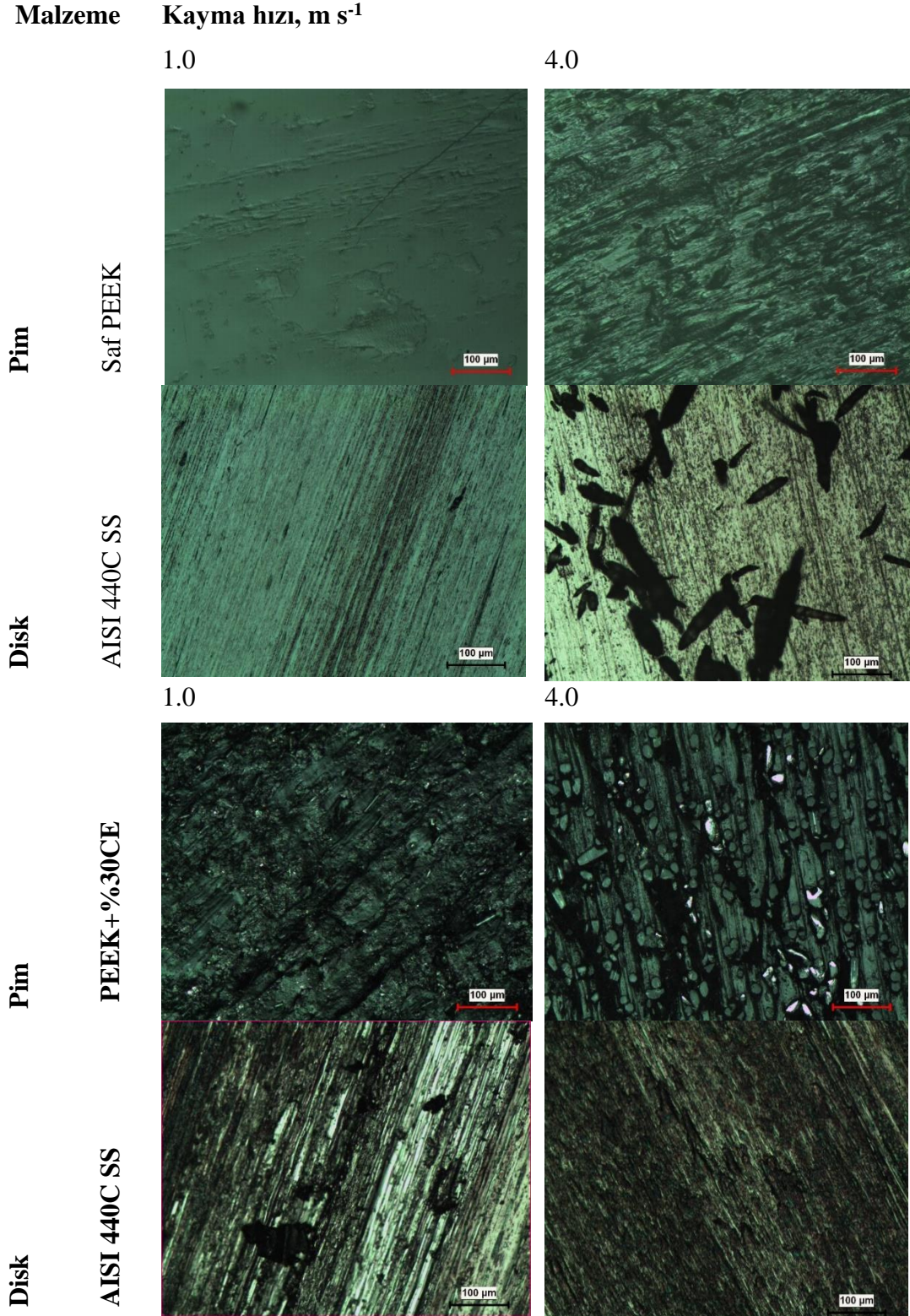
Şekil 9'da  $60 \text{ N}$  aşındırma yükü altında katkısız PEEK ve PEEK+%30CE kompozitlerin pim ve disk yüzeylerinin optik resimleri verilmiştir. Pimin yüzeyinde gözlenen aşınma izlerinin derinliğinin,



yaşanan aşınmanın şiddetine bağlı olduğu bilinmektedir. Saf PEEK'in 1 m s-1 hızdaki pim aşınma yüzeyindeki aşınma izlerinin derinliğinin 4 m s-1 hızda yapılan deneydeki izlere göre daha az olduğu söylenebilir. Yine aynı malzeme için disk yüzeyleri incelendiğinde hem 1 m s-1 hızda ve hem de 4 m s-1 hızda disk yüzeyinde koruyucu film tabakası oluşmuştur. Ancak 4 m s-1 hızda aşınmanın şiddetinin artması sonucunda disk yüzeyinde çok sayıda kopmuş polimer parçacıkları görülmektedir. PEEK+%30CE kompozitlerin pim aşınma yüzeyleri daha düzgün ve aşınma oyuk derinlikleri daha azdır. Özellikle 1 m s-1 hızda disk yüzeyinde bazı bölgelerde koruyucu film tabakasının oluşmadığı ve ince çiziklerin olduğu görülmektedir. Bu durum taşıyıcı omurga görevi üstlenen cam elyafın aşınmaya karşı daha fazla direnç göstermesi ve çelik disk yüzeyinde çizikler oluşturmasından kaynaklanmıştır. Ancak hızın artması ile birlikte aşınma oranının da artması sonucunda bu durum ortadan kalkmıştır. Davim ve Cardoso (2009), Hamilton ve Muñoz-Escalona (2019), Li ve ark. (2013) aşınma sırasında pimlerin yüzeyinde aşınma izlerinin oluşumunun ilave edilen elyaflar tarafından önlenmeye çalışıldığını belirtmişlerdir. Bunun sonucunda elyaflara yakın yerlerde malzeme kaybının kesintiye uğrayarak etraflarında aşınma kalıntılarının biriktiğini ifade etmişlerdir. Song ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada katkısız PEEK'in aşınma iz derinliğinin 7.496  $\mu\text{m}$  iken PEEK+%30CE'nin ise 3.685  $\mu\text{m}$ 'ye gerilediğini bildirmişlerdir. Bu durum aşınma yüzeyinde koruyucu film tabakasının oluşumunu teşvik ederek aşınmanın azalmasını sağlamıştır.



Şekil 8. %30 cam elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin farklı yükler altındaki aşınma oranı-kayma hızı ilişkisi



Şekil 9. Saf PEEK polimer ve PEEK+%30CE kompozitin 1 m s<sup>-1</sup> ve 4 m s<sup>-1</sup> kayma hızlarındaki pim ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroyapı görüntüleri (yük: 60 N)

## SONUÇ

Bu çalışmada saf PEEK ve %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin düşük ve yüksek kayma hızlarında aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Saf PEEK polimerin sürtünme katsayısı kayma hızının artmasına bağlı olarak azalmıştır. 30 N yük altında hızın 1.0 m s<sup>-1</sup>'den 2.0, 3.0 ve 4.0 m s<sup>-1</sup>'ye artırılmasıyla sürtünme

katsayısında azalma oranı sırasıyla %16.3, %24.5 ve %30.2 olmuştur. Benzer şekilde 60 N yük altında sürtünme katsayısındaki azalma ise sırasıyla %15.4, %25.3 ve %34.3 oranında olmuştur.

2. %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin sürtünme katsayısı da kayma hızının artmasına bağlı olarak azalmıştır. Sürtünme katsayısındaki azalma hızın  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ 'den 2.0, 3.0 ve  $4.0 \text{ m s}^{-1}$ 'ye artırılmasıyla sırasıyla %1.7, %2.4 ve %11.5 oranında olmuştur. 60 N yük altındaki sürtünme katsayısındaki azalma oranı ise sırasıyla %2.1, %5.0 ve %15.2 olmuştur.

3. Deneyler esnasında sürtünmeden kaynaklı pim sıcaklıklarının artan hızla birlikte 60 N yükte daha fazla arttığı tespit edilmiştir. Saf PEEK polimeri için en düşük yüzey sıcaklığı  $56.4 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak gözlenirken en yüksek yüzey sıcaklığı ise  $83 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak tespit edilmiştir. %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompoziti için ise en düşük ve en yüksek yüzey sıcaklığı sırasıyla  $42 \text{ }^\circ\text{C}$  ve  $68 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmıştır. PEEK ve PEEK kompozitin yüzey sıcaklıklarının camsı geçiş sıcaklığı  $140\text{-}145 \text{ }^\circ\text{C}$  arasında olan PEEK polimerin camsı geçiş sıcaklığı altında olduğu tespit edilmiştir.

4. Saf PEEK yüksek performans polimerin aşınma oranı, kayma hızının artmasıyla artış göstermiştir. 30 N yük altında hızın  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  den 2.0, 3.0 ve  $4.0 \text{ m s}^{-1}$ 'ye artırılmasıyla aşınma oranındaki artış sırasıyla %66, %232 ve %258 oranında olmuştur. Yine 60 N yük altında aşınma oranındaki artış sırasıyla %34, %111 ve %118 oranında olmuştur.

5. Saf PEEK polimerine benzer şekilde %30 cam elyaf takviyeli PEEK kompozitin aşınma oranı da kayma hızının artmasına bağlı olarak artış göstermiştir. Aşınma oranındaki artış hızın  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ 'den 2.0, 3.0 ve  $4.0 \text{ m s}^{-1}$ 'ye çıkarılmasıyla sırasıyla %198, %516 ve %794 oranında elde edilmiştir. 60 N yük altında aşınma oranındaki artış sırasıyla %485, %652 ve %945 oranında olmuştur.

6. Saf PEEK ve cam elyaf takviyeli PEEK polimerlerinin aşınma hızları karşılaştırıldığında katkısız PEEK polimerinin daha fazla aşındığı tespit edilmiştir. Cam elyafı PEEK kompoziti düşük kayma hızı ve yüklerde çalışması önerilmektedir. 30 N yük ve  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  kayma hızında saf PEEK polimerine göre yaklaşık 2.46 kez daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Yüksek kayma hızında ( $4 \text{ m s}^{-1}$ ) ise yaklaşık %30 oranında daha dirençli olduğu belirlenmiştir.

7. PEEK içerisindeki %30 oranındaki cam elyaf yüksek hızlarda kırılarak kompozitin aşınma oranının artmasına sebep olmaktadır.

8. Endüstride yüksek sıcaklık, korozyon, kimyasal direnç ve aşınma direnci istenen uygulamalarda burç, yatak gibi makine elemanlarının seçiminde %30 cam elyafı PEEK kompoziti tercih edilebilir. Çünkü düşük yük (30N) ve hızlarda ( $1 \text{ m s}^{-1}$ ) katkısız PEEK polimerine göre en az 2.46 kez daha fazla aşınma dirençli olduğu belirlenmiştir.

## TEŞEKKÜR

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

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Ashby MF, Jones DRH, 1998. Engineering materials 2, Butterworth Heinemann, Oxford.
- Davim PJ, Cardoso R, 2009. Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction, and wear behaviour of the PEEK against steel surface at long dry sliding. Wear, 266, 795–799.



- Demir ME, Çelik YH, Kılıçkap E, 2019. Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrazyon aşınmaya etkisi. *Politeknik Dergisi*, 22(4): 811-817.
- Doumeng M, Ferry F, Delbé K, Mérian, T, Chabert, F, Berthet F, Marsan, O, Nassiet V, Denape J, 2019. Evolution of crystallinity of PEEK and glass-fibre reinforced PEEK under tribological conditions using Raman spectroscopy. *Wear*, 426–427:1040–1046.
- Friedrich K, 2018. Polymer composites for tribological applications, advanced industrial and engineering. *Polymer Research*. 1, 3-39.
- Gandhi R, Jayawant A, Bhalerao A, Dandagwhal R, 2018. Applicability of composite polymer gear in low RPM applications – a review. *Int. J. Eng Sci Invent*,7:36–41.
- Greene E, 1999. *Marine Composites Second edition*, Annapolis, ISBN 0-9673692-0-7 ABD.  
<https://turkish.alibaba.com/product-detail/PEEK-plastic-shaft-sleeve-PEEK-CA30-556044962.html>  
<https://tr.bestrubberplastic.com/cnc-machining-service/peek-machining-service/peekbushing.html>.
- Hamilton S, Muñoz-Escalona P, 2019. Enhancement of wear properties of a polyetheretherketone polymer by incorporation of carbon and glass fibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 47587 1-11.
- Hanchi J, Eiss NS, 1997. Dry sliding friction and wear of shortcarbon-fiber-reinforced polyetheretherketone (PEEK) at elevated temperatures. *Wear*, 203-204 380-386.
- Harsha A.P, Wasche R, 2018. Influence of temperature on friction and wear characteristics of polyetherketones and their composites under reciprocating sliding condition. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(10) 5438.
- Hausberger A, Stiller T, Kappl C, Hensgen, L, Grün F, 2021. Improving the tribological properties of technical polymers with metal sulphide compounds. *Lubricants*, 9, 91.
- Hearle J.W, 2001, *High-performance fibres*, CRC Press, Cambridge.
- Hu J, 2008. *3-d fibrous assemblies: Properties, applications and modelling of three-dimensional textile structures*. Woodhead Publishing Limited.
- Jacobs O, Jaskulka R, Yan C, Wu, W. 2005. On the effect of counter-face material and aqueous environment on the sliding wear of various PEEK compounds. *Tribology Letters*, 18, 3.
- Jin Z, Yao Zhenqiang, Sun Y, Shen H, 2022. Loading capacity of PEEK blends in terms of wear rate and temperature. *Wear*, 496-497 204306.
- Kalaycı E, Avinç O, Yavaş A, 2017. Poli-eter-eter-eton (Peek) Lifleri, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fen Bilimleri Dergisi. Cilt 38, No. 2 ISSN: 1300-1949.
- Li E.Z, Xu BS, Wang HD, Guo WL, 2013. The tribological behavior of glass fiber-reinforced polyetheretherketone composite under dry sliding and water lubrication. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 32(5) 318–329.
- Li EZ, Guo WL, Wang HD, Xu BS, Liu XT, 2013. Research on Tribological Behavior of PEEK and glass fiber reinforced PEEK composite. *Physics Procedia*, 50 453–460.
- May R, 1988. Poly-ether-ether-ketones, in: HF. Mark NM, Bikales CG, Overberger G, Menges JI, Kroschwitz (Eds.). *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, John Wiley and Sons, New York, pp.313-320.
- Myshkin NK, Pesetskii SS, Grigoriev AY, 2015. *Polymer Tribology: Current State and Applications*. *Tribology in Industry*, 37(3) 284-290.
- Özer H. 2015. Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Padhan M, Marathe U, Bijwe J, 2020. Tribology of Poly(etherketone) composites based on nanoparticles of solid lubricants. *Composites Part B*, 201 108323.

- Pihtili H, Tosun N, 2002. Effect of load and speed on the wear behavior of woven glass fabrics and aramid fibre reinforced composites. *Wear*, 252 11–12: 979–984.
- Şafak D, 2001. Plastik enjeksiyon kalıplarının tasarım bakımından incelenmesi ve uygulamalı tasarım örneği. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Schmidlin PR, Stawarczyk B, Wieland M, Attin T, Ha`mmerle CH, Fischer J, 2010. Effect of different surface pre-treatments and luting materials on shear bond strength to PEEK. *Dental Material*, 26(6):553-559.
- Sharma S, ve Gupta K, 2012. Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials. *Materials and Design*, 35, 467–479.
- Song J, Lioa Z, Shi H, Xiang D, Liu Y, Liu W, Peng Z, 2017. Fretting wear study of peek-based composites for bio-implant application. *Tribology Letters*, 65:150.
- Sümer M, Ünal H, Mimaroglu A, 2008. Evaluation of tribological behavior of PEEK and glass fibre reinforced PEEK composite under dry sliding and water lubricated conditions. *Wear*, 265 1061–1065.
- Tatsumi G, Ratoi M, Shitara Y, Hasegawa S, Sakamoto K, Mellor B.G, 2021. Mechanism of oil-lubrication of PEEK and its composites with steel counterparts. *Wear*, 486-487 204085.
- Teng X, Wen L, Lv Y, Tang W, Zhao X, Chen C, 2018. Effects of potassium titanate whisker and glass fiber on tribological and mechanical properties of PTFE/PEEK blend. *High Performance Polymers*, 30(6) 752–764.
- Ünal H, Ermiş K, 2021. Polietereterketon ve kompozitlerinin polyester matrisli termoset kompozit malzemesine karşı aşınma ve sürtünme performanslarının incelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1): 450-463.
- Xie G.Y, Sui G.X, Yang R, 2011. Effects of potassium titanate whiskers and carbon fibers on the wear behavior of polyetheretherketone composite under water lubricated condition. *Composites Science and Technology*, 71 828–835.
- Yamamoto Y, Hashimoto M, 2004. Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts Part 2. composites with carbon or glass fibre. *Wear*, 257 181–189.
- Yılmaz T, 2002. PEEK (polietereterketon) ve kompozitlerinde kısa fiber takviyesi ve mikroyapının tribolojik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.