



**Makale / Research Paper**

**Grafit Katkılı Polipropilen Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi**

Salih Hakan YETGİN<sup>1\*</sup>, Murat ÇOLAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Kütahya/TÜRKİYE

<sup>2</sup>Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bayburt/TÜRKİYE

<sup>1</sup>shyetgin@gmail.com

Received/Geliş: 12.02.2020

Accepted/Kabul: 26.04.2020

**Öz:** Bu çalışmada, grafit katkılı Polipropilen (PP) kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, PP polimerine ağırlıkça %1, 3, 5 ve 10 oranlarında grafit ilave edilmiştir. PP/Grafite granülleri çift vidalı ekstruderde elde edildikten sonra çekme ve aşınma numuneleri enjeksiyon kalıplama tekniği ile elde edilmiştir. Farklı oranlarda grafit katkılı PP kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışları pim-disk sisteminde ve kuru ortam şartları altında 1.0m/s ve 1.5m/s kayma hızı ve 20N ve 40N yük altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, PP polimerine ilave edilen grafit minerali ile çekme dayanımı azalırken çekme modülü artmıştır. Grafit katkılı PP kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı uygulanan yük ve kayma hızından etkilenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Polipropilen, Grafit, Mekanik Özellikler, Aşınma, Sürtünme.

**Investigation of Mechanical and Tribological Properties of Graphite Filled Polypropylene Composites**

**Abstract:** In this study, mechanical and tribological properties of graphite filled polypropylene (PP) composites were investigated. For this purpose, 1, 3, 5 and 10% by weight graphite was added to the PP polymer. After PP/Graphite granules were obtained in twin screw extruder, tensile and wear samples were obtained by injection molding technique. The wear and friction behavior of graphite reinforced PP composites were performed in pin-on-disc system, under dry environment conditions at 1.0m/s and 1.5m/s sliding speed and 20N-40N load. As a result of the study mineral added to PP polymer decreased tensile strength and increased tensile modulus. Moreover, the friction coefficient and wear rate of the graphite filled PP composite were affected by the applied load and sliding speed.

**Keywords:** Polypropylene, Graphite, Mechanical properties, Wear, Friction.

**1. Giriş**

Polimerik malzemeler, yüksek dayanım, iyi termal kararlılık ve korozyon direnci gibi özellikleri nedenleriyle birçok endüstride geniş bir şekilde kullanılmaktadır [1, 2]. Özellikle polipropilen (PP) polimeri, fiziksel ve mekanik özelliklerinin çok iyi bir şekilde dengelenmesi, kolay üretilmesi ve diğer malzemelere göre oldukça düşük maliyetli olması nedeniyle en çok kullanılan polimer türlerinden birisidir. Ayrıca, PP polimerinin diğer mühendislik polimerlerine göre düşük yoğunluğa sahip olması ağırlık azalımının gerekli olduğu alanlarda da kullanımını ön plana çıkarmaktadır [3,4]. Ancak, PP polimeri, yüksek kalıpta çekme, düşük rijitlik, düşük darbe dayanımı ve kuru kayma şartları altında yüksek sürtünme katsayısı gibi dezavantajlara da sahiptir. PP polimerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmenin en basit yöntemi ise cam fiber, karbon fiber ve

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Yetgin, S. H., Çolak, M., "Grafit Katkılı Polipropilen Kompozitlerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (2); 649-658.

*How to cite this article*

Yetgin, S. H., Çolak, M., "Investigation of Mechanical and Tribological Properties of Graphite Filled Polypropylene Composites" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (2); 649-658.

aramit fiber gibi takviye elemanları ile farklı geometrilere sahip katkı elamanlarının kullanılmasıdır. Fiberlerin yük taşıma kapasiteleri nedeniyle mekanik özellikler gelişirken, fiberler kırılrsa dahi yük taşıma kapasitelerini koruyarak aşınma direncini artırabilirler [5-6].

Katı yağlayıcı olarak kullanılan politetrafloretillen (PTFE), grafit ve molibden disülfid ( $\text{MoS}_2$ ) ise sürtünme katsayısının azaltılması ve aşınma direncinin geliştirilmesi için en çok tercih edilen katkı ürünlerdir [8,9]. Karbonun üç formundan birisi olan grafit, her bir tabakasındaki hegzagonal birim hücrede düzenlenmiş atomların bulunduğu tabakalı bir yapıya sahiptir. Bu tabakalar, kayma şartları altında, kesme kuvveti uygulandığında kolaylıkla kırılabilen zayıf Van der Waals bağları ile bağlıdır [8, 10]. Kompozit malzemelerde takviye olarak kullanılan grafit, malzemelerin tribolojik, termal, elektriksel, kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir [11]. Grafit katkılı polimer malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Chang ve arkadaşları [12] kısa karbon fiber, grafit plakaları ile mikron-altı  $\text{TiO}_2$  ve çinko sülfür ( $\text{ZnS}$ ) katkılı polietereterketon (PEEK) ve polieterimit (PEI) polimerlerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda geleneksel katkıları olan karbon fiber ve grafit plakalarının hem aşınma direncini hem de polimerlerin yük taşıma kapasitelerini artırdıklarını belirtmişlerdir. Xintao ve arkadaşları [8] politetrafloretillen (PTFE) ve grafit katkılı poly(phthalazinone ether sulfone ketone) (PPESK) polimerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, PPESK polimerine ilave edilen katkıları ile sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. %20'nin üzerindeki katkı oranlarında düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı elde edildiği belirtilmiştir. Uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı azalırken aşınma oranı artmıştır. Ayrıca, %15 katkı oranında çekme ve darbe dayanımlarının azaldığı belirtilmiştir. Suresha ve arkadaşları [13] grafit katkılı cam elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda artan grafit miktarı ile çekme dayanımı ve ölçü kararlılığı artmıştır. %7.5 grafit katkılı cam elyaf/epoksi kompozitlerin en düşük sürtünme katsayısına sahip oldukları belirtilmiştir. Ayrıca, artan grafit miktarı ile ağırlık kaybının azaldığı belirtilmiştir. Guo-Hua ve arkadaşları [14] geliştirilmiş grafit katkılı polistren (PS) polimerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda artan grafit miktarına bağlı olarak çekme dayanımı ve çekme modülünün arttığı çentikli izod darbe dayanımının azaldığı belirtilmiştir. Difallah ve arkadaşları [15] grafit katkılı akrilo-nitril-bütadien-stren (ABS) polimerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda artan grafit miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin azaldığı belirtilmiştir. ABS polimerine grafit ilave edilmesi ile sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybının azaldığı belirtilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybı %7.5 grafit içeriğinde elde edilmiştir. Jia ve arkadaşları [16] geliştirilmiş nano-grafit katkılı poliimit (PI) polimerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, geliştirilmiş nano-grafit katkılı poliimit (PI) polimerinin sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranının azaldığı ve %15 grafit içeriğinde en iyi tribolojik özelliklerin elde edildiği belirtilmiştir. Golchin ve arkadaşları [17] karbon fiber, çok duvarlı karbon nanotüp ve grafit katkılı polifenilen sülfid (PPS) kompozitlerin sulu ortamda tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, karbon fiber katkılı kompozitlerin, aşınma oranını 3 kat, sürtünme katsayısını ise %60 oranında azalttığı belirlenmiştir. Çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) ve grafit katkıları benzer şekilde sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Katiyar ve arkadaşları [18] farklı oranlarda grafit ve talk katkılı epoksi bazlı polimerin (SU-8) mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, %15 grafit ve %15 talk katkılı SU-8 polimerinin sürtünme katsayısını 4 kat oranında azalttığı, elastiklik modülünü 3 kat ve sertliği ise 2 kat artırdığı belirtilmiştir. Goyal and Yadav [19] grafit katkılı PTFE kompozitin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, aşınma oranının %5 ve %10 grafit içeriğinde 22 ve 45 kez daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise PP polimerine ağırlıkça %1, 3, 5 ve 10 oranlarında ilave edilen grafit katkısının mekanik ve tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir. Literatürde farklı polimer türleri kullanılarak grafit katkılı polimer kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalar

mevcuttur. Aşınma testlerinde, genellikle ortam şartlarının (kuru, sulu) ve grafit miktarının etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ise grafit miktarının etkisinin yanında uygulanan kayma hızı ve yükün sürtünme katsayısı ve aşınma oranına etkisi de incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Farklı ağırlık oranlarında grafit katkılı polipropilen kompozitlerin üretiminde Lyondellbasell firmasından temin edilen  $0.9\text{g/cm}^3$  yoğunluğa ve  $1.2\text{g}/10\text{dak.}$  ergiyik akış indeksine (MFI) sahip Polipropilen (Hostalen PP H1850) polimeri ile Alfa Aesar firmasından temin edilen  $2\text{-}15\mu\text{m}$  partikül boyutuna sahip grafit partikülleri kullanılmıştır. Ağırlıkça %1, 3, 5 ve 10 oranlarında grafit katkılı PP kompozitleri  $4\text{mm}$  kalıp çapına sahip AYSA LAB30 çift vidalı ekstruder ile üretilmiştir. Besleme bölgesinden kalıba kadar olan sıcaklık dağılımı  $170\text{-}210^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Silindirik çubuk formunda ekstrude edilen karışımlar soğuk suda soğutulmuş, sonrasında tekrar granül haline getirilmiştir. Çekme ve tribolojik test numuneleri bir enjeksiyon kalıplama makinesi kullanılarak standartlara uygun olarak üretilmiştir. Enjeksiyon ile kalıplama işleminde besleme hunisi ve kalıp arasındaki sıcaklık dağılımı  $170\text{-}215^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Kalıp sıcaklığı  $30^\circ\text{C}$  olarak sabitlenmiştir. Çekme testleri ASTM D638 standardına uygun olarak Zwick Roell Z-100 makinesinde, oda sıcaklığında ve  $10\text{mm}/\text{dak.}$  çekme hızında yapılmıştır. Yoğunluk deneylerinde,  $0,1\text{ mg}$  hassasiyetli ve  $220\text{g}$  kapasiteli PRECISA XB 220A marka dijital bir teraziden yararlanılmıştır. Polipropilen polimerinin yoğunluğu, suyun yoğunluğundan düşük olduğu için ölçümler, %99.7 saflığa ve  $0.77\text{g/cm}^3$  yoğunluğa sahip isopropil alkol ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ ) kullanılarak Arşimet prensibine göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Pim-disk aşınma cihazı.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan malzemeler ve deney şartları.

| Malzemeler | Yoğunluk<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | Yük<br>(N) | Kayma<br>hızı<br>(m/s) | Sıcaklık<br>( $^\circ\text{C}$ ) | Nem<br>(%) |
|------------|---------------------------------|------------|------------------------|----------------------------------|------------|
| PP         | 0.90                            |            |                        |                                  |            |
| PP/1Gr     | 0.91                            | 20         | 1.0                    | $23\pm 2$                        | $40\pm 5$  |
| PP/3Gr     | 0.92                            | 40         | 1.5                    |                                  |            |
| PP/5Gr     | 0.94                            |            |                        |                                  |            |
| PP/10Gr    | 0.99                            |            |                        |                                  |            |

Sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının belirlenmesi için tribolojik testler, ASTM G99 standartlarına uygun olarak oda sıcaklığında, kuru ortam şartları altında,  $1.0$  ve  $1.5\text{m/s}$  kayma hızı ile  $20$  ve  $40\text{N}$  yük altında pim-disk sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.  $6\text{mm}$  çapa ve  $40\text{mm}$

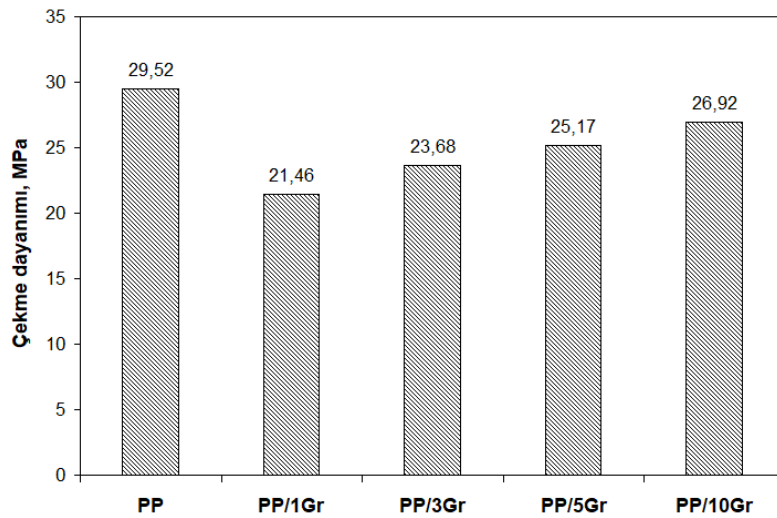
uzunluğa sahip silindirik pim numuneleri 1040 çeliğine karşı test edilmiştir. Deneylerde her bir malzeme kompozisyonu için en az 5 test yapılmış ve ortalama değerler verilmiştir. Şekil 1'de pim-disk aşınma cihazı resmi verilmiştir. Tablo 1'de ise çalışmada kullanılan malzemeler, yoğunluk değerleri ve deney şartları verilmiştir. Her bir test öncesi, pim ve disk yüzeyleri alkol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Pim numunelerin ağırlıkları deney öncesi ve sonrası ölçülerek ağırlık kaybı ( $\Delta m$ ) belirlenmiştir. Aşınma oranı ( $K_0$ ) ise Eşitlik 1'de verilen formül ile hesaplanmıştır.  $\Delta m$ : ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m),  $\rho$ : malzeme yoğunluğu ( $g/cm^3$ ), F: uygulanan yük (N).

$$K_0 = \frac{\Delta_m}{L * \rho * F} \quad (1)$$

### 3. Bulgular ve Tartışma

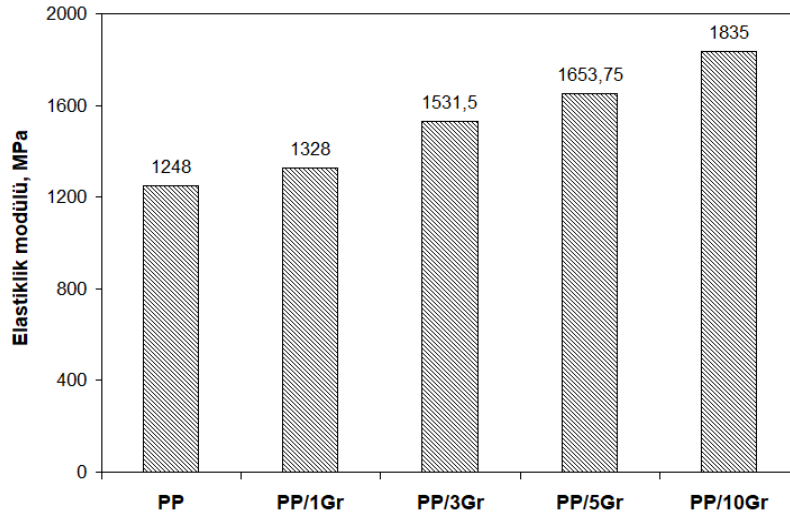
#### 3.1. Çekme Testi Sonuçları

Şekil 2'de farklı oranlarda grafit katkılı PP polimerinin çekme dayanımı sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PP polimerine ilave edilen grafit katkısı çekme dayanımını azaltmıştır. PP polimerinin 29.52MPa olan çekme dayanımı %1, 3, 5 ve 10 oranlarında grafit ilavesi ile azalarak 21.4, 23.6, 25.1 ve 26.9MPa olarak elde edilmiştir. Bu azalma grafit miktarına bağlı olarak %37, %24, %17 ve %9 oranlarında elde edilmiştir. Benzer bir sonuç Xintao ve arkadaşları [8] tarafından yapılan PTFE ve grafit katkılı PPESK polimerinde de elde edilmiştir. Bunun sebebi, katkı ile PPESK polimeri arasındaki zayıf ara yüzeye ve ayrıca PTFE ve grafit katkılarının %15'in üzerinde kolaylıkla topaklanmasına bağlanışlardır. Mekanik özelliklerdeki azalmanın, grafit kristallerinin zayıf mekanik dayanıma sahip olmasından da kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Katılara fonksiyonelleşme işlemi yapılmadığında, katkı ile polimer arasında zayıf bağlanmanın oluşacağı ve dolayısıyla mekanik özelliklerin azalacağı belirtilmiştir. Çatlakların, polimer matris ile hemen hemen hiç bağlanmayan bu alanlar içerisinde kolaylıkla başlayabileceği ve yayılabileceği, dolayısıyla dayanımın azalacağı belirtilmiştir [20]. PP polimerine ilave edilen grafit miktarının artması ise çekme dayanımını artırmıştır. %1 ile %10 grafit katkısı karşılaştırıldığında bu artış %25.4 oranında elde edilmiştir. Guo-Hua ve arkadaşları [14] geliştirilmiş grafit katkılı polistren (PS) polimerinin mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada artan grafit miktarı ile çekme dayanımının %22.5 oranında arttığını belirlemişlerdir. Bunun sebebinin ise rijit grafit tabakalarının çekme modülünü artırması ve grafit plakalarının aynı zamanda takviye elemanı gibi davranmasına bağlanışlardır. Elde edilen sonuçların yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

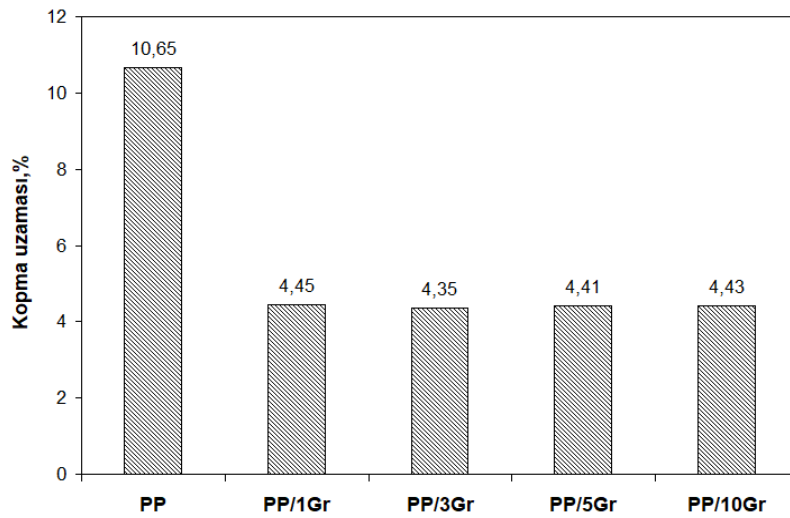


Şekil 2. Grafit miktarına bağlı olarak çekme dayanımı sonuçları.

Şekil 3'te ise grafit miktarına bağlı olarak elastiklik modülü sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PP polimerine ilave edilen grafit ile elastiklik modülü artmıştır. PP polimerinin 1248MPa olan elastiklik modülü %3 grafit miktarında 1531MPa, %10 grafit miktarında ise 1835MPa olarak elde edilmiştir. %10 oranında grafit ilavesi ile PP polimerinin elastiklik modülü %47 oranında artmıştır. PP polimerine ilave edilen rijit grafik katkısı elastiklik modülünü artırmıştır. Aynı zamanda PP polimerinin kristallenme davranışı elastiklik modülünü etkilemiş olabilir. İnorganik partiküller polimer malzemelere ilave edildiğinde, bu partiküller matriste iskelet görevi görecektir ve matris ile partikül arasında fiziksel çapraz bağlanma nedeniyle zincirlerin moleküler hareketi sınırlandırılarak kompozit sistemlerin rijitliği artacaktır. PP gibi kristal özelliğe sahip polimerler için inorganik partiküller, heterojen çekirdeklenmeye sebep olarak kristallenme derecesini veya kristal yapıyı değiştirerek kompozitlerin rijitliğinin artmasına katkı sağlayabilir [4].



Şekil 3. Grafit miktarına bağlı olarak elastiklik modülü sonuçları.



Şekil 4. Grafit miktarına bağlı olarak kopma uzaması sonuçları.

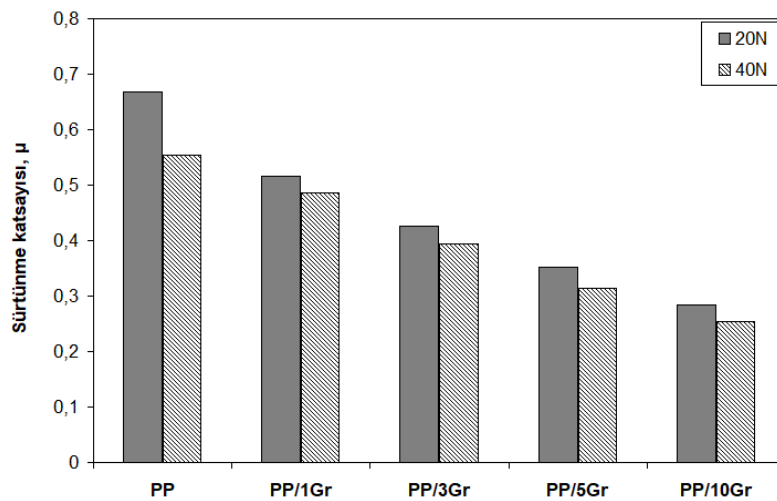
Şekil 4'te ise grafit miktarına bağlı olarak kopma uzaması sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sünek olan PP polimeri grafit eklenmesi ile gevrek davranış göstermiştir. PP polimerinin %10,65 kopma uzaması değeri farklı oranlarda grafit ilavesi ile ortalama %144 oranında azalarak yaklaşık %4,4 civarında elde edilmiştir. Genel olarak, katkı miktarına bağlı olarak kopma uzamasının azalması beklenen bir durumdur. Benzer sonuçlar Zheng [21] ve Krupa [22] tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Zheng ve arkadaşları [21] tarafından yapılan çalışmada kopma uzaması %3 grafit miktarında %150 oranında azalmıştır. Krupa ve arkadaşları da [22] grafit



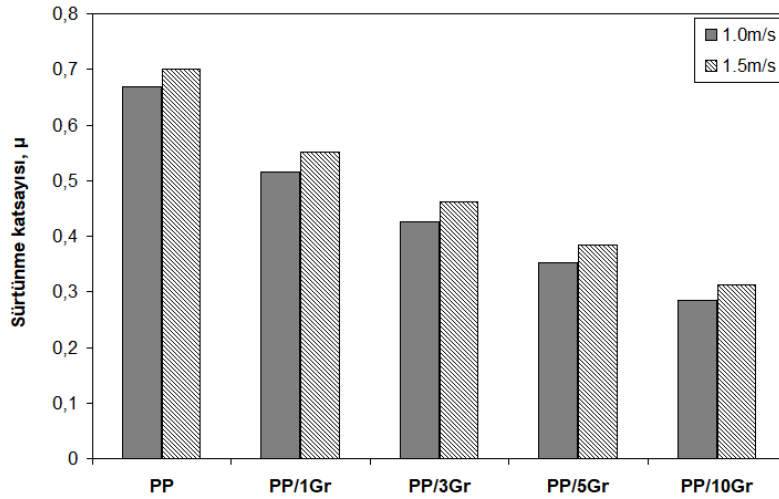
miktarına bağlı olarak %27 oranında elde edilen kopma uzamasındaki azalmayı kullanılan grafitin düzensiz bir yapıda olmasına, partiküllerin keskin köşelere sahip olmasına ve partiküllerin homojen olarak dağılmamasına bağlamışlardır. Bu geometrik faktörlerin kopma uzamasının azalmasına katkıda bulunacağı belirtilmiştir.

### 3.2. Aşınma Testi Sonuçları

Şekil 5 ve 6'da sırasıyla PP ve grafit katkılı PP kompozitlerin farklı kayma hız ve yük altındaki sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, tüm numuneler için artan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. PP polimerinin 0.66 olan sürtünme katsayısı yükün 40N'a artırılması ile %20.5 oranında azalarak 0.55 elde edilmiştir. Benzer şekilde, PP/1Gr, PP/3Gr, PP/5Gr ve PP/10Gr kompozitleri için bu azalma %6.13, %7.90, %11.9 ve %11.7 oranlarında elde edilmiştir. Yükün artması ile sürtünme ısısı nedeniyle temas sıcaklığı genellikle artacaktır. Artan bu ara yüzey sıcaklığı polimer matrisi yumuşatarak kayma gerilimini azaltacaktır ve böylelikle sürtünme katsayısı azalacaktır [23]. PP polimerine ilave edilen grafit katkısı da sürtünme katsayısının azalmasında etkili olmuştur. 40N yük altında, PP polimerinin sürtünme katsayısı grafit miktarına bağlı olarak %14, %40, %76 ve %118 oranlarında azalmıştır. Suresha ve arkadaşları [13] artan grafit miktarı ile cam elyaf/epoksi kompozitlerin sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Sürtünme katsayısındaki bu azalmanın, yağlayıcılık etkisini artıran, grafit partiküllerin parçalanması ve/veya topaklanmış grafitin dağılımı nedeniyle olduğunu belirtmişlerdir. Katiyar ve arkadaşları da [18] epoksi bazlı polimerin 0.54 olan sürtünme katsayısının %10 grafit ilavesi ile 0.25'e düştüğünü ve bu azalmanın sebebini ise grafitin mükemmel bir katı yağlayıcı olmasına bağlamışlardır. Şekil 6 incelendiğinde ise artan kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. PP polimeri için bu artış %4.6 oranında elde edilirken PP/1Gr, PP/3Gr, PP/5Gr ve PP/10Gr kompozitleri için %7.2, %8.5, %8.9 ve %9.9 oranlarında elde edilmiştir. Sudheer ve arkadaşları [23] grafit gibi katı yağlayıcıların transfer film tabakası kalınlığını değiştirerek kompozit ile disk yüzeyi arasındaki temas alanını etkilediği belirtilmiştir. Artan kayma hızı ile birlikte transfer film tabakasının disk yüzeyinde dağıldığı ve sürtünme katsayısının etkilendiği belirtilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı 1.5m/s kayma hızı ve 20 N yük altında 0.69 değeri ile PP polimerinde elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı 1.0m/s kayma hızı ve 40N yük altında 0.25 değeri ile PP/10Gr kompozitinde elde edilmiştir. Uygulanan kayma hızı ve yük aralıklarında sürtünme katsayısını etkileyen en önemli parametrenin uygulanan yük olduğu belirlenmiştir.

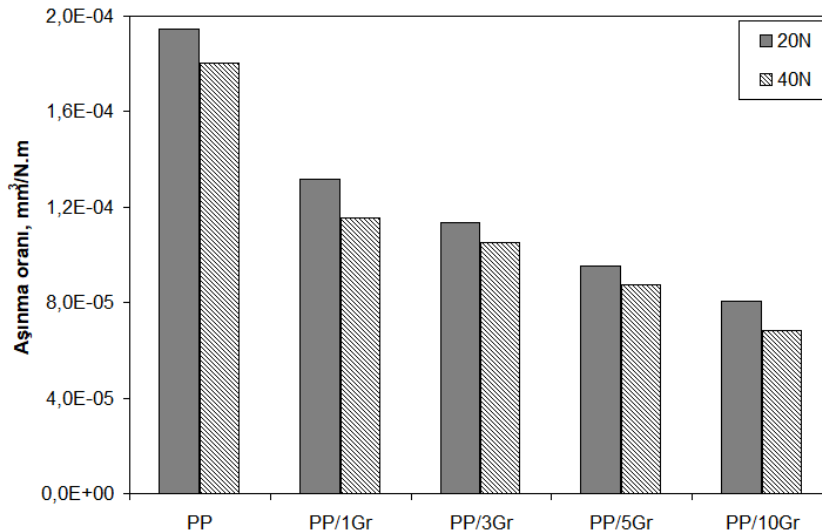


Şekil 5. PP ve kompozitlerinin yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi (Hız: 1.0m/s).



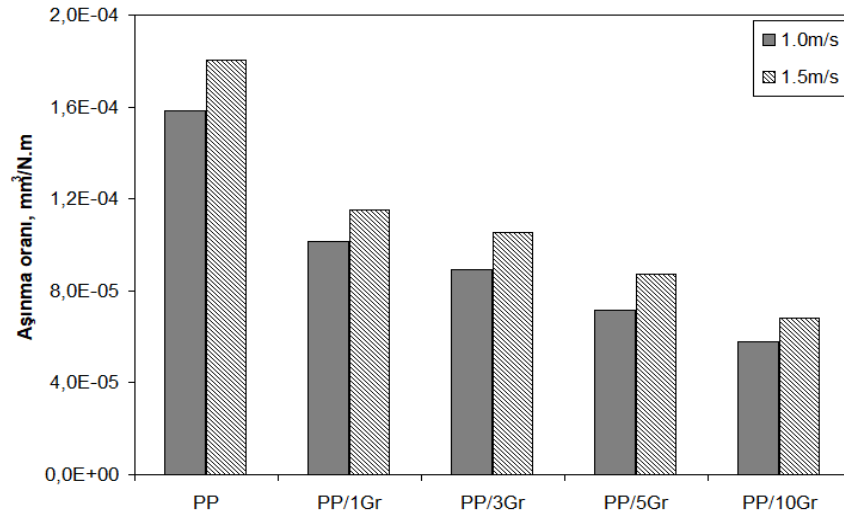
Şekil 6. PP ve kompozitlerinin kayma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi (Yük:20N).

Şekil 7 ve 8’de PP ve grafit katkılı PP kompozitlerinin uygulanan yüke ve kayma hızına bağlı olarak spesifik aşınma oranları verilmiştir. Genel olarak PP polimeri ile PP/1Gr kompoziti için aşınma oranı  $10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/N.m elde edilirken PP/3Gr, PP/5Gr ve PP/10Gr kompozitleri için  $10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde, artan yüke bağlı olarak aşınma oranı azalırken kayma hızının artması ile aşınma oranı artmıştır. PP polimerine ilave edilen grafit ve artan grafit miktarına bağlı olarak aşınma oranı önemli oranda azalmıştır. Bu azalma, PP/1Gr, PP/3Gr, PP/5Gr ve PP/10Gr kompozitleri için %47, %71, %104 ve %140 oranlarında elde edilmiştir. Benzer bir sonuç Xintao ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Artan grafit miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, grafitin karşı disk yüzeyinde transfer film tabakası oluşturan katı yağlayıcılardan birisi olduğu belirtilmiştir. Artan grafit miktarı ile kayma yüzeyi üzerinde şekillenen grafit miktarının arttığı ve disk yüzeyi ile polimer arasında teması keserek sürtünme katsayısının ve aşınma miktarının azaldığı belirtilmiştir [8].

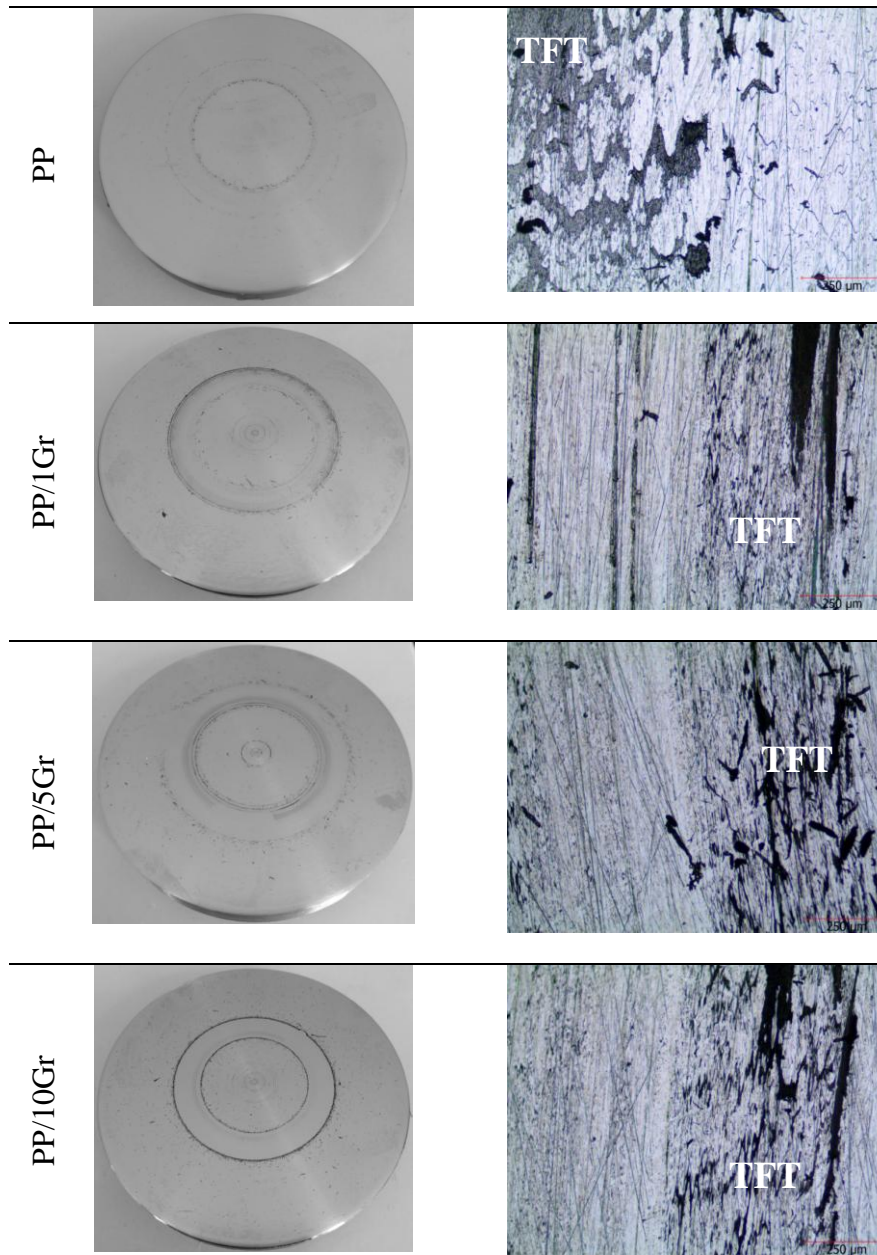


Şekil 7. PP ve kompozitlerinin yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranı değişimi (Hız: 1.5m/s).

Goyal and Yadav [19] grafit katkılı PTFE kompozitin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, aşınma oranının %5 ve %10 grafit içeriğinde 22 ve 45 kez daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bu azalmanın karşı disk yüzeyinde oluşan ince ve sürekli transfer film tabakasının



Şekil 8. PP ve kompozitlerinin kayma hızına bağlı olarak aşınma oranı değişimi (Yük:40N).



Şekil 9. PP ve PP kompozitlerin makro ve mikro disk resimleri.



oluşumuna bağlamışlardır. Çalışma sonucunda en düşük aşınma oranı 1.0m/s kayma hızı ve 40N yük altında,  $5.81 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  değeri ile PP/10Gr kompozitinde elde edilmiştir. Bilindiği gibi grafit, birbirine zayıf Van der Waals kuvvetleri ile bağlanmış ince paralel düzlemler (grafen) oluşturan altıgen halkalardan oluşan tabakalı yapıya sahip katı bir yağlayıcıdır. Kayma süresince, sürtünme kuvvetleri grafit partiküllerinin kayma yönünde hizalanmasına sebep olmaktadır. Grafen plakaları arasındaki zayıf bağ kayma yönünde düşük kayma gerilmelerine neden olurken kayma yönüne dik yönde yüksek basma dayanımı sağlamaktadır [13]. Düşük sürtünme katsayısı ve grafitin yüksek yük taşıma kapasitesi grafit katkılı PP kompozitlerin kuru kayma şartları altında aşınma performansının artmasında etkili olmuştur.

Şekil 9’da PP ve grafit katkılı PP kompozitlerin aşınma testleri sonucunda elde edilen makro ve mikro disk resimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm numuneler için disk yüzeyinde transfer film tabakasının (TFT) oluştuğu belirlenmiştir. Transfer film tabakası pim ile disk temasını engellemiştir. Oluşan bu transfer film tabakası, aşınma prosesi devam ettiğinde kararlı hal aşamasında daha düşük sürtünme katsayısı ve daha yüksek aşınma direnci elde edilmesine sebep olmuştur. Aynı zamanda, matristen grafit partiküllerine yüklerin aktarılmasında önemli rol oynayan güçlü matris-partikül arayüzey bağı, polimer malzemeleri karşı diskin kuvvetli aşındırıcı etkisinden korumaktadır. Xintao ve arkadaşları [6] tarafından yapılan çalışmada da sürtünme katsayısının ve aşınma oranının kontrol edilmesinde politetrafloretillen (PTFE) ve grafit katkılarının en önemli katı yağlayıcılar olduğu belirtilmiştir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Farklı oranlarda grafit katkılı PP kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

PP polimerine ilave edilen grafit, çekme dayanımını ve kopma uzamasını azaltırken elastiklik modülünü artırmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı 1.5m/s kayma hızı ve 20 N yük altında 0.69 değeri ile PP polimerinde elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı 1.0m/s kayma hızı ve 40N yük altında 0.25 değeri ile PP/10Gr kompozitinde elde edilmiştir. Uygulanan kayma hızı ve yük aralıklarında sürtünme katsayısını etkileyen en önemli parametrenin uygulanan yük olduğu belirlenmiştir. Genel olarak PP polimeri ile PP/1Gr kompoziti için aşınma oranı  $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  elde edilirken PP/3Gr, PP/5Gr ve PP/10Gr kompozitleri için  $10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  elde edilmiştir. Düşük sürtünme katsayısı ve grafitin yüksek yük taşıma kapasitesi grafit katkılı PP kompozitlerin kuru kayma şartları altında aşınma performansının artmasında etkili olmuştur.

#### Teşekkür

10-12 Ekim 2019 tarihleri arasında, Gaziantep Üniversitesi’nde düzenlenen konferansta sunulan çalışmamızın seçiminde, TICMET19 düzenleme komitesine teşekkürlerimizi sunarız.

#### Kaynaklar

- [1]. Gürkan, A., Sinan, F., Tamer, S. Solid Particle Erosion Behavior of Carbon Fiber - Metal Wire Hybrid Reinforced Polymer Composites. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018, 5(1):182-190.
- [2]. Recep, İ., Erol, F. The Wear of Glass Fiber Reinforced Polyester Composite Materials at Different Loads and Speeds. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018, 5(1):259-266.
- [3]. Kyriaki, K., Hiroyuki, F., Lawrence, T.D. Mechanical properties and morphological characterization of exfoliated graphite-polypropylene nanocomposites. Composites: Part A, 2007, 38:1675-1682.

- [4]. Ji-Zhao, L., Qiang, D., Gary Chi-Pong, T., Chak-Yin, T. Tensile properties of graphene nanoplatelets reinforced polypropylene composites. *Composites Part B*, 2016, 95:166-171.
- [5]. Jia, J.H., Chen, J.M., Zhou, H.D., Hu, L.T., Chen, L. Comparative investigation on the wear and transfer behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites under dry sliding and water lubrication, *Compos. Sci. Technol.*, 2005, 65(7-8):1139–1147.
- [6]. Zhang, X.R., Pei, X.Q., Wang, Q.H. Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO<sub>2</sub>. *Mater. Des.*, 2009, 30(10):4414-4420.
- [7]. Shi, Y.J., Mu, L.W., Lu, X.H., Feng, X. Tribological behavior of carbon nanotube and polytetrafluoroethylene filled polyimide composites under different lubricated conditions, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2011, 121(3):1574-1578.
- [8]. Xintao, Z., Gongxiong, L., Qifeng, J., Xuebin, F., Xigao, J. On dry sliding friction and wear behavior of PPESK filled with PTFE and graphite. *Tribology International*, 2008. 41:195-201.
- [9]. Ben Difallah, B., Kharrat, M., Dammaka, M., Monteil, G. Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder. *Materials and Design*, 2012, 34:782-787.
- [10]. Recep, İ., Erol, F. Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf ve Dolgu Maddeleri. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2019, 6(2), 355-381.
- [11]. Yu-Xun, P., Zhong-Zhen, Y., Yu-Chun, O., Guo-Hua, H. A New Process of Fabricating Electrically Conducting Nylon 6/Graphite Nanocomposites via Intercalation Polymerization. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*, 2010, 38(12):1626-1633.
- [12]. Chang, L., Zhong, Z., Lin, Y., Klaus, F. Tribological properties of high temperature resistant polymer composites with fine particles. *Tribology International*, 2007, 40:1170-1178.
- [13]. Suresha, B., Chandramohan, G., Renukappa, N.M., Siddaramaiah, H. Mechanical and Tribological Properties of Glass–Epoxy Composites with and Without Graphite Particulate Filler. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 103:2472-2480.
- [14]. Guo-Hua, C., Da-Jun, W., Wen-Gui, W., Bin, H., Wen-li, Y. Preparation of polystyrene–graphite conducting nanocomposites via intercalation polymerization. *Polymer International*, 2001, 50:980-985.
- [15]. Difallah, B.B., Kharrat, M., Dammaka, M., Monteil, G. Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder. *Materials and Design*, 2012, 34:782-787.
- [16]. Jia, Z., Caizhe, H., Yanhong, Y., Yulin, Y. Effects of nano scale expanded graphite on the wear and frictional behaviors of polyimide-based composites. *Wear*, 2015, 338-339:282-287.
- [17]. Golchin, A., Klaus, F., Andreas, N., Braham, P. Tribological behavior of carbon-filled PPS composites in water lubricated contacts. *Wear*, 2015, 328-329:456-463.
- [18]. Katiyar, J.K., Sujeet, K.S., Arvind, K. Friction and wear durability study of epoxy-based polymer (SU-8) composite coatings with talc and graphite as fillers. *Wear*, 2016, 362-363:199-208.
- [19]. Goyal, R.K., Yadav, M. Study on wear and friction behavior of graphite flake-filled PTFE composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 127(4):3186-3191.
- [20]. Bryan, D., Khalid, L., Use of exfoliated graphite filler to enhance polymer physical properties. *Carbon*, 2007, 45:1727-1734.
- [21]. Zheng, W., Xuehong, L., Shing-Chung, W. Electrical and Mechanical Properties of Expanded Graphite-Reinforced High-Density Polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 91:2781-2788.
- [22]. Krupa, I., Novak, I., Chodak, I. Electrically and thermally conductive polyethylene/graphite composites and their mechanical properties. *Synthetic Metals*, 2004, 145:245-252.
- [23]. Sudheera, M., Hemantha, K., Rajua, K., Thirumaleshwara, B. Enhanced Mechanical and Wear Performance of Epoxy/glass Composites with PTW/Graphite Hybrid Fillers. *Procedia Materials Science*, 2014, 6:975-987.