



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.05.2023  
Kabul Tarihi : 09.11.2023

Received Date : 22.05.2023  
Accepted Date : 09.11.2023

### KATI YAĞLAYICI OLARAK GRAFİT KATKILI NAYLON 6 KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK PERFORMANSLARI

#### MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF GRAPHITE FILLED NYLON-6 COMPOSITES AS SOLID LUBRICANT

Hüseyin ÜNAL<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-0521-6647)  
Salih Hakan YETGİN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-6068-9204)  
Veysel Furkan ÜNAL<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0002-6639-0393)

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

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

<sup>3</sup> Johannes Kepler University, Faculty of Engineering, Dept. of. Polymer Engineering, Linz, Austria

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hüseyin ÜNAL, unal@sakarya.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada saf naylon 6 polimeri ile farklı oranlarda grafit (Gr) katkılı naylon 6 polimer esaslı kompozitlerin mekanik ve tribolojik performansları incelenmiştir. Ağırlıkça %5-10-15 gibi farklı oranlarda grafit katkılı kompozitler üretilmiştir. Granüller kompond üretim yöntemiyle üretilirken mekanik ve tribolojik test numuneleri enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle basılmıştır. Üretilen kompozitlerin sertlik, çekme mukavemeti, kopmadaki % uzama ve elastiklik modülü gibi mekanik özellikleri ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gibi tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tribolojik deneyler, 0,5 m/s kayma hızında ve 30 N yükte gerçekleştirilmiştir. Tribolojik özellikler naylon 6/naylon 6 çifti, naylon 6-5Gr/naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerinin birbiri üzerinde çalışması durumunda gerçekleştirilmiştir. Çekmedeki elastiklik modülü ve sertlikte artışlar gözlenirken çekme mukavemeti, kopmadaki % uzama değerlerinde azalma tespit edilmiştir. En yüksek elastiklik modülü 4607 MPa ve en yüksek sertlik 77 Shore D değeri ile %15 oranında grafit katı yağlayıcı katkı içeren Naylon 6 polimer kompozitinde elde edilmiştir. En düşük çekme mukavemeti ve kopmadaki % uzama değerleri ile en düşük aşınma oranı ve en yüksek sürtünme katsayısı %15 grafit katkılı naylon 6 polimer kompozitinde elde edilmiştir. Naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftinin sürtünme katsayısı naylon 6/naylon 6 çiftine göre yaklaşık %63,8 oranında artmıştır. Nylon6/nylon6 ile karşılaştırıldığında, nylon6-5Gr/nylon6-5Gr kompozitin, nylon6-10Gr/nylon6-10Gr kompozitin ve Nylon6-15Gr/nylon6-15Gr kompozitin aşınma oranları sırasıyla %30,8, %51,7 ve %56,3 azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Naylon 6, grafit, tribolojik özellikler, mekanik özellikler, kompozit.

#### ABSTRACT

In this study, the mechanical and tribological performances of pure nylon 6 polymer and nylon 6 polymer-based composites filled with graphite at different ratios were investigated. Composites filled with graphite filler at different ratios of 5-10-15 wt% were produced. Granules were produced by compound production method, while mechanical and tribological test specimens were moulded by injection moulding method. The mechanical properties of the composites such as hardness, tensile strength, % elongation at break and modulus of elasticity and tribological properties such as coefficient of friction and wear rate were investigated. Tribological tests were carried out at a sliding speed of 0,5 m/s and a load of 30 N. Tribological properties were carried out in the case of nylon 6/nylon 6 pair, nylon 6-5Gr/ nylon 6-5Gr, nylon 6-10Gr/ nylon 6-10Gr and nylon 6-15Gr/ nylon 6-15Gr composite pairs working on each other. While increases in tensile modulus and hardness were observed, tensile strength and % elongation at break values decreased. The highest tensile modulus of 4607 MPa and the highest hardness of 77 Shore D were obtained in nylon 6 composite with 15wt.% graphite filler. The lowest tensile strength and % elongation at break values, the lowest wear rate and the highest coefficient of friction were obtained in nylon 6 polymer composite

ToCite: ÜNAL, H., YETGİN, S. H., & ÜNAL, V. F., (2023). KATI YAĞLAYICI OLARAK GRAFİT KATKILI NAYLON 6 KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK PERFORMANSLARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 850-862.

with 15% graphite filler. The friction coefficient of the nylon 6-15Gr/nylon 6-15Gr composite increased by approximately 63.8% compared to the nylon 6/nylon 6. Compared to Nylon6/nylon6, the wear rates of nylon6-5Gr/nylon6-5Gr composite, nylon6-10Gr/nylon6-10Gr composite and Nylon6-15Gr/nylon6-15Gr composite were reduced by 30.8%, 51.7% and 56.3%, respectively.

**Keywords:** Nylon 6, graphite, tribological properties, mechanical properties, composite.

## GİRİŞ

Polimer malzemeler, son yıllarda farklı uygulamalarda metal malzemelere alternatif olarak giderek daha fazla kullanılmaya başlamıştır. Plastik parçalar, hafiflik, tasarım esnekliği, korozyon direnci ve yoğunluğa göre yüksek dayanım gibi özelliklerinden dolayı metalik malzemelere göre daha iyi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, her bir uygulamada insanoğlunun isteklerini yerine getirmek için polimer malzemelerin uygun dolgu/katkı maddeleri ile karıştırılması gerekmektedir.

Su sayacı valfleri, yataklar, dişliler, burçlar ve silindirler gibi tribolojik uygulamalar için mekanik özellikler, viskoelastik özellikler, sıcaklık kararlılığı, ısı dağılımı, sürtünme katsayısı ve aşınma direnci gibi dikkate alınması gereken birkaç özellik mevcuttur. Polimer türü seçiminin yanında istenilen performansın elde edilmesi için uygun dolgu ve/veya katkı maddelerinin seçimi de çok önemlidir. Çoğu polimer malzemeler, yüksek yükler altında ve/veya yüksek kayma hızlarında yüksek aşınmaya maruz kalmakta ve bunun sonucu olarak yüksek sürtünme katsayısının oluşmasına da sebep olmaktadır. Yüksek yük ve kayma hızlarında, sürtünme katsayısı ve/veya aşınma büyük ölçüde artacak ve polimer malzeme bu koşullar altında kolaylıkla deforme olacaktır. Polimer malzemelerin tribolojik özellikleri, sürtünme katsayısı azaltılarak (sürtünme ısınmasının azaltılması) veya mukavemet değerleri (deformasyona karşı direnç) ile termal iletkenlik (yüzey sıcaklığının düşürülmesi) iyileştirilerek geliştirilebilmektedir. Grafit, molibden disülfid ( $MoS_2$ ) ve politetrafloroetilen (PTFE) gibi bazı katı yağlayıcılar, mükemmel aşınma direnci ve düşük sürtünme özelliklerine sahiptir. Bu malzemeler, sıvı yağlayıcıların istenmediği ve etkisiz olduğu uygulamalarda tribolojik zorlukları çözmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ben Difallah, Kharrat, Dammak ve Monteil, 2012; Ben Difallah, Kharrat, Dammak ve Monteil, 2014; Kumar & Kanagaraj, 2016; Matyas, 2018; Alajmi, Alrashdan, Alsaed ve Shalwan, 2020). Bu malzemeler arasında, grafit, polimerlerin tribolojik, mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan en önemli ve gelecek vaat eden katı yağlayıcılardan biridir (Raffaele, 2016; Dajana, Simon, Mitjan, Janez, Blaz ve Miroslav 2022; Ben Difallah et al., 2012). 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 (Zhou, Chiang, Xu, Du, Li, Xu ve Feiyu, 2012; Hussam, Andrey ve Victor, 2022; Ömer, Musa, ve Menderes, 2020).

Grafit katkılı polimer malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan birisinde Piotr vd. (2019) yakıt hücrelerinde çift kutuplu levha olarak kullanıma uygunluğunu değerlendirmek için ağırlıkça %10-80 oranında grafit dolgu içeriklerine sahip polipropilen (PP) kompozitler üretmişlerdir. Elektrik öz direnci, termal iletkenlik ve mekanik özellikler belirlenmiş ve dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Grafit içeriği ile elektriksel ve termal iletkenlik artmıştır. Grafit ilavesi ile çekme ve eğilme dayanımları azalmıştır. Bununla birlikte, artan grafit içeriğiyle, her iki mukavemet değeri de değişmeden saf PP değerinin altında kalmıştır. Çekmedeki ve eğmedeki elastiklik modülleri artan grafit katkı içeriği ile doğrusal olarak artmıştır. Unal vd. (2013) farklı oranlarda (%5-10-15) grafit ilaveli PA6 kompozitlerin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Triboloji testleri paslanmaz çelik diske karşı 0,4 m/s kayma hızı ve 50-100 N yük altında yapılmıştır. Çekme dayanımı, kopma uzaması, darbe dayanımı ve spesifik aşınma oranı artan grafit miktarı ile azalmıştır. Elastiklik modülü, sertlik, dielektrik geçirgenliğin gerçek kısmı, dielektrik geçirgenliğin hayali kısmı ve dielektrik kaybı ise artan grafit miktarı ile artmıştır. Özelliklerdeki maksimum gelişme, ağırlıkça %5 ile %10 oranında grafit katkı maddesinin eklenmesinin ardından elde edildiği belirtilmiştir. Reddy (2015) %5-15 oranlarında grafit ve PTFE katkılı PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma testleri pim-disk sistemi ile çelik karşı diske karşı 0,5 m/s kayma hızı 100 N yük şartlarında yapılmıştır. Artan grafit miktarı ile çekme dayanımı artarken eğme ve darbe dayanımı azalmıştır. Grafit sürtünme katsayısını artırırken spesifik aşınma oranını azaltmıştır. Ben Difallah vd. (2012) sıcak presleme ile kalıplama tekniğiyle ürettikleri grafit tozu katkılı Akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Artan grafit miktarı ile mekanik özellikler azalmıştır. ABS polimerine grafit ilavesi ile

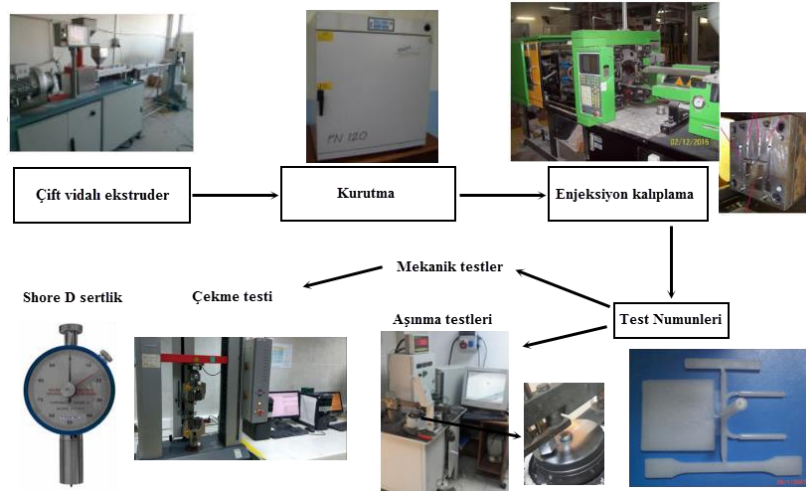
daha düşük sürtünme katsayısı ve artan grafit miktarı ile de azalan ağırlık kaybı elde edilmiştir. En iyi sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybı %7.5 grafit miktarında elde edilmiştir. Matyas (2018) %1,5, 2, 2,5, 3 ve 3,5 oranlarında grafit katkılı PA6 kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Artan grafit miktarı ile charpy çekme dayanımı ve darbe dayanımı azalmıştır. PA6 polimerine ilave edilen grafit ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Yüksek grafit miktarlarında tribolojik özelliklerin kötüleştiği belirtilmiştir. Katiyar, Sujeet ve Arvind (2016) epoksi bazlı SU-8 polimer ile grafit katkılı (ağırlıkça %2-30) SU-8 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. %10 ve %20 oranında grafit içeriğinde elastiklik modülünün 2,2 kat arttığı belirtilmiştir. %10 grafit katkı oranında sürtünme katsayısı 2 kat azalmış aşınma ömrü ise 10 kat oranında artmıştır. %20 grafit katkılı kompozit numunede daha yüksek sürtünme katsayısı gözlenmiştir. Vikram, Bhaumik ve Pramanik (2023) ağırlıkça %1-3-5 oranlarında grafit katkılı %5 cam elyaf takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Geliştirilen tüm kompozitler arasında, %1 oranındaki grafit katkılı PA6/5GF kompoziti, saf PA6'ya kıyasla tribolojik (0,20–0,26 COF) ve mekanik (45 MPa gerilme mukavemeti ve HRB 47 sertliği) özellikleri önemli ölçüde geliştirdiği belirtilmiştir. Kumar ve Kanagaraj (2016) farklı oranlarda grafit katkı içeren PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. %20 grafit içeriğinde en iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. EN31 çelik diske karşı 1000-2000 rpm hız ve 5-30 N yük altında yaptıkları pim-disk aşınma testleri sonucunda %20 grafit miktarında en iyi tribolojik özellikler elde edilmiştir. Mohd-Abdul, Sathees, Nithin ve Shaik (2023) grafit katkılı naylon6 polimerinin tribolojik özelliklerini Taguchi yöntemi ile analiz etmişlerdir. Raffaele (2016) ise grafit katkının polistiren (PS) polimeri üzerine etkisini araştırmıştır. Triboloji testleri için çelik ve PA66 bilyeler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, PS polimerinin sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve P.V (pressure\*velocity/basınç\*hız) limiti üzerinde grafit katkı oranının, katkı tipinin ve boyutunun önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Jitendra, Jayashree ve Raj (2019) kısa cam elyaf/Poliaril-eter-keton (PAEK) kompozitlere ilave ettikleri farklı oranlardaki grafit partiküllerinin (ağırlıkça %10, 15, 20 ve 25) fiziksel, mekanik, termal ve adeziv aşınma performansına etkilerini incelemişlerdir. Grafitin dahil edilmesi, mukavemet ve elastiklik modülünde bozulmaya ancak termal iletkenlikte artışa neden olmuştur. Kompozitler, 0,04 sürtünme katsayısı değeri ve  $\sim 2 \times 10^{-16}$  m<sup>3</sup>/Nm özgül aşınma oranı (K<sub>o</sub>) değeri ile çok düşük tribolojik özellikler göstermiştir. Ağırlıkça %15 oranında grafit içeren kompozit, en yüksek P.V limit değeri (154 MPa m/s) ve en düşük düşük sürtünme katsayısı (0,04) ve K<sub>o</sub> (1,91x10<sup>-16</sup> m<sup>3</sup>/Nm) göstererek önemli oranda tribolojik özellikleri geliştirmiştir. Gheisari ve Polycarpou (2019) %15Gr katkılı poliimit (PI) ve %10Gr ilaveli Politetrafloretillen (PTFE) polimerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler takım çeliğine karşı 6,32 MPa temas basıncı ve 1,91 m/s kayma hızında yapılmıştır. Her iki polimerin de rulman uygulamaları için tribolojik açıdan uygun malzemeler olduğu ifade edilmiştir.

Literatürde grafit katkılı polimer kompozitlerin metal malzemeler ile temas ettiği durumlardaki aşınma ve sürtünme davranışları geniş bir şekilde araştırılırken birbiri ile temasta olan grafit+Naylon 6/grafit+Naylon 6 kompozit malzeme çiftlerinin aşınma davranışları üzerinde herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Endüstrinin birçok alanında polimer/polimer aşınma çifti ve/veya polimer kompozit/polimer kompozit aşınma çiftinin çalıştığı makine elemanlarına rastlanılmaktadır. Bu çalışmada, saf naylon 6 polimeri ile ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında grafit katı yağlayıcı içeren naylon 6 polimer kompozitlerin mekanik özellikleri belirlenirken tribolojik performansları da belirlenmiştir. Tribolojik özellikler naylon 6/naylon 6 çifti, naylon 6-5Gr/ naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/ naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerinin birbiri üzerinde çalışması durumunda gerçekleştirilmiştir. Naylon 6 polimer ana matrisi ile grafit katı yağlayıcı karışımı ikiz vidalı bir kompozit makinasında gerçekleştirilmiştir. Standartlara uygun mekanik ve aşınma test numuneleri ise enjeksiyonla kalıplama tekniği kullanılarak basılmıştır. Sonra ise sertlik ölçümleri, çekme testi ile aşınma ve sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde malzemelerin çekme mukavemeti, elastiklik modülü, kopmadaki % uzama, sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafit katkı oranına bağlı olarak düzenlenmiş ve grafiklerle karşılaştırmalı açıklanmıştır.

## MALZEME VE METOT

Deneylerde kullanılan naylon 6 polimer ana matrisi Domamid ticari kodu ile Domopolymer firmasından satın alınmıştır. Grafit katı yağlayıcı katkı ise Odak İthalat ve İhracat Firmasından temin edilmiştir. Ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında grafit katkı içeren naylon 6 kompozitler NR11-75 model ikiz vidalı ekstruderde granül formunda üretilerek polietilen torbalara doldurulmuştur. Üretim esnasında ekstruder ısıtıcı sıcaklıkları 220-250 °C sıcaklıklar arasında ayarlanmıştır. Enjeksiyonla kalıplama yapılmadan önce granüller nem ihtimaline karşı bir etüvde 80 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre ile kurutulmuştur. Mekanik ve tribolojik test numuneleri ise Erat marka bir enjeksiyon makinasında basılmıştır. Enjeksiyon ısıtıcı sıcaklıkları 220-250 °C sıcaklıklar aralığında ayarlanmış ve test numuneleri 150 bar enjeksiyon basıncında basılmıştır. Kalıp ısıtıcısı kullanarak test numunesi kalıbı sıcaklığı 80 °C olarak ayarlanmıştır. Test numuneleri basıldıktan sonra 23 °C oda sıcaklığında ve %50 nem şartlarında 24 saat süre

ile şartlandırılmıştır. Şekil 1'de naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren naylon 6 kompozitlerin üretim şeması verilmiştir.



**Şekil 1.** Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin üretim şeması

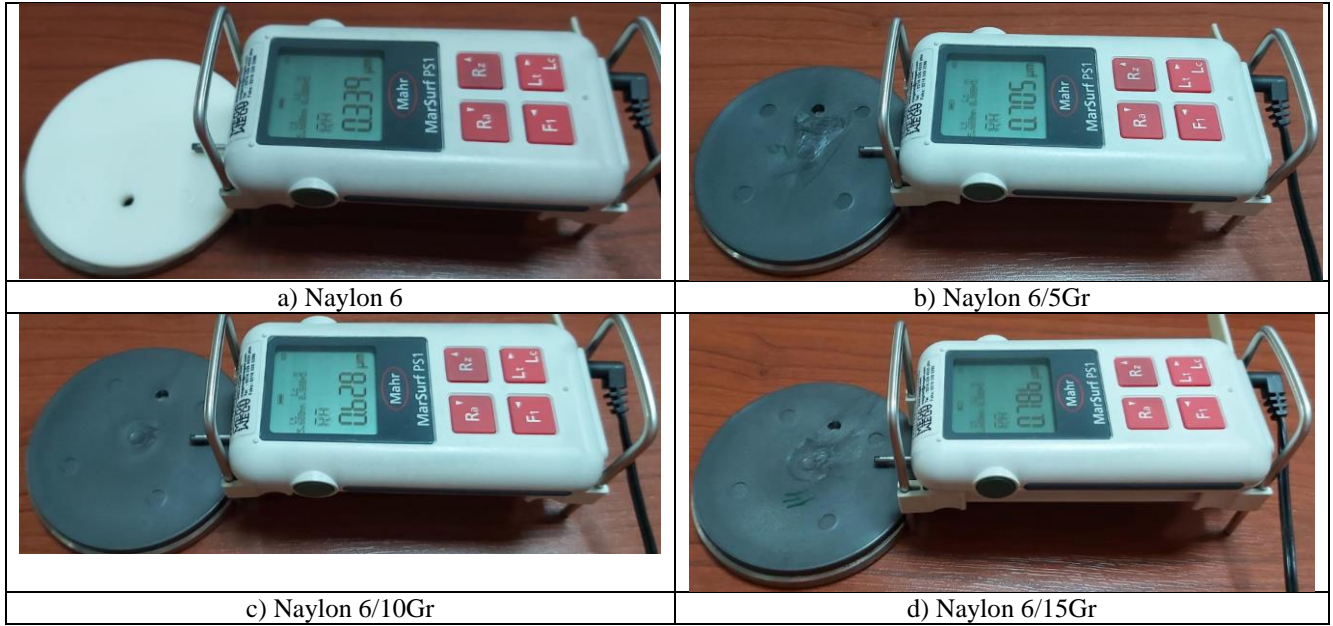
Saf naylon 6 polimeri ile ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında grafit içeren naylon 6 esaslı polimer kompozit test numunelerine sertlik ölçümleri yapılmış ayrıca çekme testi ile aşınma ve sürtünme testleri uygulanmıştır. Sertlik testleri ASTM D2240 standardına uygun olarak yapılmış sertlikler Shore D cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde her bir test numunesi üzerinden en az 10 sertlik ölçümü yapılmıştır. Çekme testleri, ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Testler, Zwick marka Z020 model bir çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bir çekme test numunesi en az 5 ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Çekme testleri 5 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Triboloji testleri pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan pim ve diskler aynı malzemeler birbiri üzerinde çalışacak şekilde dizayn edilmiştir. Yani pim/disk çiftleri sırasıyla 4 ayrı grup olarak dizayn edilmiştir. 1) Naylon 6 pim/Naylon 6 disk çifti, 2) Naylon 6+5Gr pim/Naylon 6+5Gr disk çifti, 3) Naylon 6+10Gr pim/Naylon 6+10Gr disk çifti ve 4) Naylon 6+15Gr pim/Naylon 6+15Gr disk çifti olmak üzere planlama yapılmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan pim malzemeler 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğundadır. Naylon 6 polimer ile grafit katkılı Naylon 6 kompozit diskler ise 5 mm kalınlığında ve 90 mm çapında olacak şekilde kullanılmıştır. Triboloji testleri ASTM G99 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Pim ve disk test numuneleri enjeksiyonla kalıplama tekniği ile üretilmişlerdir. Sürtünme ve aşınma testleri, kuru kayma şartları altında, yaklaşık oda sıcaklığında ve %50 nem şartlarında gerçekleştirilmiştir. Polimer ve kompozit disklerin yüzey pürüzlülükleri Mahr-MarSurfPS1 marka ve model cihaz kullanılarak ölçülmüş ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,339-0,786 Ra aralığında belirlenmiştir ve Şekil 2'de ölçüm sonuçları görsel olarak verilmiştir. Aşınma ve sürtünme testleri 30 N yük altında ve 0,5 m/s kayma hızında 1000 m kayma yolunda gerçekleştirilmiştir. Aşınma test parametreleri ve karşı disk malzemeler Tablo 1'de verilmiştir. Polimer/Polimer teması ile polimer kompozit/polimer kompozit temasında triboloji testlerinde malzeme çiftlerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. Deneyler sırasında, sürtünme kuvveti yükleme koluna monte edilmiş bir yük hücresi ile ölçülmektedir. Deney süresi boyunca her 60 saniyede yaklaşık 1500 veri okunmuş ve bilgisayarda bir Excell programında kaydedilmiştir. Sürtünme kuvveti olarak ifade edilen yanal yükler uygulanan normal yüke bölünerek malzeme çiftinin sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Pim-disk teması esnasındaki sürtünme katsayısı eşitlik 1'de aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Formülde  $\mu$ : sürtünme katsayısını,  $F_s$ : sürtünme kuvvetini,  $F_n$ : normal kuvveti ifade etmektedir.

$$\mu = F_s / F_n \quad (1)$$

Aşınma oranının tespiti için ise pim numunelerin aşınma testi öncesi 0,0001 gr hassasiyetli Precia marka bir hassas terazide ağırlığı ölçülmüş ( $m_1$ ), sonra deney sonrası aşınan pim numunesinin ağırlığı ( $m_2$ ) ölçülmüştür. Deney öncesi ve sonrası ağırlık farkı ( $m_1 - m_2$ ) =  $\Delta m$  alınarak pim numunenin yoğunluğuna, kayma yoluna ve normal yüke bölünmesiyle eşitlik 2'de verilen formülle hesaplanmıştır. Formülde AO: aşınma oranı,  $\rho$ : pim numunenin yoğunluğu, L: kayma yolu,  $F_n$ : normal yükü temsil etmektedir.

$$AO = \Delta m / \rho * L * F_n \quad (2)$$





Şekil 2. Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin YüzeY Pürüzlülük Ölçümleri

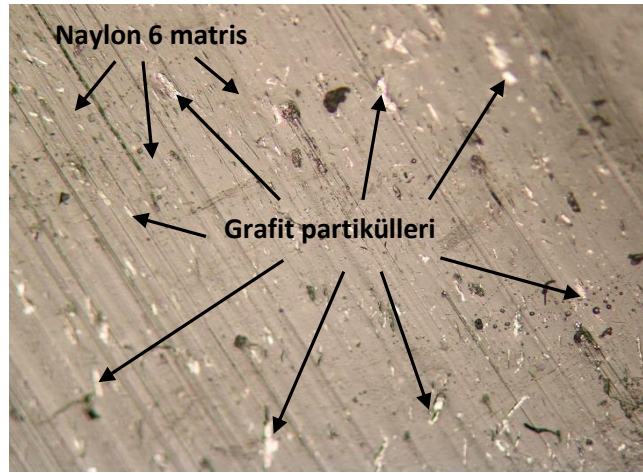
Tablo 1. Aşınma Test Parametreleri ve Kullanılan Karşı Disk Malzemeler

| Pim           | Karşı disk    | Yük,<br>N | Kayma hızı,<br>m/s | Kayma<br>mesafesi, m |
|---------------|---------------|-----------|--------------------|----------------------|
| Naylon 6      | Naylon 6      | 30        | 0,5                | 1000                 |
| Naylon 6/5Gr  | Naylon 6/5Gr  |           |                    |                      |
| Naylon 6/10Gr | Naylon 6/10Gr |           |                    |                      |
| Naylon 6/15Gr | Naylon 6/15Gr |           |                    |                      |

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Üretilen grafit katkılı naylon 6 esaslı kompozitlerin optik mikroskop incelemeleri yapılarak naylon 6 bünyesindeki grafit katkıların dağılımı araştırılmıştır. Kompozit üretimleri endüstriyel olarak çalışan çift vidalı ekstruderde gerçekleştirildiği için Naylon 6 bünyesine ilave edilen grafit katkıların homojen olarak dağıldığı düşünülmektedir. Ancak homojen dağılımı kanıtlamak adına Şekil 3'te %10 grafit katkılı naylon 6 kompozit malzemenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Tablo 2'de naylon 6 ve naylon 6 kompozitlerin çekme ve sertlik testleri sonuçları verilmiştir. Şekil 4'te ise grafit miktarının bir fonksiyonu olarak çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit ve artan grafit katkı miktarı ile çekme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Saf Naylon 6 polimerinin 75 MPa olan çekme dayanımı, Naylon 6/5Gr, Naylon 6/10Gr ve Naylon 6/15Gr kompozitleri için sırasıyla 74 MPa, 69 MPa ve 67 MPa olarak elde edilmiştir. Saf Naylon 6 ile karşılaştırıldığında %5-15 oranında grafit miktarına bağlı olarak çekme dayanımında %1,35-11,9 oranında azalma meydana gelmiştir. Kompozit içerisindeki grafit partikülleri gerilme konsantrasyon bölgeleri olarak hareket etmekte ve üniform olmayan gerilme dağılımlarına yol açarak daha da yüksek gerilmeler oluşturmaktadır. Bu durum grafit partiküllerinin ayrılmasına ve boşluk oluşumuna sebep olmakta ve çatlak ilerlemesi nedeniyle kompozitler hızlı bir şekilde kırılarak çekme mukavemeti değerleri azalmaktadır (Diez-Pascual, Naffakh, Marco, Ellis ve Gomez-Fatou, 2012). Bununla birlikte Saf Naylon 6 polimerinin 3001 MPa olan elastiklik modülü %5 oranında grafit ilavesi ile %15,6 oranında artış ile 3472 MPa olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde %10 grafit ilavesi ile elastiklik modülü %13,1 oranında artmıştır. Saf Naylon 6 ile karşılaştırıldığında %15 grafit ilaveli Naylon 6 kompozitin elastiklik modülü %53,5 oranında artarak 4607 MPa olarak elde edilmiştir. Bu durum, nispeten daha yumuşak olan Naylon 6 polimerine grafit gibi oldukça sert bir malzeme ilave edildiğinde, kompozitlerin rijitlik değerlerinde iyileşmeye yol açtığı ile açıklanabilir (Jitendra et al., 2019). Naylon 6 polimeri yüksek plastisiteye sahip bir polimerdir. Grafit çok kırılgan bir malzemedir. İki farklı özellikteki bu malzemenin birleştirilmesi, saf polimerin orijinal özelliklerinden daha düşük plastisite ve daha yüksek rijitlik ve kırılganlık ile sonuçlanmasının ana nedenidir (Piotr vd., 2019). Reddy (2015) ise yüksek grafit içeriğinde mukavemet değerlerinin azalmasının sebebini, kompozit yapının oldukça gözenekli yapıda olmasına ve yüksek yüzey alanına bağlamışlardır. Taha ve Abdin (2011)

kompozitin rijitliğinin esas olarak dolgu maddesi-matris arayüzüne bağlı olmadığını, ancak çekme yönündeki dolgu içeriğine bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Böylece kompozitlerin mukavemet değerleri azalmasına rağmen elastiklik modülü değerleri artmaya başlamıştır (Abenojar, Martinez, Velasco, Pascual-Sanchez ve Martin-Martinez, 2009). Yapılan bir başka yorumda ise polimere ilave edilen inorganik partiküllerin matriste iskelet görevi görerek fiziksel çapraz bağlanma nedeniyle zincir hareketliliği engellenerek kompozitin rijitliğinin artacağı belirtilmiştir. Kristal yapıdaki polimerlere ilave edilen inorganik katkıların çekirdeklenme (heterojen) oranını veya kristal yapıyı etkileyerek rijitliğin artmasına katkı sağlayacağı belirtilmiştir (Ji-Zhao, Qiang, Gary ve Chak-Yin, 2016). Vikram vd. (2023) %5cam elyaf katkılı PA6 kompozitlere ilave ettikleri grafit oranının fazlalaşması durumunda topaklaşma meydana geldiğini ve mekanik özelliklerin kötüleştiğini belirtmişlerdir. %3 ve %5 grafit ilavesinin elyaf ayrılması ve çatlak ilerlemesi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Grafit topaklaşmasının elyaflar arasında kaymaya neden olarak mukavemet değerlerinin azaldığı belirtilmiştir.

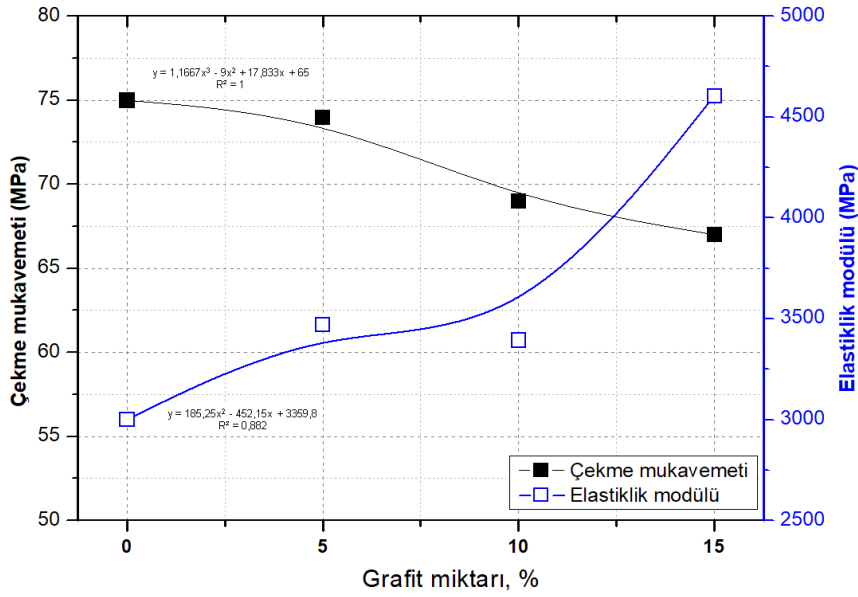


Şekil 3. Ağırlıkça %10 Oranında Grafit Katkılı Naylon 6 Kompozitin Optik Mikroskop Yüzey Görüntüsü

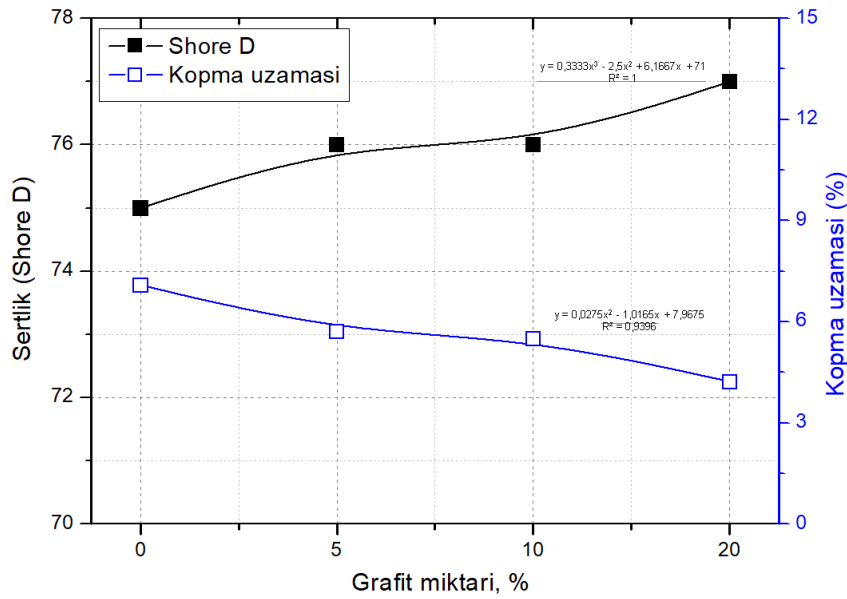
Tablo 2. Naylon 6 ve Naylon 6 kompozitlerin mekanik test sonuçları

| Malzeme       | Çekme mukavemeti, | Elastiklik modülü, | Kopma uzaması, | Sertlik,<br>Shore D |
|---------------|-------------------|--------------------|----------------|---------------------|
|               | MPa               | MPa                |                |                     |
| Naylon 6      | 75                | 3001               | 7,09           | 75                  |
| Naylon 6/5Gr  | 74                | 3472               | 5,71           | 76                  |
| Naylon 6/10Gr | 69                | 3395               | 5,5            | 76                  |
| Naylon 6/15Gr | 67                | 4607               | 4,23           | 77                  |

Şekil 5'te ise Saf Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 kompozitlerin kopmadaki % uzaması ve sertlik (Shore D) değerlerinin grafit katkı oranına göre değişimi verilmiştir. Beklenildiği gibi saf Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit katkısı ile kopmadaki uzama değerleri azalmıştır. Bu azalma grafit katkı oranına bağlı olarak değişmekle birlikte %15 grafit ilavesi ile kopma uzaması %67,6 oranında azalmıştır. Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit ile deformasyona karşı direnç artmış ve kopma uzaması azalmıştır. Grafit partiküllerinin eklenmesi kristal yapıyı daha ince yapmakla birlikte yüksek grafit oranlarında heterojen bir karışım oluşabilmektedir. Bu durum, grafitin naylon moleküllerinin bağlanma kuvvetini azaltan naylon molekülleri arasında yer almasına ve topaklaşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak kompozitin özellikleri azalacaktır (Unal vd., 2013). Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit katkısının Shore D sertliğini hafif bir şekilde artırdığı ve Naylon 6 ve Naylon 6/Gr kompozitlerin Shore D sertlik değerlerinin 75-77 Shore D arasında olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda (Sudheer, Prabhu, Raju ve Bhat, 2014) Naylon 6 ve grafit arasındaki arayüzey bağı zayıf olsa dahi grafit katkı nedeniyle yükün daha verimli bir şekilde aktarıldığı ve kompozitin sertliğinin arttığı belirtilmiştir. Vikram vd. (2003) ise düşük grafit içeriğinde, katkısız %5cam elyaf/PA6 kompozitine göre, homojen dağılım nedeniyle 45 Rockwell sertlik değerinden 47 Rockwell sertlik değerine ulaşıldığı belirtilmiştir.



Şekil 4. Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin elastiklik Modülü ve Çekme Mukavemetinin Grafit Katkı Oranına Göre Değişimi



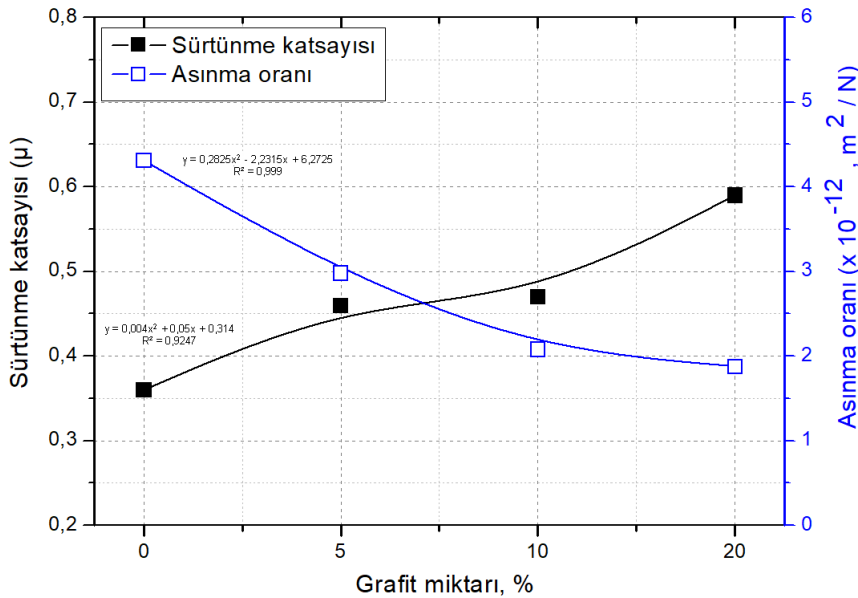
Şekil 5. Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kopmadaki % Uzamanın ve Shore D Sertliğinin Grafit Katkı Oranına Göre Değişimi

Tablo 3'te aşınma deneyleri sonucu elde edilen spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Şekil 6'da ise 30 N, 0,5 m/s kayma hızı ve 1000 m kayma yolu şartları altında Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 kompozitlerin kendi üzerlerinde çalışması durumundaki sürtünme katsayısının ve aşınma oranının değişimi verilmiştir. Saf Naylon 6 polimerinin 0,36 olan sürtünme katsayısı değeri %5 grafit ilavesi ile %27,7 oranında artmış ve 0,46 olarak elde edilmiştir. Naylon 6/10Gr kompozitinin sürtünme katsayısı ise %30,5 oranında artarak 0,47 elde edilmiştir. Saf Naylon 6 polimerine ilave edilen %15 oranındaki grafit katkısı ise sürtünme katsayısını %63,8 oranında artırmış ve 0,59 değeri ile en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir. You, Li, Deng, Li ve Xie (2013) PA6/cam elyaf kompozitine ilave edilen grafit ile sürtünme katsayısının ve aşınmanın arttığını belirtmişlerdir. Polimerik sistemlerde sürtünme katsayısını doğrulayan denklem  $\mu = kN^{n-1}$ 'dir. (Burada  $\mu$  sürtünme katsayısıdır, N uygulanan yüküdür ve 'k' ve 'n' sabittir ve 'n' 2/3 arasındadır (Li, Yin, Jiang, Jin ve Cui, 2015). Yağlanmamış koşullar altında, temas alanındaki malzemenin deformasyonundan kaynaklanan sürtünme ısı, gerçek temas alanı ve polimer kompozitlerin kesme gerilmesinin bir ürünü olan adheziv sürtünmesinde bir artışa neden olmaktadır (Chen, Yan, Liu, Niu ve Ma, 2015). Daha yüksek yük ve kayma hızında sürtünme ısı artacaktır.

Böylelikle, gerçek temas alanının artması ile kesme gerilmesi azalarak sürtünme katsayısı artacaktır. Saf Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit ve artan grafit katkı miktarı ile aşınma oranı önemli oranda azalmıştır. Saf Naylon 6 polimeri ile karşılaştırıldığında Naylon 6/5Gr, Naylon 6/10Gr ve Naylon 6/15Gr kompozitlerin aşınma oranları sırasıyla %44,6, %107,2 ve %129,2 oranlarında azalmıştır. Benzer sonuçlar Jitendra vd., (2019) ve Ben Difallah vd., (2012) tarafından da elde edilmiştir. Grafit, birbirine paralel altıgen halkalardan oluşan tabakalı yapıya sahip katı bir yağlayıcıdır. Sürtünme kuvvetleri, temas sırasında grafit partiküllerinin kayma doğrultusunda yönlendirilmesine sebep olmaktadır. Tabakalı yapı arasındaki zayıf bağlanma kayma doğrultusunda düşük kayma gerilmelerine kayma doğrultusuna dik yönde ise yüksek basma kuvveti sağlamaktadır (Suresha, Chandramohan, Renukappa ve Siddaramaiah, 2007; Reddy, 2015). Grafitin yüksek yük taşıma kapasitesi grafit katkılı Naylon 6 kompozitlerin kuru kayma şartları altında aşınma ömrünün artmasında etkili olmuştur.

**Tablo 3.** Spesifik Aşınma Oranı ve Sürtünme Katsayısı Sonuçları

| Malzemeler    | Yük (N) | Kayma hızı (m/s)   |                               |
|---------------|---------|--|-------------------------------|
|               |         | 0.5  |                               |
|               |         | Spesifik aşınma oranı ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ) | Sürtünme katsayısı, ( $\mu$ ) |
| Naylon 6      | 30      | 4,31   | 0,36                          |
| Naylon 6/5Gr  |         | 2,98   | 0,46                          |
| Naylon 6/10Gr |         | 2,08   | 0,47                          |
| Naylon 6/15Gr |         | 1,88   | 0,59                          |

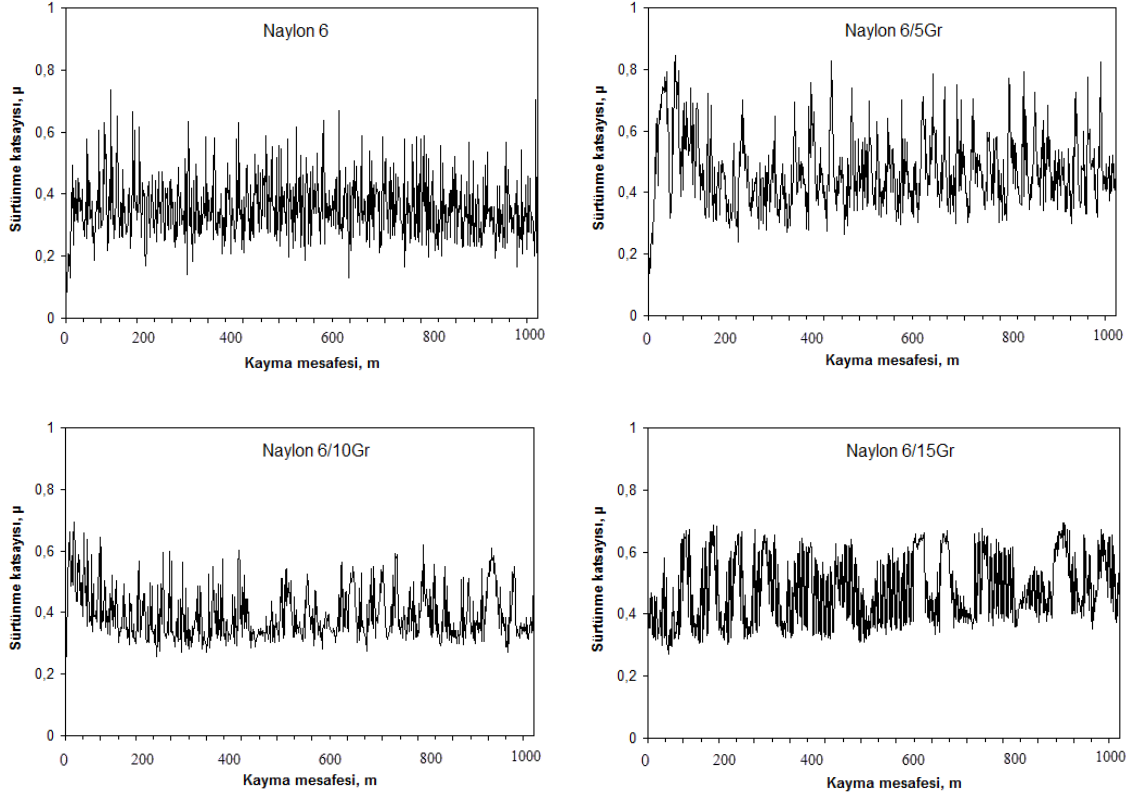


**Şekil 6.** Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kendi Üzerlerinde Çalışması Durumundaki Sürtünme Katsayısı Ve Aşınma Oranının Değişimi (Yük:30 N, Hız:0,5 m/s, Kayma yolu:1000 m)

Şekil 7 a-d'de 0,5 m/s kayma hızı, 30 N yük ve 1000 m kayma mesafesi şartları altında Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 kompozitlerin kendi üzerlerinde çalışması durumundaki sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafikleri verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı, başlangıç aşaması (running-in-stage) ve kararlı hal aşaması (steady-state) olmak üzere iki aşamada meydana gelmiştir. Başlangıç aşamasında, kayma yüzeyleri arasındaki sürtünme etkileşimi makro düzeyde gerçekleşmiş ve sonrasında bu sürede plastik deformasyon ve aşınmanın sonucu olarak gerçek temas alanı artmıştır. Yeterli bir temas alanı sağlandıktan sonra, bireysel temasların gerçek alanındaki artış nedeniyle sürtünme yüzeylerinin etkileşimi mikro düzeyde devam etmiştir. Polimer matris ve dolgunun transferi sonucunda karşı disk yüzeyinde ince yağlayıcı film oluşmuştur. Başlangıç aşaması süresince, şiddetli aşınma oranı gözlenmiştir. Kararlı ve üniform yağlayıcı transfer filmi kararlı aşamaya sebep olmuştur. Bu aşamada, aşınma sonucu oluşan madde kaybı, minimum entropi üretimi ve dolayısıyla minimum aşınma ile yeni yüzey katmanlarının oluşumu ile telafi edilmiştir. Vikram vd. (2023) pimin dönen yüzeyi ile dönen diskin arasına sıkışan yerinden kopmuş aşınma (grafit) partikülleri nedeniyle sürtünme katsayısının

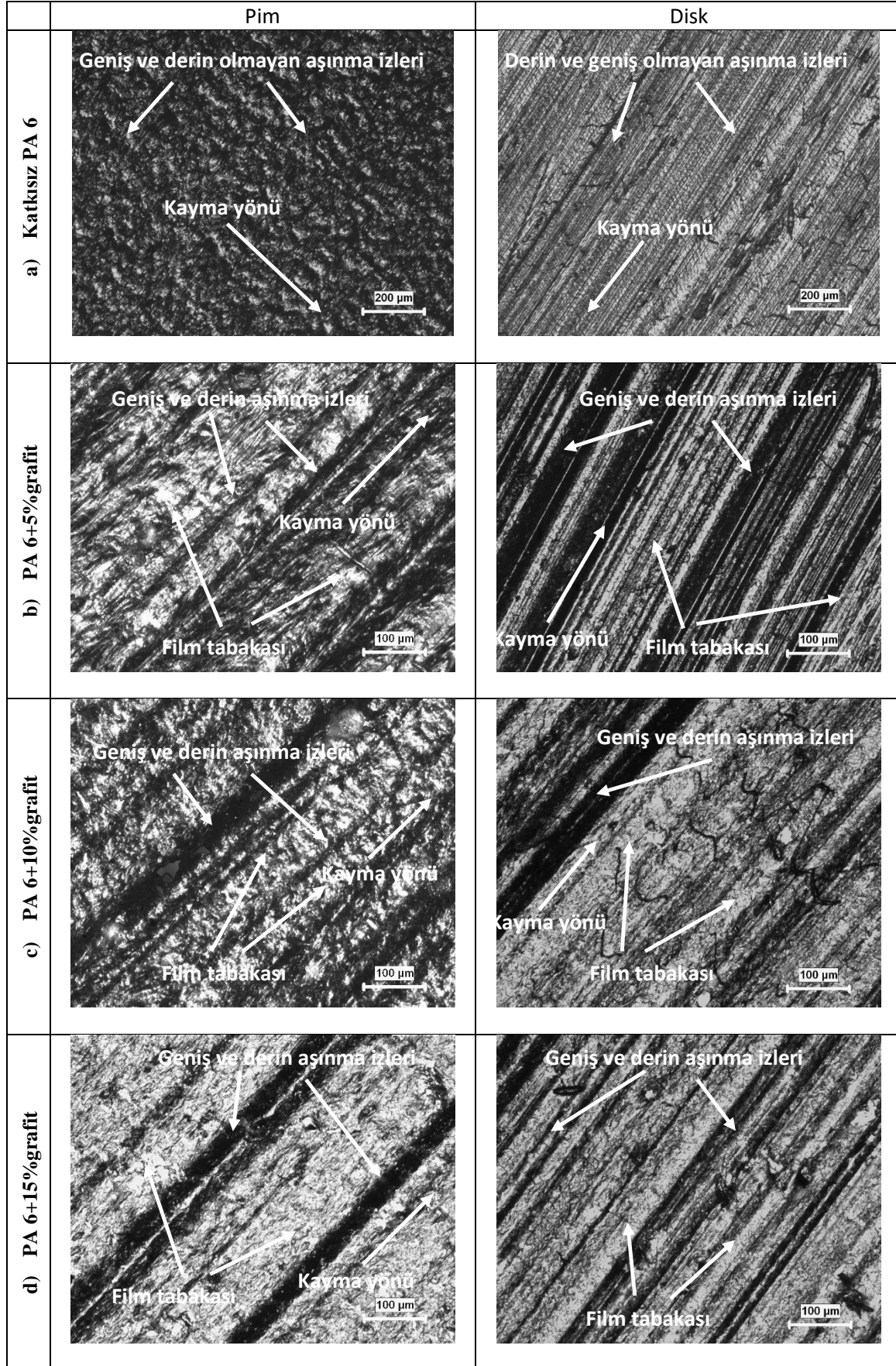


arttığını, sürtünme sırasında ise temas yüzeylerindeki sıcaklık değişimine bağlı olarak sürtünme katsayısının daha da arttığını belirtmişlerdir. Ancak, Ünal, Yetgin ve Köse (2023) vaks katkılı PA6 kompozitlerin pim ile disk arasındaki temas noktasında vaksın katı yağlayıcılık özelliğine sahip olmasından dolayı sıcaklığı azalttığı ve bunun sonucunda sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığını belirtmişleridir. Şekillerden de görüldüğü gibi kararlı aşamaya geçmek için 200 m gibi bir mesafenin yeterli olduğu gözlenmiştir.



**Şekil 7.** Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kendi Üzerlerinde Çalışması Durumundaki Sürtünme Katsayısı-Kayma Mesafesi Değişimi (Yük:30 N, Hız:0,5 m/s, Kayma yolu:1000 m)

Şekil 8a-d'de Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 esaslı kompozitlerin 30N yük altında 0,5 m/s kayma hızında kendi üzerlerinde çalışması durumundaki pim-disk optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 8a'da naylon 6/naylon 6 polimer çiftinin aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Polimer çifti birbiri üzerinde daha fazla aşınmakta ve daha düzgün yüzeyler oluşturmaktadır. Ancak naylon 6 bünyesindeki grafit oranı arttıkça (bakınız Şekil 8b-d) hem polimer pim hem de karşı disk yüzeylerinde derin ve geniş aşınma izleri gözlenmiştir. Ancak grafitin sağladığı yağlayıcılık sayesinde sürtünme katsayısı düşerken yüzeylerde oluşan ince film tabakası da aşınma oranının azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 8. Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kendi Üzerlerinde Çalışması Durumundaki Pim-Disk Optik Mikroskop Görüntüleri (Yük:30 N, Hız:0,5 m/s, Kayma yolu:1000 m)



## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mekanik ve tribolojik çalışmalardan özetle aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Saf naylon 6 polimerine göre farklı oranlarda (%5, %10 ve %15) grafit katı yağlayıcı içeren kompozitlerin elastiklik modülü sırasıyla %15,7, %13,1 ve %53,5 oranında artarken çekme mukavemeti değerleri ise sırasıyla %1,3, %8 ve %10,6 oranında azalmıştır.

Naylon 6/naylon 6 çifti, naylon 6-5Gr/naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerine ve grafit oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı önemli oranda artmıştır. Naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftinin sürtünme katsayısı naylon 6/naylon 6 çiftine göre yaklaşık %63,8 oranında artmıştır.

Naylon6/naylon6 çifti, naylon 6-5Gr/naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerine ve grafit katkı oranına bağlı olarak aşınma oranı değerlerinde önemli oranda azalma tespit edilmiştir. Naylon 6/naylon 6 çiftine göre naylon6-5Gr/naylon6-5Gr kompozit çiftinde aşınma oranı %30,8, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr kompozit çiftinde aşınma oranı %51,7 ve Naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftinde ise yaklaşık %56,3 oranında azalma tespit edilmiştir.

Özetle, grafit içeren naylon 6 kompozitlerin dişli sistemindeki parçalarda kullanımında katkısız naylon 6'ya alternatif olarak kullanılması önerilirken çalışma ömrü açısından ideal malzeme olarak ifade edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abenojar, J., Martinez, M.A., Velasco, F., Pascual-Sanchez, V., & Martin-Martinez, J.M. (2009). Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin. *The Journal of Adhesion*, 85(4-5), 216–238. <https://doi.org/10.1080/00218460902881782>
- Alajmi, M., Alrashdan, K.R., Alsaed, T., & Shalwan, A. (2020). Tribological characteristics of graphite epoxy composites using adhesive wear experiments. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13671–13681. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.106>
- Ben Difallah, B., Kharrat, M., Dammak, M., & Monteil, G. (2014). Improvement in the tribological performance of polycarbonate via the incorporation of molybdenum di-sulfide particles. *Tribology Transactions*, 57(5), 806-813. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.913751>
- Ben Difallah, B., Kharrat, M., Dammak, M., & Monteil, G. (2012). Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder. *Materials and Design*, 34, 782–787. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.001>
- Chen, Z., Yan, H., Liu, T., Niu, S., & Ma, J. (2015). Improved mechanical and tribological properties of bismaleimide composites by surface-functionalized reduced graphene oxide and MoS<sub>2</sub> coated with cyclo-triphosphazene polymer. *RSC Advances*, 5, 97883–97890. <https://doi.org/10.1039/C5RA19101G>
- Dajana, J., Simon, K., Mitjan, K., Janez, S., Blaz, N., & Miroslav, H. (2022). Effect of expanded graphite on mechanical and tribological properties of Polyamide 6/Glass fibre composites. *Advances in Polymer Technology*, 9974889. <https://doi.org/10.1155/2022/9974889>
- Diez-Pascual, A.M., Naffakh, M., Marco, C., Ellis, G., & Gomez-Fatou, M.A. (2012). High performance nanocomposites based on poly-ether-ketones. *Progress in Materials Science*, 57(7), 1106-1190. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.03.003>
- Gheisari, R., & Polycarpou, A.A. (2019). Tribological performance of graphite-filled polyimide and PTFE composites in oil-lubricated three-body abrasive conditions. *Wear*, 436–437, 203044. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203044>
- Hussam, M., Andrey, A.S., & Victor, V.T. (2022). Effect of graphite filler type on the thermal conductivity and mechanical behavior of Polysulfone-based composites. *Polymers (Basel)*, 14(3), 399. <https://doi.org/10.3390/polym14030399>
- Jitendra, N.P., Jayashree, B., & Raj, K.P. (2019). Optimization of graphite contents in PAEK composites for best combination of performance properties. *Composites Part B*, 174, 106951. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106951>

- Ji-Zhao, L., Qiang, D., Gary C.P.T., & Chak-Yin, T. (2016). Tensile properties of graphene nano-platelets reinforced polypropylene composites. *Composites Part B*, 95, 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.011>
- Katiyar, J.K., Sujeet, K.S., & Arvind K. (2016). Effect of Graphite Concentration on the Tribological and Mechanical Properties of Filled SU-8 Polymer. *Tribology Online*, 11(2), 152-158. <https://doi.org/10.2474/trol.11.152>
- Kumar, S.S., & Kanagaraj, G. (2016). Investigation on mechanical and tribological behaviours of PA6 and graphite-reinforced PA6 polymer composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4347-4357. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2126-2>
- Li, H., Yin, Z., Jiang, D., Jin, L., & Cui, Y. (2015). A study of the tribological behaviour of transfer films of PTFE composites formed under different loads, speeds and morphologies of the counterface. *Wear*, 328-329, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.028>
- Matyas, A. (2018). Influence of graphite additives on mechanical, tribological, fire resistance and electrical properties in polyamide 6. *Technical Gazette*, 25(4), 1014-1019. <https://doi.org/10.17559/TV-20160702212234>
- Mohd. Abdul, R., Sathees K.S., Ch. Nithin, C., & Shaik, S. (2023) Investigation on tribological behaviour of graphite reinforced Nylon 6 polymer composites evaluated by Taguchi method. *AIP Conference Proceedings*, 2548 (1), 030006. <https://doi.org/10.1063/5.0137683>.
- Ömer, Ş., Musa, Ş., & Menderes, K. (2020). Sürdürülebilir üretim için grafit takviyeli Polipropilen kompozit ürünlerin bazı termal ve mekanik özelliklerinin deneysel analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 10-20. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.687111>.
- Piotr, R., Beate, K., & Petra, P. (2019). Characterization of highly filled PP/Graphite composites for adhesive joining in fuel cell applications. *Polymers (Basel)*, 11(3), 462. <https://doi.org/10.3390/polym11030462>
- Raffaele, G. (2016). Tribology of graphite-filled Polystyrene. *Lubricants*, 4(2), 20. <https://doi.org/10.3390/lubricants4020020>
- Reddy, A.C. (2015). Characterization of mechanical and tribological behaviour of (Nylon 6 + Graphite + Teflon) nano particulate composite: Application perspective. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4), 378-386.
- Sudheer, M., Prabhu, R., Raju, K., & Bhat, T. (2014). Effect of filler content on the performance of epoxy/PTW composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 970468. <https://doi.org/10.1155/2014/970468>
- Suresha, B., Chandramohan, G., Renukappa, N.M., & Siddaramaiah, H. (2007). Mechanical and tribological Properties of glass-epoxy composites with and without graphite particulate filler. *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 2472-2480. <https://doi.org/10.1002/app.25413>
- Taha, I., & Abdin, Y.F. (2011). Modeling of strength and stiffness of short randomly oriented glass fiber-polypropylene composites. *Journal of Composite Materials*, 45, 1805-1821. <https://doi.org/10.1177/0021998310389089>
- Unal, H., Kadir E., & Abdullah, M. (2013). Mechanical, electrical and tribological properties of graphite filled polyamide-6 composite materials. *Journal of Polymer Engineering*, 33(4), 351-355. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0043>
- Ünal, H., Yetgin, S.H., & Köse, S. (2023). Tribological performance of polyamide 6/wax blend for rolling bearing, bushing and gear applications. *International Journal of Chemistry and Technology*, 7 (1), 77-83. <https://dx.doi.org/10.32571/ijct.1292871>
- (URL-1) <https://turkish.alibaba.com/product-detail/Differential-nylon-plastic-helical-toothed-gear-60494696137.html>, 20.05.2023.
- (URL-2) <https://turkish.alibaba.com/product-detail/Customized-nylon-gear-parts-for-mechanical-1600178405207.html>, 20.05.2023.
- Vikram, K., Bhaumik, S., & Pramanik, S. (2023). Effect of graphite on tribological and mechanical properties of PA6/5GF composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 3341-3355. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11939-8>



You, Y.L., Li, D. X., Deng, X., Li, W. J., & Xie, Y. (2013). Effect of solid lubricants on tribological behaviour of glass fiber reinforced polyamide 6. *Polymer Composites*, 34(11), 1783–1793. <https://doi.org/10.1002/pc.22582>

Zhou, S., Chiang, S., Xu, J., Du, H., Li, B., Xu, C., & Feiyu, K. (2012). Modeling the in-plane thermal conductivity of a graphite/polymer composite sheet with a very high content of natural flake graphite. *Carbon*, 50(14), 5052–5061. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.06.045>