



## YÜKSEK HIZ VE BASINÇ ŞARTLARINDA ÇALIŞAN YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETERETERKETON TERMOPLASTİK POLİMERİNİN AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Hüseyin ÜNAL<sup>1\*</sup>, Salih Hakan YETGİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Peek,  
Aşınma,  
Sürtünme,  
Basınç,  
Kayma Hızı.*

### Öz

Bu deneysel çalışmada, yüksek performanslı mühendislik plastikleri arasında yer alan poli-eter-eter-keton (PEEK) polimerinin AISI304 paslanmaz çelik diske karşı kuru kayma şartları altındaki tribolojik performansları incelenmiştir. Aşınma deneyleri, 1.77, 3.54, 5.30 ve 8.84MPa gibi yüksek basınçlarda, 0.5, 1.0, 2.0 ve 4.0m/s gibi yüksek kayma hızlarında pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma test sonuçlarına göre, artan kayma hızı ile birlikte sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri artmıştır. Düşük yük ve kayma hızlarında düşük P.V değerleri elde edilirken artan yük ve kayma hızı ile birlikte P.V faktörünün arttığı belirlenmiştir. Genel olarak deneylerde kullanılan basınç ve kayma hızı aralıklarında sürtünme katsayısının 0.17 ile 0.39 aralığında elde edilirken, aşınma oranının ise  $5.2 \times 10^{-15}$  ile  $21.4 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>/N arasında değiştiği tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan PEEK malzemenin yüksek P.V değerlerinde abrazyif aşınma mekanizması gözlenirken düşük P.V değerlerinde adhezif aşınma mekanizması gözlenmiştir.

## EVALUATION OF FRICTION AND WEAR BEHAVIORS OF HIGH PERFORMANCE POLYETHERETHERKETONE THERMOPLASTIC POLYMER UNDER HIGH PRESSURE AND SLIDING SPEED CONDITIONS

### Keywords

*Peek,  
Wear,  
Friction,  
Pressure,  
Sliding Speed.*

### Abstract

This experimental study examines the tribological performance of poly-ether-ether-ketone (PEEK) polymer, which is one of the high performance engineering plastics, against AISI 304 stainless steel disc under dry sliding conditions. Tribological tests were carried out on a pin-on-disc wear test machine under high applied pressures of 1.77, 3.54, 5.30 and 8.84MPa and at high sliding speeds of 0.5, 1.0, 2.0 and 4.0m/s. According to the wear test results, the friction coefficient and wear rate values increased with the increase in sliding speed values. While low P.V values were obtained at low load and sliding speeds, it was determined that the P.V factor increased with increasing load and sliding speed. In general, in the pressure and sliding speed ranges used in the experiments, the friction coefficient was obtained between 0.17 and 0.39, while the wear rate varied between  $5.2 \times 10^{-15}$  and  $21.4 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>/N. While abrasive wear mechanism observed in PEEK polymer at high P.V values, adhesive wear mechanism observed at low P.V values.

### Alıntı / Cite

Ünal, H., Yetgin, S. H., (2022). Yüksek Hız ve Basınç Şartlarında Çalışan Yüksek Performanslı Polietereterketon Termoplastik Polimerinin Aşınma ve Sürtünme Davranışlarının Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 392-401.

\* İlgili yazar / Corresponding author: unal@subu.edu.tr, +90-264-616-0282

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
H. Ünal, 0000-0003-0521-6647	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	13.12.2020
S. H. Yetgin, 0000-0002-6068-9204	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	29.09.2021
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	26.10.2021
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	30.06.2022

## 1. Giriş (Introduction)

Polimer malzemeler, metal, seramik, cam ve demir dışı malzemeler gibi geleneksel malzemelerle kıyaslandığında mikroyapıları ve performans/yoğunluk oranının yüksek olması sebebiyle özellikle havacılık, uzay, otomotiv, makine, gıda ve petrol endüstrisi gibi alanlarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Soncu ve Akkoyun, 2020; Kumar vd., 2018). Polietereeterketon (PEEK) polimeri, yüksek mekanik performans ve elastiklik modülü, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek tokluk, kimyasal direnç, aşınma direnci, yanmayı geciktiricilik, boyutsal kararlılık ve kolay işlenebilirlik gibi özellikleri ile yüksek performanslı yarı-kristal yapılu bir polimer çeşididir (Placette vd., 2020). Ayrıca, PEEK polimeri 220°C sıcaklığın üzerinde uzun süre çalışırken yüksek aşınma direnci özelliğini koruyabilmektedir. PEEK polimeri, hafiflik ve daha yüksek aşınma performansından dolayı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde metalik malzemelerin yerine tercih edilmektedir (Zalaznik vd., 2016).

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Polietereeterketon (PEEK) polimeri, tribolojik uygulamalar için oldukça fazla tercih edilen yüksek performanslı mühendislik polimerlerinden birisidir (Juanjuan vd., 2020a). Pahalı bir polimer türü olmasına rağmen zorlu çalışma koşullarında yüksek tokluk ve mukavemet özellikleri ile triboloji alanında kullanılan diğer polimerlere göre öne çıkmaktadır. Saf PEEK polimerinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için literatürde bazı çalışmalar yapılmıştır (Marcela vd., 2016; Zsidaı ve Kataı, 2016; Schroeder vd., 2013; Avanzini vd., 2013). Genel olarak literatürde yapılan çalışmalarda, tribolojik deneylerin farklı ortam şartlarında ve düşük yük ve kayma hızlarında gerçekleştirildiği gözlenmiştir (Laux ve Schwartz, 2013; Juanjuan vd., 2020a; Felipe vd., 2015; Schroeder vd., 2013). Marcela ve arkadaşları (2016) PEEK polimeri ile çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) polimerlerinin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada PEEK polimerinin sürtünme katsayısının ÇYMAPE polimerine göre 3 kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Felipe ve arkadaşları (2015) sıcaklık ve çalışma ortamının PEEK kompozitin tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, artan sıcaklığa bağlı olarak aşınma oranı değerlerinin artarken sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Geraldine ve Thomas (2016) PEEK esaslı polimer malzemelerin çelik diske karşı hava, vakum ve hidrojen ortamlarındaki aşınma performanslarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PEEK polimerinin tribolojik özelliklerinin ortam şartlarına bağlı olarak önemli oranda değiştiğini belirtmişlerdir. Vakum altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde gazın çalışma ortamına salınması ile polimerin zayıfladığı ve bunun sonucu olarak ise yüksek aşınma oranının elde edildiği raporlanmıştır. Geraldine ve Thomas (2021) yaptıkları başka bir çalışmada ise poliimit (PI), PEEK ve Politetrafloretillen (PTFE) polimerlerinin sertleştirilmiş 52100 martenzitik yatak çeliği ve 304 östenitik paslanmaz çelik disklerine karşı tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PI ve PEEK malzemelerinin sürtünme ve aşınma özelliklerinin karşı disk malzemesine bağlı olduğu belirtilmiştir. PI polimerinin hidrojen ortamında 52100 diske karşı en iyi tribolojik özellikleri gösterdiği, PEEK polimerinin ise özellikle yüksek hızlarda 304 östenitik paslanmaz çelik diske karşı aşınma özelliklerinin geliştiği belirtilmiştir. Rodriguez ve arkadaşları (2016a) katkısız PEEK ve katı yağlayıcı katkılı PEEK polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerine kayma hızı ve temas basıncının etkisini incelemişlerdir. Aşınma ve sürtünme deneylerini 20 ve 50mm/s kayma hızlarında ve 4, 8 ve 10MPa temas basınçları altında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada basınç ve hızın artması ile sürtünme ısısının arttığı ve bunun sonucu olarak polimer malzemelerin sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, PEEK polimerine ilave edilen %10 Politetrafloretillen (PTFE) ve %10 grafit katkılarının da aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı belirtilmiştir. Qiufeng ve arkadaşları (2018) nano ve mikro-boyutlu karbon fiber (KF) ve PTFE katkılı PEEK kompozitlerin özelliklerini inceledikleri çalışmada mikro-boyutlu karbon fiberin nano-boyutlu olandan daha iyi tribolojik özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Kabul edilebilir sürtünme katsayısı ve aşınma oranı için %4 nano-KF, %20mikro-KF, %2 nano-PTFE ve %10mikro-PTFE katkılı PEEK kompozitlerin uygun olduğu belirtilmiştir. Abrasif ve adhesif aşınmanın temas yüzeylerinde aşınma kalıntıları oluşturduğu ve transfer film tabakasının oluşumunda önemli rol oynadığı belirtilmiştir. Regis ve arkadaşları (2018) ise katkısız PEEK polimeri ile %30 karbon fiber katkılı PEEK kompozitlerinin kuru ve bovine serum şartları altında tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Sulu ortam şartları altında aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Juanjuan ve arkadaşları (2020a) katkısız PEEK polimeri ile %10 karbon fiber ve %10 grafit/%10 PTFE katkılı PEEK kompozitlerin kuru ortam şartlarındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyleri 50-200N yük aralığında ve 5-40mm/s kayma hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, artan kayma hızı ile PEEK polimerinin sürtünme katsayısı değerleri değişmezken uygulanan yük ile birlikte katkısız PEEK ve %10 karbon fiber katkılı PEEK kompozitin sürtünme katsayısı değerleri artmıştır. PEEK polimerine ilave edilen katı yağlayıcıların sürtünme katsayısı üzerine

etkisinin olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Tatsumi ve arkadaşları (2019) ise çelik diske karşı PEEK polimerinin hem kuru hem de poli- $\alpha$ -olefin (PAO) ortamındaki sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Çelik disk yüzeyinde oluşan PEEK transfer film tabakası kalınlığına bağlı olarak hem kuru hem de PAO ortamında tribolojik özelliklerin değiştiği belirtilmiştir. Kurdi ve arkadaşları (2018) sulu ortam şartları altında PEEK/çelik temasının sürtünmeyi azalttığı fakat kuru ortam şartlarına göre aşınmayı artırdığı belirtilmiştir. Sulu ortam şartları altında karşı disk üzerinde PEEK transfer film tabakasının oluşmadığı sulu ortamda kararlı transfer film tabakasının oluşumunun engellendiği belirtilmiştir. Laux ve arkadaşları (2016) ise PEEK polimerinin sürtünme katsayısının artan yük ile birlikte azaldığını, kayma hızının artması ile arttığını belirtmişlerdir. Literatürde PEEK polimeri üzerine yapılan triboloji çalışmalarında, yüksek basınç ve kayma hızlarında yapılan çalışmaya az rastlanmıştır. Bu sebeple, bu çalışma pahalı olmasına rağmen endüstriyel olarak yüksek performans istenen triboloji alanlarına (rulmanlı yataklar, burçlar vb. gibi) ışık tutması ve geleneksel polimer malzemeler olan poliamit, poliasetal, kestamit ve çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen gibi aşınma dirençli polimer malzemelere alternatif olması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, yüksek basınç ve yüksek kayma hızlarında PEEK polimerinin aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyleri pim-disk aşınma test sistemi kullanılarak kuru ortam şartları altında AISI 304 paslanmaz çelik diske karşı 0.5, 1.0, 2.0 ve 4.0m/s kayma hızları ile 1.77, 3.54, 5.30 ve 8.84MPa basınç altında yapılmıştır. Çalışmada uygulanan basıncın, kayma hızının ve her ikisinin (P.V faktör) aşınma oranı ve sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Buna ilaveten optik mikroskop kullanılarak aşınma mekanizması belirlenmiştir.

### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

#### 3.1. Malzemeler (Materials)

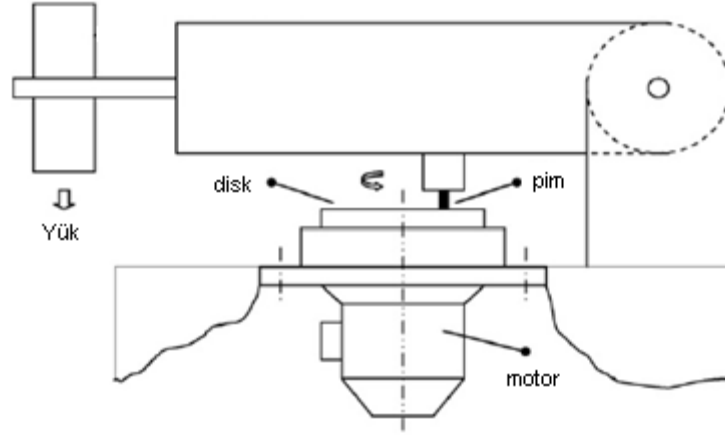
Aşınma deneylerinde kullanılan poli-eter-eter-keton polimeri, Ketron 1000 ticari koduyla ekstrüzyonla çubuk formunda üretilmiş olup 10mm çapında ve 1000mm uzunluğunda elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan PEEK polimerinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneyde kullanılan PEEK polimerinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri (Physical, mechanical and thermal properties of PEEK polymer used in the experiment)

Malzeme	Birim	ISO standartları	PEEK
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183-1	1.31
Su emme ( 23 °C)	%		0.20
Çekme mukavemeti	MPa	ISO 527	115
Çekmedeki elastiklik modülü	MPa	ISO 527	4300
Kopmadaki uzama	%	ISO 527	17
Sertlik	Rockwell M	ISO 2039-2	105
Ergime sıcaklığı	°C	ISO 11357-1/-3	340
Camsı geçiş sıcaklığı,	°C	ISO 11357-1/-2	150
Isıl sapma sıcaklığı (1.8MPa)	°C	ISO 75-1/-2	160
Maksimum çalışma sıcaklığı; - Kısa süreli, - Uzun süreli (Min. 20.000 saat)	°C		310 250
Üretici firma/Ürün ticari kodu	Quadrand Engineering Polymers/ Ketron 1000 PEEK		

#### 3.2. Aşınma Testleri (Wear tests)

Aşınma testleri, kuru ortam şartlarında, oda sıcaklığında ve Şekil 1'de şematik resmi verilen pim-disk aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 10x1000mm boyutlarında çubuk formunda temin edilen PEEK polimerini tribolojik deneylerde pim numunesi olarak kullanabilmek için revolver tornada 6mm çapında ve 50mm uzunluğunda olacak şekilde hassas olarak üretilmiştir. AISI 304 paslanmaz çelik disk malzeme ise 90mm çapında ve 5mm kalınlığında olacak şekilde geleneksel tornada tornalanmış sonrasında ise düzlem yüzey taşlama cihazında taşlanmıştır. Çelik diskin yüzey pürüzlülüğü ortalama 0.36-0.44 $\mu$ m aralığında ölçülmüştür. Her aşınma testi öncesi disk ve pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 1. Aşınma test cihazının şematik gösterimi (Schematic figure of the wear machine)

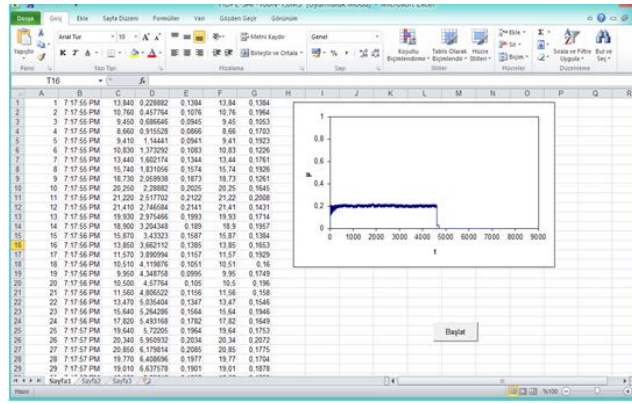
Tablo 2’de çalışmada kullanılan malzemeler için aşınma test parametreleri verilmiştir. Her aşınma testi öncesi numune pim ağırlığı ( $m_1$ ) ve aşınma testi sonrası pim ağırlığı ( $m_2$ ) ölçülmüş ve ağırlık kaybı  $\Delta m$  yani ( $m_1 - m_2$ ) tespit edilmiştir. Aşınma oranları ( $K_o$ ) ise Eşitlik (1)’de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde,  $L$ ; kayma mesafesi (m),  $\rho$ ; malzemenin yoğunluğu ( $g/cm^3$ ) ve  $F$ ; uygulanan yük (N)’ tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * F} \quad (1)$$

Tablo 2. Aşınma testi parametreleri (Wear test parameters)

Malzeme	Test Sıcaklığı (°C)	Kayma mesafesi (m)	Nem (%)	Uygulanan basınç (MPa)	Kayma hızı (m/)
PEEK	23±1	2000	55±3	1.77	0.5
				3.54	1.0
				5.30	2.0
				8.84	4.0

Deney numunelerinin sürtünme katsayısı ölçümleri disk üzerinde pim olacak şekilde dizayn edilmiş aşınma deney düzeneğinde ölçülmüştür. Cihazın ana gövdesi üzerine monte edilmiş elektrik motoru, bir yük kolu, bir elektronik yük hücresi ve verilerin gönderildiği bilgisayar kısımlardan meydana gelmiştir. Aşınma cihazının ana gövdesinde dönen bir disk vardır. Bu disk aşınma cihazına bağlı olan 2kW gücünde bir elektrik motoru sayesinde dönmektedir. Diskin üzerine deneyde kullanılan paslanmaz çelik disk malzeme bir vida yardımıyla bağlanır. Deneylerde kullanılacak PEEK pim numunesi 6mm çapında olup aşınma düzeneğinde olan kola bağlanır. Aşınma cihazı çalıştırıldıktan sonra kola bağlanan PEEK polimer pim numunesi diskin üzerine yavaşça bırakılır. Pim numunesinin hareket halindeki diske temas etmesi sonucu oluşan sürtünmeyle birlikte numune bağlı olan kol aparatı dönüş yönüne göre hareket eder. Bu harekete yanal kuvvet olarak adlandırılır. Bu yanal kuvvet aşınma cihazına bağlı olan bir yük hücresi ile ölçülüp bilgisayara aktarılarak excell programında kaydedilir. Aşınma cihazı, aşınma yapılacak olan deneyler için dakikada 1000 veri alınabilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresi boyunca yanal yükü ölçen yaklaşık 65.000 veri elde edilmiştir. Bu yanal yük verileri Excel programında bir sütuna kaydedilmiş sonrasında uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Excell programında sürtünme katsayısı-zaman ilişkisi grafikleri Şekil 2’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. Aşınma deneyinde excell formatında elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafiği (Friction coefficient-sliding time graph obtained in excell format in the wear test)

Deneylerde kullanılan PEEK polimer pim malzemesi ile paslanmaz çelik disk arasındaki sürtünme katsayısı ( $\mu$ ), yanal kuvvetin normal kuvvete oranıdır ve Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmaktadır. Formülde  $\mu$ : sürtünme katsayısını,  $F_s$ : sürtünme kuvvetini (N) ve  $F_n$  ise normal kuvveti (N) göstermektedir.

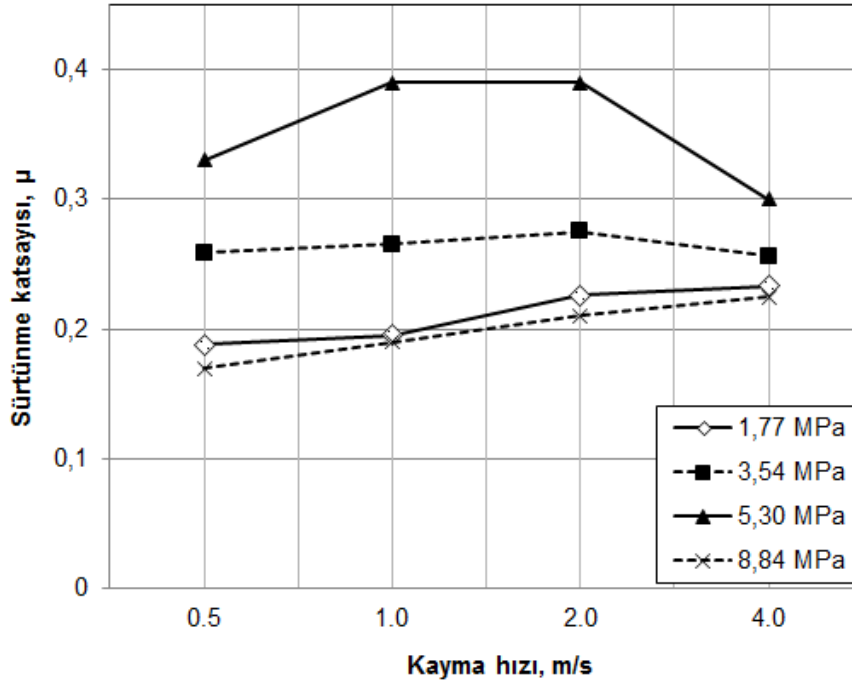
$$\mu: F_s / F_n \quad (2)$$

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Tablo 3'te PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Şekil 3'te ise PEEK polimerinin sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 2.0m/s kayma hızına kadar uygulanan basınç altında sürtünme katsayısı artarken 4.0m/s kayma hızında 3.54 ve 5.30MPa basınç altında sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir. 1.77MPa basınç altında elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin, 3.54MPa ve 8.84MPa basınç altında elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, PEEK polimeri ile çelik disk arasındaki temas sıcaklığının PEEK polimerinin camı geçiş sıcaklığından (143°C) düşük olması, PEEK polimerinin yumuşamayıp rijit kalması ve plastik deformasyonun oluşmaması ile açıklanabilir. Artan kayma hızı ve basınç ile birlikte PEEK polimeri ve çelik disk arasındaki temas sıcaklığının artması ile pim malzeme elastik hale gelmekte ve çelik disk üzerinde ince bir film tabakası oluşturarak sürtünme katsayısının azalmasına katkı sağlamaktadır. Zsidi ve arkadaşları (2016) yaptığı çalışmada da uygulanan yükün 11.5N'dan 23N'a artırılması ile sürtünme katsayısının azaldığını belirtmiştir. Laux ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada da uygulanan basıncın artması ile sürtünme katsayısının azaldığı fakat kayma hızının artması ile de sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Düşük kayma hızlarında, pim ile disk arasındaki sürtünme ısısının önemli olmadığı ancak artan kayma hızı ve yüzey pürüzlülüklerinin plastik deformasyonu oluşturduğu belirlenmiştir. Oluşan plastik deformasyon sonucu polimer ile disk arasındaki temas alanının değişerek kısmı temas yerine tam temasın meydana gelmesi neticesinde sürtünme katsayısının arttığı gözlenmiştir. Rodriguez ve arkadaşları (2016b) uygulanan basıncın 4MPa'dan 8MPa'a artırılması ile dinamik sürtünme katsayısının 0.44'den 0.49'a arttığını, ancak basıncın 10MPa'a artırılması ile de sürtünme katsayısının 0.43 değerine düştüğünü belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3. PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri. (Friction coefficient values of PEEK polymer depending on the applied pressure and sliding speed.)

Malzeme	Basınç, MPa	Kayma hızı, m/s			
		0.5	1.0	2.0	4.0
Sürtünme katsayısı, $\mu$					
PEEK	1.77	0.188	0.195	0.226	0.233
	3.54	0.259	0.265	0.275	0.256
	5.30	0.330	0.390	0.390	0.300
	8.84	0.170	0.190	0.210	0.225

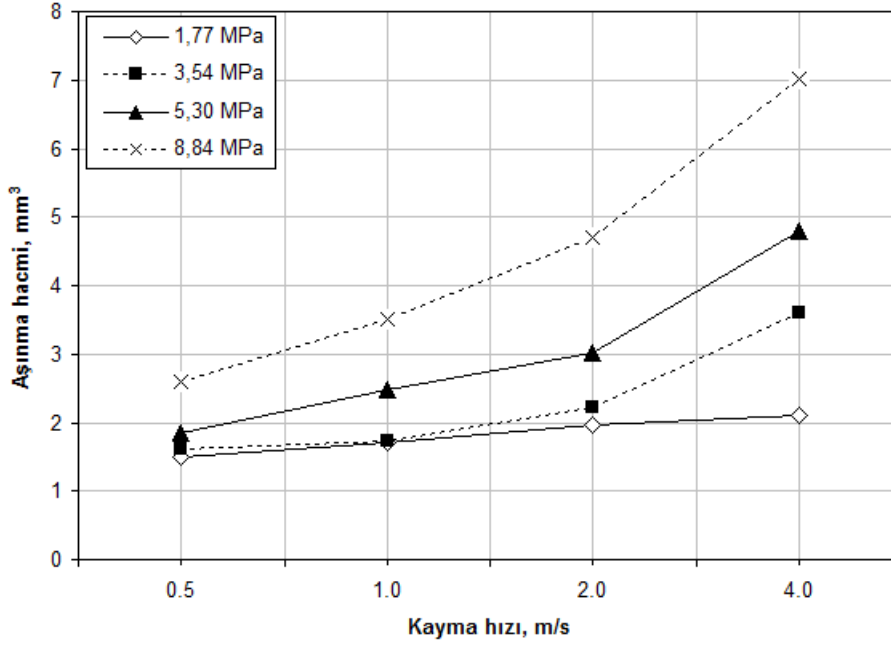


**Şekil 3.** Kuru kayma şartları altında PEEK polimerinin farklı hızlardaki sürtünme katsayısının değişimi (The variation of coefficient of friction values of the PEEK polymer at different sliding speeds and under dry sliding conditions)

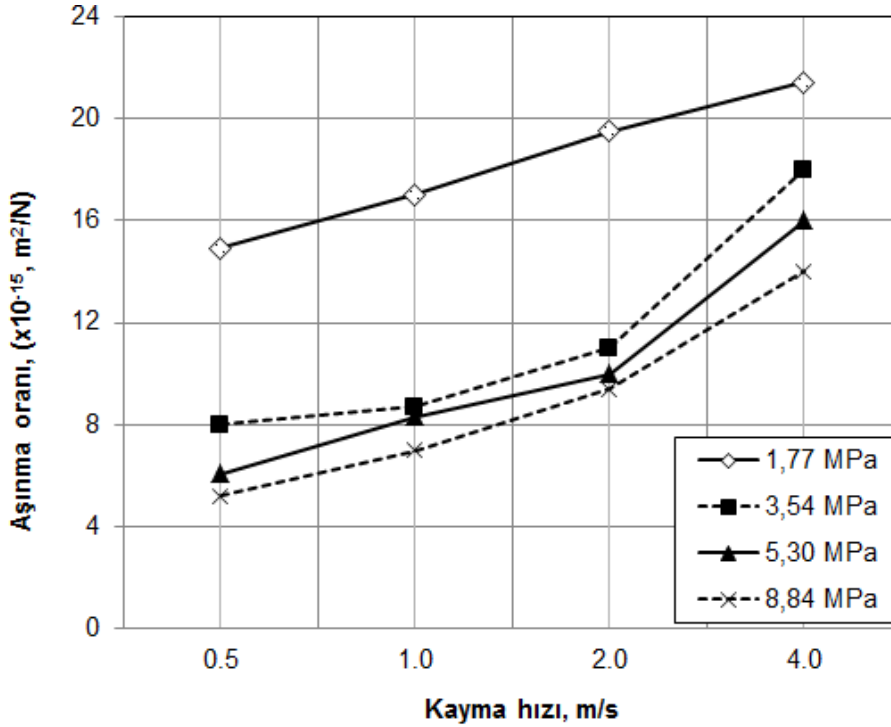
**Tablo 4.** PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak aşınma oranı değerleri. (Wear rate values of the PEEK polymer depending on the applied pressure and sliding speed.)

Malzeme	Basınç, MPa	Kayma hızı, m/s			
		0.5	1.0	2.0	4.0
		Aşınma oranı, ( $\times 10^{-15}$ , $m^2/N$ )			
PEEK	1.77	14.9	17	19.5	21.4
	3.54	8.0	8.7	11.0	18.0
	5.30	6.1	8.3	10.0	16.0
	8.84	5.2	7.0	9.4	14.0

Tablo 4'te PEEK polimerinin uygulanan basınç ve kayma hızına bağlı olarak aşınma oranı değerleri verilirken, Şekil 4'te ise farklı basınçlar altındaki PEEK polimerinin kayma hızına bağlı olarak aşınma hacmi grafiği verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, artan kayma hızı ve uygulanan basınca bağlı olarak aşınma hacminin arttığı belirlenmiştir. Zsidai ve arkadaşları (2016) da yaptıkları çalışmada artan basınç ile birlikte PEEK polimerinin yapışma aşınma mekanizmasının azalarak aşınmanın arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 4. Kuru kayma şartları altında PEEK polimerinin farklı hızlardaki aşınma hacmi ilişkisi (The relationship between wear volume and sliding speed of PEEK polymer under dry sliding conditions)



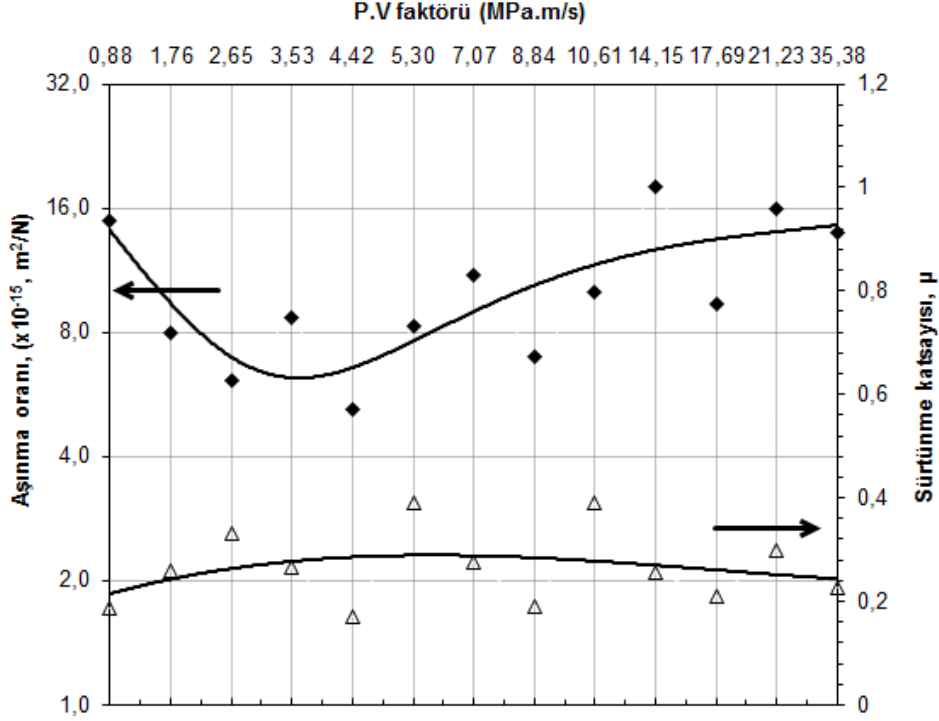
Şekil 5. Kuru kayma şartları altında PEEK polimerinin farklı hızlardaki aşınma oranı ilişkisi (The relationship between wear rate and sliding speed values of PEEK polymer under dry sliding conditions)

Şekil 5'te ise deneylerde kullanılan kayma hızları aralığında uygulanan basınca bağlı olarak aşınma oranı değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde, genel olarak kayma hızının 0.5m/s'den 4.0m/s'ye artırılması ile aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir. 1.77MPa basınç altında aşınma oranındaki artış %43.6 oranında elde edilmiştir. 3.54, 5.30 ve 8.84MPa basınç altında 2.0m/s kayma hızına kadar lineer bir artış gözlenirken 4.0m/s kayma hızında aşınma oranında belirgin bir artış tespit edilmiştir. Aşınma oranındaki ortalama artış 3.54, 5.30 ve 8.84MPa basınçlar için sırasıyla %125, %162 ve %169 olarak elde edilmiştir. Uygulanan basıncın etkisi incelendiğinde ise uygulanan basıncın artması ile aşınma oranı azalmıştır. 4.0m/s sabit kayma hızında, uygulanan basıncın etkisi incelendiğinde ise artan basınca bağlı olarak aşınma oranları yaklaşık olarak %18.8, %33.7 ve %52.8 oranlarında azalmıştır. Bu sonuç, uygulanan basıncın artması ile birlikte PEEK polimerinin aşınma oranı değerlerinin azaldığını göstermektedir. Juanjuan ve arkadaşları (2020b) yaptıkları çalışmada, düşük yükler altında düşük aşınma oranı, yüksek yüklerde ise yüksek aşınma oranı değerleri elde etmişlerdir. Çalışmalarında uygulanan kayma hızı ve

uygulanan basınç değerleri arasında aşınma oranını etkileyen en önemli parametrenin kayma hızı olduğunu belirtmişlerdir.

Şekil 6'da PEEK polimerinin uygulanan yük ve kayma hızının etkisini gösteren P.V faktörüne bağlı olarak aşınma oranı ve sürtünme katsayısının değişimi gösterilmiştir. P.V faktörü, Eşitlik (3)'te verilen formül ile hesaplanmaktadır.

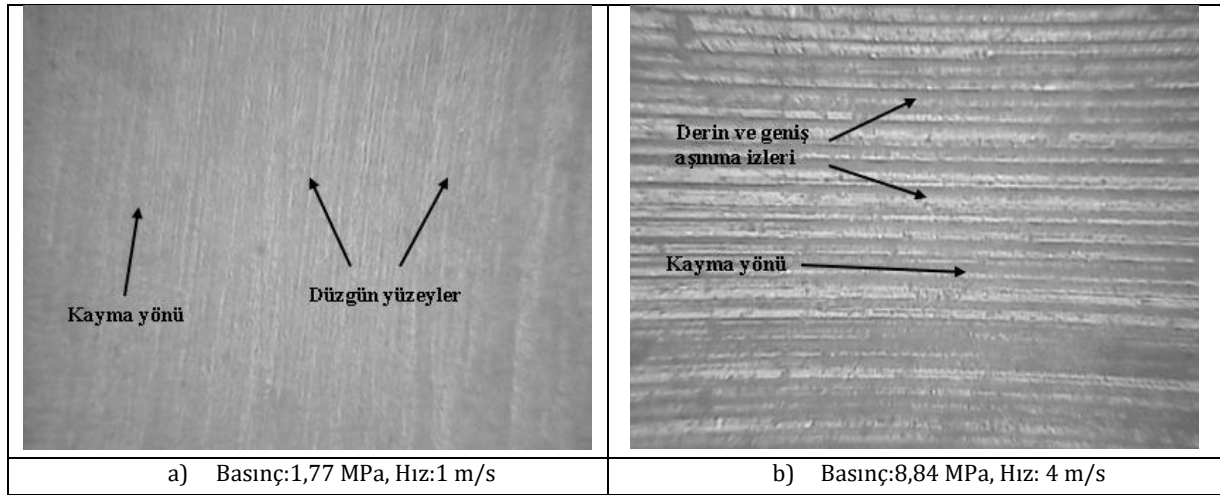
$$P.V \text{ faktörü} = \frac{\text{yük} * \text{kayma hızı}}{\text{pim alanı}} \quad (3)$$



Şekil 6. PEEK polimerinin P.V faktörüne bağlı olarak aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değişimi (Wear rate and friction coefficient variation depending on the P.V factor of the PEEK polymer)

Şekilde görüldüğü gibi sürtünme katsayısı uygulanan basınç ve kayma hızından fazla etkilenmezken aşınma oranında belirgin bir etkilenme gözlenmiştir. Düşük yüklerde ve kayma hızlarında düşük P.V değerleri elde edilirken artan yük ve kayma hızı değerlerinde ise P.V faktörünün arttığı belirlenmiştir. Genel olarak deneylerde kullanılan basınç ve kayma hızı aralıklarında sürtünme katsayısının 0.17 ile 0.39 arasında değiştiği, aşınma oranının ise  $5.2 \times 10^{-15}$  ve  $21.4 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>/N arasında değiştiği belirlenmiştir. Düşük basınç ve düşük kayma hızlarında yapışma aşınma mekanizması oluşurken artan basınç ve kayma hızlarında ise abrazif aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir. Bu durum Şekil 7'de PEEK polimerinin optik mikroskop aşınma yüzey görüntülerinde de görülmektedir. 1.0m/s kayma hızı ve 1.77MPa basınç altındaki pim yüzeyinin daha düzgün olduğu gözlenirken (bakınız Şekil 7a) 4.0m/s kayma hızı ve 8.84MPa basınç altında pim yüzeyinde pulluk sistemine benzer bir şekilde geniş ve derin oyukların oluştuğu (bakınız Şekil 7b) belirlenmiştir. Genel olarak kabul edilen sürtünme modellerine göre, polimer ile çelik disk arasındaki sürtünme kuvveti iki mekanizma ile açıklanabilir. Bunlardan ilki temas bölgesindeki yapışma, ikincisi ise polimerin deformasyonudur. Bu iki mekanizmanın oluşması tribolojik deneylerde uygulanan yük ve kayma hızının etkileri yanında polimerin kimyasal, mekanik ve geometrik etkilerine de bağlıdır (Zsidai vd., 2016). Bilindiği gibi, sürtünme süresince, aşınma sonucu polimer matristen kopan parçacıklar karşı disk yüzeyinde transfer film tabakasının oluşmasına sebep olmaktadır. Deney başlangıcında oluşacak ince bir transfer film tabakasının aşınma oranının azalmasına sebep olacağı belirtilirken artan transfer film tabakası ile oluşan kalın ve süreksiz transfer film tabakasının ise aşınma oranını artıracığı belirtilmiştir (Friedrich vd, 2005).





Şekil 7. PEEK polimerinin optik mikroskop görüntüleri (Optical microscope images of PEEK polymer)  
a) Basınç:1,77 MPa, Hız:1 m/s, b) Basınç:8,84 MPa, Hız: 4 m/s

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

PEEK polimerinin farklı kayma hızları ve basınçlar altında yapılan kuru kayma şartları yapılan aşınma deneyleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Deneylerdeki kayma hızının 0.5m/s den 4.0m/s'ye artırılması ile deneylerde kullanılan farklı basınçlar altında PEEK polimerinin sürtünme katsayısı 1.77MPa ve 8.84MPa basınçlar altında sürekli artış gösterirken 3.54 ve 5.3MPa basınçlarda 2m/s kayma hızına kadar artış göstermiş ancak bu hız değerinden sonra azalmıştır.
- Tribolojik deneyler sonucunda 0.5m/s den 4.0m/s kayma hızı ve 1.77MPa ve 8.84MPa basınç aralığında PEEK polimerinin sürtünme katsayısı 0.17 ile 0.39 aralığında elde edilmiştir.
- Tribolojik deneylerdeki kayma hızının 0.5m/s den 4.0m/s kayma hızına artırılması ile deneylerde kullanılan farklı basınçlar altında PEEK polimerinin aşınma oranı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artış, 1.77MPa basınç altında yaklaşık olarak % 43 oranında ilen 8.84MPa basınç altında %169 oranında olmuştur.
- Tribolojik deneyler sonucunda 0.5m/s den 4.0m/s kayma hızı ve 1.77MPa ve 8.84MPa basınç aralığında PEEK polimerinin aşınma oranı  $5.2 \times 10^{-15}$  ile  $21.4 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$  aralığında elde edilmiştir.
- P.V faktörde 4.42MPa.m/s değeri PEEK malzemenin aşınma oranı ve sürtünme katsayısında kritik önem oluşturmuştur. Aşınma oranı bu değere kadar azalma gösterirken bu değer üstünde ise artış göstermiştir. Ancak sürtünme katsayısı ise aşınma oranının tersine 4.42MPa.m/s değerine kadar artış göstermiş bu değerden sonra ise azalma göstermiştir.
- Yüksek basınç ve yüksek kayma hızı şartları altında PEEK polimeri abrazif aşınma mekanizması gösterirken, düşük kayma hızı ve düşük basınçlarda yapışma aşınma mekanizması gözlenmiştir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Avanzini, A., Donzellan, G., Mazzu, A., Petrogalli, C., 2013. Wear and Rolling contact fatigue of PEEK and PEEK composites. Tribology International, 57, 22–30.
- Felipe, D. R., Diego Vinicius Dalevedo, B., Renan Muller, S., Guilherme Mariz De Oliveira, B., Cristiano, B., Aloisio Nelmo, K., De Mello, J.D.B., 2015. Effect of temperature and atmosphere on the tribological behavior of a polyether ether ketone composite. Friction, 3(4), 259–265.
- Friedrich, K., Zhang, Z., Schlarb, A.K., 2005. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. Composites Science and Technology, 65, 2329–2343.
- Geraldine, T., Thomas, G., 2016. Environmental effects on the sliding behavior of PEEK composites. Wear. 368-369, 278-286.

- Juanjuan, Z., Fang, X., Dwyer-Joyce, R.S., 2020a. PEEK Composites as Self-Lubricating Bush Materials for Articulating Revolute Pin Joints. *Polymers*, 12(3), 665.
- Juanjuan, Z., Le, M., Dwyer-Joyce, R., 2020b. Friction and wear behaviors of self-lubricating peek composites for articulating pin joints. *Tribology International*, 149, 105741.
- Kumar, D., Rajmohan, T., Venkatachalapathi, S., 2018. Wear Behavior of PEEK Matrix Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5, 14583-14589.
- Kurdi, A., Wang, H., Chang, L., 2018. Effect of nano-sized TiO<sub>2</sub> addition on tribological behavior of Poly Ether Ether Ketone Composite. *Tribology International*, 117, 225-235.
- Laux, K.A., Schwartz, C.J., 2013. Influence of linear reciprocating and multi-directional sliding on PEEK wear performance and transfer film formation. *Wear*, 301, 727-734.
- Laux, K.A., Jean-Fulcrand, A., Sue, H.J., Bremner, T., Wong, J.S.S., 2016. The influence of surface properties on sliding contact temperature and friction for polyetheretherketone (PEEK). *Polymer*, 103, 397-404.
- Marcela, P., Bernadette, D., Thomas, K., Archodoulaki, V.M., 2016. Studies on Tribological Behavior of PEEK and PE-UHM. *AIP Conference Proceedings* 1779, 070001.
- Placette, M.D., Roy, S., White, D., Sundararajan, S., Schwartz, C.J., 2019. The effect of surface roughness orientation on PEEK (polyetheretherketone) transfer film volume in multi-directional and linear sliding. *Wear*, 426-427, 1345-1353.
- Regis, M. Alex, L., Pierangiola, B., Lorenzo, F., 2018. Wear behavior of medical grade PEEK and CFR PEEK under dry and bovine serum conditions. *Wear*, 408-409, 86-95.
- Rodriguez, V., Sukumaran, J., Schlarb, A. K., Baets, P. D., 2016 a. Influence of Solid Lubricants on Tribological Properties of Polyetheretherketone (PEEK). *Tribology International*, 103, 45-47.
- Rodriguez, V., Sukumaran, J., Schlarb, A.K., De Baets, P., 2016 b. Reciprocating sliding wear behavior of PEEK-based hybrid composites, *Wear*, 362-363, 161-169.
- Schroeder, R., Torres, F.W., Binder, C., A. N.Klein, deMello, J.D.B., 2013. Failure mode in sliding wear of PEEK based composites. *Wear*, 301, 717-726.
- Soncu, S., Akkoyun, M., 2020. Surface free energy and flexural properties of wollastonite filled Polypropylene composites. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 9(2), 389-395.
- Tatsumi, G., Monica, R., Yuji, S., Kiyomi, S., Brain, G.M., 2019. Effect of lubrication on friction and wear properties of PEEK with steel counterparts. *Tribology Online*, 14(5), 345-352.
- Wang, Q., Wang, Y., Wang, H., Na, F., Wang, M., Hao, L., Yan, F., 2018. Comparative study of the effects of nano-sized and micro-sized CF and PTFE on the thermal and tribological properties of PEEK composites. *Polymer Advanced Technologies*, 29, 896-905.
- Zalaznik, M., Kalin, M., Novak, S., 2016. Influence of the processing temperature on the tribological and mechanical properties of polyether-ether-ketone (PEEK) polymer. *Tribology International*, 94, 92-97.
- Zsidai, L., Katai, L., 2016. Abrasive wear and abrasion testing of PA 6 and PEEK composites in small-scale model system. *Acta Polytechnica Hungarica*, 1-20.