



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Döküm polyamid (PA6G) ve diğer polimer malzemelerin aşınma ve mekanik özelliklerinin deneysel karşılaştırılması

Experimental comparison of wear and mechanical properties of cast polyamide (PA6G) and other polymer materials

Yazar(lar) (Author(s)): Canset GÜNEŞ ARSLAN¹, Necati YALÇIN², Ramazan ÇITAK³

ORCID¹: 0000-0001-7986-6090

ORCID²: 0000-0002-1878-0979

ORCID³: 0000-0001-7899-8091

To cite to this article: Güneş Arslan C., Yalçın N., and Çıtak R., “Döküm Polyamid (PA6G) ve Diğer Polimer Malzemelerin Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Karşılaştırılması”, *Journal of Polytechnic*, 29(3):290302:1-7 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Abuşka M., Akgül M. B. ve Altıntaş V., “Döküm Polyamid (PA6G) ve Diğer Polimer Malzemelerin Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Karşılaştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 29(3):290302:1-7 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1637530

Döküm Polyamid (PA6G) ve Diğer Polimer Malzemelerin Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Karşılaştırılması

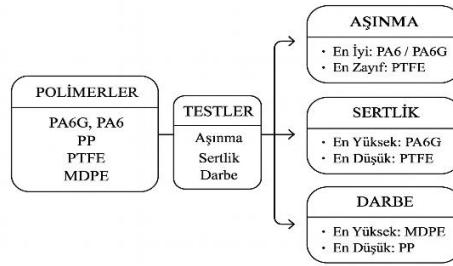
Experimental Comparison of Wear and Mechanical Properties of Cast Polyamide and Other Polymer Materials

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ PA6G ve PA6 en yüksek aşınma direncine sahiptir. / PA6G and PA6 have the highest wear resistance.
- ❖ PP ve PTFE en yüksek aşınma oranlarını göstermiştir. / PP and PTFE showed the highest wear rates.
- ❖ En yüksek sertlik PA6G'de, en düşük ise PTFE'de ölçülmüştür. / The highest hardness was measured in PA6G, and the lowest in PTFE.
- ❖ MDPE en yüksek çentikli darbe dayanımına sahiptir. / MDPE has the highest notched impact strength.
- ❖ Artan yük, aşınma oranlarını artırmıştır. / Increasing load increased the wear rates.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada beş farklı polimerin (PA6G, PA6, PP, PTFE, MDPE) sertlik ve darbe dayanımları ile farklı yükler altındaki aşınma özellikleri incelenmiştir. / In this study, the hardness and impact strength of five different polymers (PA6G, PA6, PP, PTFE, and MDPE) were examined, along with their wear properties under various loads.



Şekil. Deneysel çalışma özeti / Summary of experimental study

Amaç (Aim)

Farklı termoplastiklerin aşınma, sertlik ve darbe dayanımı özelliklerini karşılaştırmak. / To compare the wear, hardness, and impact resistance properties of different thermoplastics.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Pin-on-disk (5, 10, 20 N yük altında) aşınma, Shore D sertlik ve Charpy darbe testleri uygulanmıştır. / Pin-on-disk (under 5, 10, 20 N loads) wear, Shore D hardness, and Charpy impact tests were applied.

Özgünlük (Originality)

Çalışma, farklı polimerlerin aşınma mekanizmalarını, sertlik ve darbe dayanımlarını bütüncül ve karşılaştırmalı olarak incelemektedir. / The study provides a holistic and comparative analysis of the wear mechanisms, hardness, and impact resistance of different polymers.

Bulgular (Findings)

PA6G ve PA6 en yüksek aşınma direncini ve mekanik dayanımı göstermiştir. En yüksek aşınma PP ve PTFE'de görülmüştür. MDPE en iyi çentikli darbe dayanımına sahipken, PA6 ve PA6G çentiksiz testlerde kırılmamıştır. / PA6G and PA6 showed the highest wear resistance and mechanical strength. The highest wear was observed in PP and PTFE. While MDPE had the best notched impact strength, PA6 and PA6G did not break in unnotched tests.

Sonuç (Conclusion)

Aşınma ve mekanik dayanım gerektiren uygulamalar için PA6G ve PA6 en uygunken; PP ve PTFE sadece hafif yük uygulamaları için önerilir. / While PA6G and PA6 are most suitable for applications requiring wear and mechanical strength, PP and PTFE are recommended only for low-load applications.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Döküm Polyamid (PA6G) ve Diğer Polimer Malzemelerin Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Karşılaştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Canset GÜNEŞ ARSLAN¹, Necati YALÇIN¹, Ramazan ÇITAK¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Türkiye
(Geliş/Received : 11.02.2025 ; Kabul/Accepted : 28.04.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 14.10.2025)

ÖZ

Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan termoplastik polimerler, aşınma direnci, darbe dayanımı ve yüzey sertliği gibi mekanik özellikler açısından farklı performanslar sergilemektedir. Bu çalışmada, döküm polyamid (PA6G), polyamid (PA6), Polipropilen (PP), politetrafloroetilen (Teflon, PTFE) ve orta yoğunluklu polietilen (MDPE) malzemelerinin yük altındaki aşınma davranışları, darbe dayanımları ve sertlikleri incelenmiştir. Aşınma deneyleri, pin-on-disk tipi UTS Tribometer T10/20 cihazında, farklı yük seviyeleri (5 N, 10 N, 20 N), 0,85 m/s kayma hızı ve 500 m kayma mesafesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Shore sertlik değerleri, çentikli ve çentiksiz darbe dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, PA6 ve PA6G'nin en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşın, PP ve PTFE tüm yük seviyelerinde en yüksek aşınma oranlarını sergilemiştir. Artan yükte birlikte tüm polimerlerde aşınma oranlarının arttığı bulunmuştur. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi sonucunda, PA6G en yüksek sertlik değerine (85 Shore D), PTFE ise en düşük sertlik değerine (55 Shore D) sahip olmuştur. Darbe dayanımı testlerinde, MDPE çentikli testlerde en yüksek enerjiyi absorbe ederken, PA6 ve PA6G çentiksiz testlerde kırılma göstermemiştir. Bu çalışma, PA6G ve PA6'nın aşınma direnci, sertlik ve darbe dayanımı açısından diğer polimerlere kıyasla üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, PP ve PTFE'nin daha düşük mekanik dayanımları nedeniyle hafif yük taşıma uygulamaları için daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimerler, aşınma direnci, tribolojik özellikler, darbe dayanımı, sertlik.

Experimental Comparison of Wear and Mechanical Properties of Cast Polyamide (PA6G) and Other Polymer Materials

ABSTRACT

Thermoplastic polymers, which are widely used in engineering applications, exhibit varying performance in terms of wear resistance, impact strength, and surface hardness. This study investigates the wear behavior of cast polyamide (PA6G), polyamide (PA6), polypropylene (PP), polytetrafluoroethylene (Teflon, PTFE), and medium density polyethylene (MDPE) under applied loads, as well as impact resistance and hardness. The experiments were conducted using a pin-on-disk type UTS Tribometer T10/20, applying different load levels (5 N, 10 N, 20 N), a sliding speed of 0.85 m/s, and a sliding distance of 500 m. Shore hardness values, notched and un-notched impact strengths were determined. The findings indicate that PA6 and PA6G demonstrated the highest wear resistance, while PP and PTFE exhibited the highest wear rates at all load levels. It was determined that the wear rate increased with increasing load for all polymers. In terms of mechanical properties, PA6G had the highest hardness value (85 Shore D), whereas PTFE had the lowest hardness (55 Shore D). Impact test revealed that MDPE absorbed the highest energy, while PA6 and PA6G remained unbroken in un-notched tests. This study highlights that PA6G and PA6 outperform the other polymers in terms of resistance, hardness, and impact strength. In contrast, PP and PTFE, due to their lower mechanical strength, are considered more suitable for low-load-bearing applications.

Keywords: Polymers, wear resistance, tribological properties, impact strength, hardness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimer malzemeler, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda düşük maliyet, hafiflik, kimyasal direnç ve iyi mekanik özelliklere sahip olma avantajları nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir [1]. Günümüzde, polimerlerin hareketli ve beraber çalışan sistemlerde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu ortamlarda çalışacak malzemenin doğru seçimi; istenilen performans, dayanım ve işlevsellik açısından kritik bir faktör haline gelmektedir [2]. Sürtünme ve aşınma, özellikle hareketli mekanik parçaların çalışma ömrünü

etkileyen temel faktörler arasında yer alır. Polimerlerin aşınma direnci, sürtünme katsayısı, yüzey sertliği, darbe dayanımı ve ortam koşulları gibi özellikler kullanım süresini önemli bir şekilde etkilemektedir [1,3,4].

Endüstriyel uygulamalarda Polyamid (PA6) ve Döküm Polyamid (PA6G), Polipropilen (PP), Politetrafloroetilen (PTFE/Teflon), Orta Yoğunluklu Polietilen (MDPE) hareketli parçalarda kullanılan en önemli polimerlerdir. Mühendislik uygulamalarında PA6G yüksek aşınma direnci ve mekanik dayanımı ile PP ise, ekonomik oluşundan dolayı tercih edilmektedir [1,5]. Ancak PP'nin

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : canset.gunes@gmail.com

aşınma direnci ve darbe dayanımı, diğer polimerlere göre daha sınırlıdır [5]. PTFE düşük sürtünme katsayısı ve iyi bir kimyasal dirence sahip olmasına rağmen, yük altındaki aşınma direnci açısından zayıf bir performans sergiler [3, 6]. MDPE ise dengeli darbe dayanımı ve aşınma direnci ile geniş bir uygulama alanına sahiptir [7,8].

Farklı polimerlerin aşınma davranışları üzerine mühendislik uygulamalarında nasıl kullanılabileceğini anlamamıza yardımcı olacak pek çok çalışma bulunmaktadır. Ünal ve Mımaroğlu, PA6 ile grafit ve waks katkılı PA6 kompozitlerinin kuru kayma koşullarındaki aşınma ve sürtünme performanslarını incelemiştir. Sonuçlara göre, grafit katkısı sürtünme katsayısını ve aşınma oranını önemli ölçüde azaltırken, waks katkısı aşınma direncini artırmış ancak sürtünme katsayısını grafit kadar düşürmemiştir [9]. Koç, farklı mühendislik plastiklerinin aşınma davranışlarını pim-disk aşınma deney cihazı kullanarak araştırmış, PA6G'nin sürtünme katsayısının artan yüklerle yükseldiğini belirlemiştir [10]. Turgut'un çalışması, PA6 ve PA6G malzemelerinin aşınma dayanımını karşılaştırmış ve PA6G'nin, metallerle sürtünerek çalışma koşullarında bile yüksek aşınma direncine sahip olduğunu ortaya koymuştur [11]. Schmidt ve ekibi, saf ve yağ katkılı PA6G'nin sürtünme, aşınma ve transfer özelliklerini farklı test ölçeklerinde değerlendirmiştir. Çalışmada, yağ katkılı poliamidlerin aşınma ve sürtünme performansının belirgin şekilde iyileştiği görülmüştür [12]. Uzuner ve Uçar, polimer malzemelerin aşınma özelliklerini incelemiş ve döküm poliamidin aşınma oranının hız arttıkça azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca, poliamid 66'nın aşınma oranının hızla birlikte yükseldiği, teflonun ise en düşük aşınma oranına sahip olduğu belirlenmiştir [13]. Korku ve arkadaşları, cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin aşınma davranışları üzerindeki çevresel etkileri inceleyerek, nem ve sıcaklık gibi faktörlerin aşınma direncini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Özellikle yüksek nem koşullarında malzemelerin aşınma oranlarının arttığı tespit edilmiştir [14]. Can ve Tan, saf, kendinden yağlamalı ve ısıya dayanıklı döküm poliamid malzemelerin tribolojik özelliklerini değerlendirmiştir. Kendinden yağlamalı poliamidin sürtünme katsayısını azalttığı, ısıya dayanıklı poliamidin ise yüksek sıcaklıklarda aşınma direncini artırdığı görülmüştür [15]. Mımaroğlu ve arkadaşları, kuru çalışma koşulları altında PA6 ve PA6 kompozitlerinin aşındırıcı aşınma

davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, farklı yük ve kayma mesafeleri için aşınma hacmi haritaları oluşturularak malzemelerin aşınma performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PA6 kompozitlerinin saf PA6'ya kıyasla daha düşük aşınma hacmine sahip olduğunu ve dolgu malzemelerinin aşınma direncini artırdığını göstermiştir [16]. Yapılan çalışmalarda polimerlerin farklı kullanım yerlerinde özellikle aşındırıcı ortamlardaki pek çok değişken (yük, hız ve kayma mesafesi) birlikte değerlendirilmemiştir. Bu sebeple çalışmada PA6G'in aşınma direnci, darbe dayanımı ve yüzey sertliği gibi özellikleri diğer termoplastiklerle karşılaştırılmış ve bu polimerlerin yük altındaki aşınma davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada PA6G ve diğer termoplastik polimerlerin (PA6, PP, PTFE ve MDPE) mekanik ve aşınma özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, aşındırıcı ortamlarda doğru malzeme seçiminde rehberlik edecek bilgileri tespit etmeyi amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, farklı amaçlar için kullanılan ticari polimer malzemeler (PA6G, PA6, PP, PTFE, MDPE) deneysel olarak incelenmiş ve bu malzemelerin aşınma direnci, darbe dayanımı ve yüzey sertlikleri üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Tüm polimerler ticari olarak piyasadan temin edilmiş ve üreticilerin vermiş olduğu teknik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Malzemelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu için aşınma, darbe dayanımı ve Shore D Sertlik testleri oda koşullarında gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılacak deney numuneleri 45 mm çapında silindirik polimer malzemeden hazırlanmıştır. Deney numuneleri alınan yerleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Polimer malzemelerden alınan test numuneleri (Test specimens from the polymer materials)

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan termoplastik malzemelerin bazı teknik özellikleri (Some technical properties of the thermoplastic materials used in the study)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Shore D)	Darbe Direnci (kJ/m ²)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sürtünme Katsayısı
PA6G	1,15	85-90	5-10	80-100	0.15-0.42
PA	1.13-1.15	85-90	5-15	70-90	0.15-0.42
PP	0.90-0.92	60-70	20-50	30-40	0.30-0.40
PTFE	2.1-2.3	50-60	2-5	20-35	0.04-0.10
MDPE	0.926-0.94	57-65	15-25	15-25	0.10-0.20

2.1. Aşınma Testleri

Polimerlerin aşınma performanslarını değerlendirmek amacıyla, pin-on-disk tipi bir Universal sürtünme aşınma test sistemi olan UTS marka Tribometer T10/20 kullanılmıştır. Aşınma numunesi 10 mm çapında ve 14 mm boyunda hazırlanmıştır. Abrasif aşındırıcı olarak 100 mesh zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Aşınma test süreci sırasıyla 5 N, 10 N ve 20 N yükler altında gerçekleştirilmiştir. Kayma hızı olarak 0,85 m/s olarak belirlenmiştir. Her bir yük için test süresi, 500 m kayma mesafesine karşılık gelecek şekilde 9,8 dakika olarak uygulanmıştır.

Aşınma miktarları, test sonrası numunelerdeki kütle kaybı olarak hesaplanmıştır. Test öncesinde ve sonrasında, her bir numunenin ağırlığı 0,0001 g hassasiyetli terazide ölçülmüştür. Aşınma miktarı bağıntı (1)'de verilen aşınma yüzdesi formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Aşınma} = \frac{[(\text{Başlangıç ağırlığı} - \text{Son ağırlık}) / \text{Başlangıç ağırlığı}] \times 100}{(1)}$$

Test sürecinde, kayma hızı, zımpara tipi, test süresi ve yükleme parametreleri sabit tutulmuştur. Her test için aynı özelliklerde yeni bir zımpara kullanılmıştır. Her bir yük için üç numune test edilmiştir. Aşınma yüzeyleri stereo mikroskop ile incelenmiştir. Polimer malzemelerin aşınma direncini ortaya koyan veriler elde edilmiş ve aşınma değerleri karşılaştırılmıştır.

2.2. Shore D Sertlik Testleri

Polimer malzemelerin sertlikleri, yüzey dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla TS EN ISO 868: "Plastik ve Sert Kauçuk Malzemeler- Sertliğin Durometre (Shore Sertliği) Yöntemi ile Tayini" standardına [17] uygun olarak Shore D sertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri 4x20x40 mm numuneler üzerinden alınmıştır. Bu ölçümler standarda uygun olarak oda sıcaklığında, düz bir zemin üzerine sabitlenen numunelere ölçüm ucu darbesiz olarak batırılıp 3 saniye bekletilmiş ve değerler okunarak veriler elde edilmiştir. Her bir malzeme için farklı noktalardan beş ölçüm yapılmış ve ortalama değerler kaydedilmiştir. ve gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Kurulan deney düzeneği Şekil 2.'de gösterilmiştir.

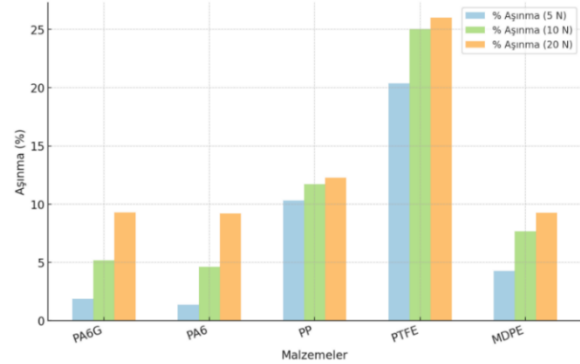


Şekil 2. Charpy darbe test numunesi ölçüleri (Charpy impact test specimen dimensions)

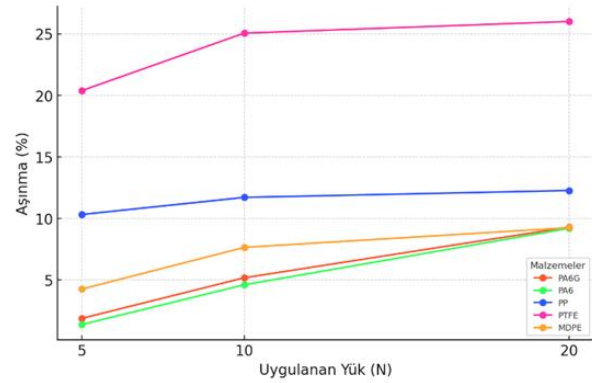
3. BULGULAR (RESULTS)

3.1 Aşınma

Polimerlerin yük seviyelerine göre % aşınma oranları Şekil 3 ve polimer cinsine göre aşınma oranları Şekil 4'teki grafiklerde verilmiştir.

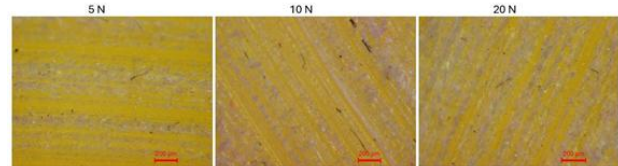


Şekil 3. Yük seviyelerine göre polimerlerin aşınma oranları (Wear rates of polymers according to load levels)



Şekil 4. Polimer cinsine göre aşınma oranları (Wear rates according to polymer type)

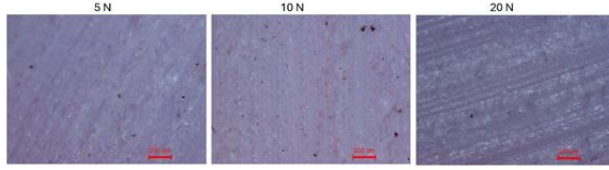
Çalışmada döküm yoluyla elde edilen PA6G'nin aşınma oranı, 5N yükte %1,88, 10N yükte %5,18 ve 20N yükte %9,3 olarak belirlenmiştir. Grafiklerde artan yüke bağlı olarak aşınma oranının arttığı görülmektedir. Yüksek yüklerde (20N), aşınan parçacıklar yüzeyde birikerek aşındırıcı bir etki oluşturur ve aşınma oranı hızla yükselir. PA6G'ye ait aşınma yüzey görüntüleri Resim 1'de gösterilmiştir. Aşınan yüzey görüntülerinde de anlaşıldığı üzere artan yük miktarıyla aşınma çizgileri daha ince ve belirgin olarak ortaya çıkmıştır.



Resim 1. PA6G numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri (Macro images of PA6G specimens after the wear test)

PA6'nın aşınma oranı, 5N yükte %1,38, 10N yükte %4,61 ve 20N yükte %9,2 olmuştur. Artan yük artışına bağlı olarak PA6'nın aşınma oranı belirgin şekilde artmıştır.

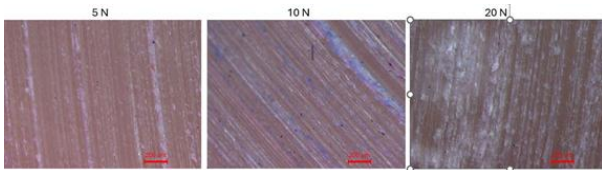
tespit edilmiştir. Resim 2’de PA6 numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri paylaşılmıştır.



Resim 2. PA6 numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri (Macro images of PA6 specimens after the wear test)

Aşınma testi sonrası numune makro yüzey görüntülerinde her üç yük değeri içinde numune yüzeyinde ince aşınma çizgilerinin olduğu görülmektedir. PA6 polyamid düşük yüklerde PA6G’ye kıyasla daha düşük aşınma oranı (%1,38) ile üstün performans göstermiştir. Bu fark, PA6’nın daha yüksek elastikiyet modülüne ve esnek yapıya sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir [20]. Esnek yapısı sayesinde düşük yüklerde deformasyona karşı daha dirençlidir. 20 N yük seviyesinde PA6 ve PA6G arasındaki fark oldukça küçüktür. Bu, iki malzemenin de kristalinite oranları PA6 için % 40-50 PA6G için ise % 50-60 [1,7] Sertlikleri de nispeten birbirlerine yakındır. Bu nedenle benzer aşınma sonuçları vermiştir. Bu sonuçlar yüksek mekanik dayanımı ile ilişkilendirilebilir [7].

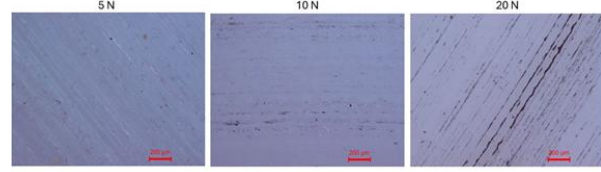
PP’in aşınma oranı, 5N yükte %10,32, 10N yükte %11,71 ve 20N yükte %12,27 olmuştur. Resim 3’te PP numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri gösterilmiştir. PP, düşük sertliği ve düşük mekanik dayanımı nedeniyle tüm yük seviyelerinde daha yüksek aşınma oranları göstermiştir. PP’nin sertliği Şekil 5’te görüldüğü üzere PA6 ve PA6G’ye nazaran daha düşüktür. Düşük sertlikten dolayı PP’nin aşınma oranları arttığı düşünülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin düşük mukavemet ve sertlik, aşınma oranlarını artıran faktörlerdir [20].



Resim 3. PP numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri (Macro images of PA6G specimens after the wear test)

PTFE’nin aşınma oranı, 5N yükte %20,38, 10N yükte %25,05 ve 20N yükte %26 olmuştur. Resim 4’te Politetrafloroetilen numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri gösterilmiştir.

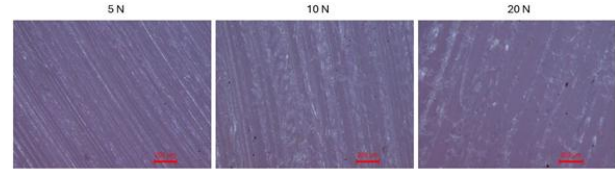
PTFE’nin düşük sürtünme katsayısına rağmen düşük sertlik, çok düşük kristalinite değeri yük altında plastik akma göstermesi, diğer polimerle nazaran aşınmanın artmasına neden olmuştur [20-21].



Resim 4. PTFE numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri (Macro images of PTFE specimens after the wear test)

PTFE’nin düşük sertliği ve düşük mukavemetinden dolayı abrasif aşınmada yüksek yükler altında aşındırıcı yüzeylere tutunan parçacıkların yüzeyde daha büyük oyuklar açmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

MDPE’in aşınma oranı, 5N yükte %4,26, 10N yükte %7,65 ve 20N yükte %9,25 olmuştur. Resim 5’te MDPE numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri paylaşılmıştır.



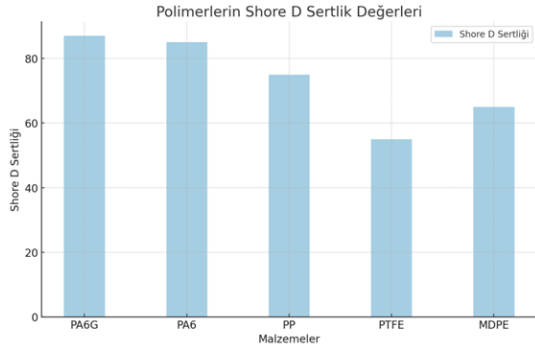
Resim 5. MDPE numunelerinin aşınma testi sonrası makro görüntüleri (Macro images of MDPE specimens after the wear test)

MDPE çalışmada kullanılan diğer polimerlere göre nispeten düşük yoğunluk ve düşük rijit bir yapıya sahiptir [22]. Bu yoğunluk ve esnek yapı düşük yüklerde daha yüksek aşınmaya neden olduğu düşünülmektedir. Yük arttıkça aşınma oranı PA6G’ye yakın değerler vermiştir [23, 24]. Yüksek yüklerde parçalar koparak aşındırıcı yüzeylere yapışmasından dolayı abrasif aşınmanın adhesive dönüşüğü ve aşınma oranını düşürdüğü değerlendirilmiştir.

PA6G ve PA6, aşınma direnci açısından diğer polimerlerle mukayese edildiğinde daha üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Literatürde, polyamid malzemelerinin yüksek kristalin yapı ve yüzey dayanımı (sertlik) sayesinde düşük aşınma oranları gösterdiği belirtilmiştir [25]. PTFE çok düşük kristalinite değerine ve düşük sertliğe sahiptir [16]. Dolayısıyla düşük aşınma direnci göstermesi bu parametrelere bağlanabilir. PP yüksek kristaliniteye sahip olmakla birlikte düşük sertlik gösteren bir polimerdir. Bu nedenle polyamide nazaran düşük, teflona göre ise yüksek aşınma dirençleri göstermiştir. MDPE ise düşük yüklerde nispeten düşük aşınma direnci gösterirken, bu zayıf özelliğin yüksek yük altında aşınmanın adhesive dönüşmesi ile hafifçe iyileştiği bulunmuştur.

3.2 Shore D Sertlik Testleri

Çalışmada kullanılan polimerlerin Shore D sertlik değerleri Şekil 5’te grafiksel olarak gösterilmiştir.

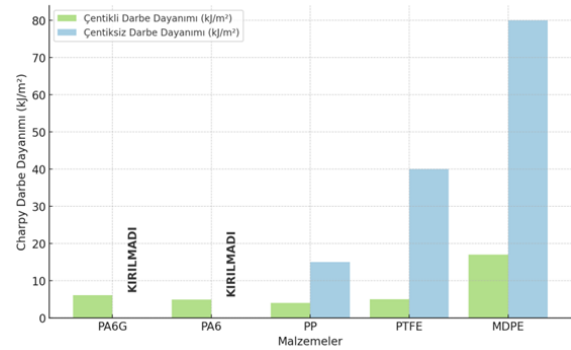


Şekil 5. Polimerlerin sertlik değerleri (Hardness values of polymers)

Polimerlerin sertlikleri, moleküler yapısı, kristal oranı, kullanılan katkı maddeleri ve üretim süreçleri gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, PA6 ve PA6-G'nin yüksek sertliği, kristalin yapı oranlarının yüksek olmasına bağlanabilirken, PTFE'nin düşük sertliği kimyasal yapısındaki esneklik sağlayan bağlarla açıklanabilir [19,25]. PP ve MDPE gibi malzemelerde ise düşük yoğunluk ve yarı-kristalin yapı sertliği düşüren faktörlerdir [26-27]. Shore D sertlik değerleri, PA6G için 87, PA6 için 85, PP için 75, PTFE için 55 ve MDPE için 65 olarak ölçülmüştür. PA6G, en yüksek sertlik değerine sahip polimer malzeme olarak dikkat çekmektedir. Bu durum, PA6G'nin üretim sürecinde uygulanan kristalizasyon teknikleri ve yoğunluğunun artırılmasıyla ilişkili olabilir. PA6, PA6G'ye çok yakın bir sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Aralarındaki küçük fark, PA6G'nin döküm süreci sırasında daha homojen bir yapı kazanmasıyla açıklanabilir. Her iki malzeme de yüksek kristalin yapıya sahip olduğundan, sertlik açısından mühendislik uygulamaları için uygundur. PP, Shore D sertlik değeri açısından PA6G' den belirgin şekilde daha düşük bir değer olan 75'i göstermiştir. Bu durum, PP'nin moleküler yapısındaki zayıf Van der Waals bağlarının malzemenin düşük sertlik göstermesine neden olmasıyla açıklanabilir [28]. Ayrıca PP düşük yoğunluğu ve yarı-kristalin yapısı, yüzey dayanımını sınırlandıran faktörler arasında yer alır. Bu nedenle PP, yüzey dayanımının kritik olmadığı, hafif yük uygulamaları için uygun bir malzeme olarak değerlendirilebilir. PTFE, Shore D sertliği 55 ile en düşük sertlik değerini göstermiştir. Bu fark, PTFE'nin kimyasal yapısındaki karbon-flor bağlarının malzemeyi oldukça esnek hale getirmesiyle açıklanabilir. Flor atomlarının büyük boyutu, moleküller arası bağları zayıflatarak düşük sertlik ve yüzey dayanımıyla sonuçlanır [29]. MDPE, Shore D sertlik değeri 65 ile orta düzeyde bir yüzey dayanımı göstermiştir. MDPE'nin bu özelliği, moleküler yapısındaki düşük yoğunluklu zincirlerin ve esnek bağların bir sonucu olarak değerlendirilebilir [27].

3.3 Charpy Darbe Testleri

Polimer malzemelerin darbe dayanım değerleri grafiksel olarak Şekil 6'de paylaşılmıştır.



Şekil 6. Polimerlerin darbe dayanımı değerleri (Impact strength values of polymers)

Darbe dayanımı testlerinde PA6G için çentikli darbe dayanımı 5,6 kJ/m² olarak ölçülmüştür. PA6G çentiksiz numune testinde ise kırılma gerçekleşmemiştir. PA6 çentikli numunenin Charpy darbe dayanımı 4,9kJ/m² bulunurken, çentiksiz numunede ise kırılma oluşmamıştır. Her iki polyamid malzeme de çentiksiz durumda yüksek darbe dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak çentikli PA6G'nin polimerin darbe dayanımının PA6'ya kıyasla biraz daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu fark, PA6G'nin döküm sırasında daha homojen bir yapıya sahip olması ve dolayısıyla enerji absorpsiyon kapasitesinin artmasıyla açıklanabilir [30]. Literatürde her iki malzeme için de çentiksiz deney numunelerinde test sırasında kırılma oluşmadığı rapor edilmiştir, bu da bu polimerlerin sünek davranışını desteklemektedir [31-32].

PP için çentikli Charpy darbe dayanımı 4 kJ/m², çentiksiz darbe dayanımı ise 15 kJ/m² olarak ölçülmüştür. Çentikli darbe dayanımı, PA6G'ye kıyasla oldukça düşüktür. Bu durum PP'nin düşük yoğunluklu yapısı ve zayıf moleküler bağlarına bağlanabilir. Çentiksiz durumda 15kJ/m²'lik değer, PP'nin darbe enerjisini absorbe etme kapasitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Ancak, PP'nin ani darbelere karşı kırılma yapısı, çentikli testlerdeki düşük dayanım değerleriyle örtüşmektedir.

PTFE için çentikli Charpy darbe dayanımı 5 kJ/m², çentiksiz darbe dayanımı ise 40 kJ/m² olarak ölçülmüştür. Çentikli durumda PTFE, PA6G'ye yakın bir enerji absorbe edebilme performansı göstermiştir. Ancak çentiksiz durumda çok daha yüksek bir darbe dayanımı sergilemiştir. Bu fark, PTFE'nin düşük sertliğine rağmen sünek yapısının darbe enerjisini dağıtma kapasitesinin yüksek olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, PTFE'nin kimyasal yapısı malzemeye esneklik kazandırarak darbe altında ani kırılmaları önler.

MDPE için çentikli Charpy darbe dayanımı 17 kJ/m², çentiksiz darbe dayanımı ise 80 kJ/m² olarak ölçülmüştür. Çentikli darbe dayanımı, PA6G'den belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, MDPE'nin daha esnek yapısı ve düşük yoğunluğunun darbe enerjisini absorbe etmede etkili olmasıyla açıklanabilir.

Test sonuçları, PA6G polimerin çentikli darbe dayanımında üstün bir performans sergilerken, çentiksiz durumda tüm polimerlerin yüksek dayanım gösterdiğini ortaya koymaktadır. PTFE ve MDPE, çentiksiz testlerde daha yüksek enerji absorpsiyonu sergilerken, PP çentikli testlerde kırılma davranış sergilemiştir. Polimerler arasındaki bu farklılıklar, malzeme yapısındaki yoğunluk, esneklik ve moleküler bağ yapısına bağlı olarak açıklanabilir. Bu sonuçlar, darbe dayanımının önemli olduğu uygulamalarda malzeme seçimi yapılırken dikkate alınmalıdır.

4. SONUÇLAR(CONCLUSION)

Bu çalışmada farklı polimerlerin abrasiv aşındırıcı ortamdaki performansını karşılaştırarak endüstriyel uygulamalar için uygun ve doğru malzeme seçimi için rehber oluşturulması hedeflenmiştir. Farklı polimerlere uygulanan aşınma, sertlik ve darbe testi verilerine bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm yük seviyelerinde en düşük aşınma oranı PA6'da elde edilirken, PA6G benzer bir aşınma direnci sergilemiştir. En yüksek aşınma oranı ise PTFE polimerde ölçülmüştür.
- Numunelerin aşınma oranları değerlendirildiğinde artan yükte birlikte en az değişim PP'de %19, en fazla değişim ise yaklaşık 5 kat olarak PA6'da bulunmuştur.
- En yüksek sertlik PA6G'de elde edilirken, en düşük sertlik PTFE'de elde edilmiştir. PA6 ile PA6G polimerlerin sertlikleri birbirlerine yakın değerlerde bulunmuştur.
- Darbe testinde çentikli numunede en yüksek darbe emme enerjisi MDPE'de 17 kJ/m², en düşük darbe dayanımı ise PP'de 4 kJ/m² olarak tespit edilmiştir. Çentiksiz PA6 ve PA6G deney numunelerinde kırılma oluşmazken diğer polimerlerde kırılma meydana gelmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi FDK-2023-8670 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Canset GÜNEŞ ARSLAN: Deneyleri yapmış, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Necati YALÇIN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ramazan ÇITAK: Sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hutchings, I. M. "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials." *Butterworth-Heinemann*, 287–293. (2016).
- [2] Sinha, S. K., & Briscoe, B. J. "Polymer tribology." Imperial College Press, 112–114, 245–247. (2009).
- [3] Bahadur, S., & Tabor, D. "The Wear of Polymers." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1728), 307–324. (1985).
- [4] Myshkin, N. K., & Kovalev, A. "Tribology of Polymers: Adhesion, Friction, and Wear." *Journal of Friction and Wear*, 23(2), 144–154. (2002).
- [5] Tjong, S. C. "Tribological and Mechanical Properties of Polymer Composites Reinforced with Nanoparticles." *Advanced Materials*, 18(15), 1855–1872. (2006).
- [6] Krick, B. A., & Sawyer, W. G. "Friction and Wear of Polytetrafluoroethylene (PTFE): Influence of Environmental Conditions." *Tribology Letters*, 45(3), 479–487. (2012).
- [7] Miller, R. G., & Spencer, N. D. "Polymer Wear in Tribological Applications." *Wear*, 190(1), 58–65. (1995).
- [8] Hanchek, C., & White, J. L. "Wear and Frictional Properties of Polyethylene and Polypropylene." *Polymer Engineering and Science*, 32(14), 1000–1010. (1992).
- [9] Unal, H., & Mimaroglu, A. "Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions." *Wear*, 257(9–10), 941–951. (2004).
- [10] Koç, R. "PA6, PA6G, POM, PEEK ve PET mühendislik plastiklerinin aşınma davranışlarının incelenmesi." [Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi]. (2005).
- [11] Turgut, D. "Poliamid 6 ve döküm poliamid 6 malzemelerinin aşınma mukavemetlerinin karşılaştırılması." [Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi]. (2015).
- [12] Schmidt, M., & Karl-Heinz, G. "Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales." *Wear*, 237(1), 5–12. (2000).
- [13] Uzuner, H., & Uçar, V. "Polimer malzemelerin aşınma özelliklerinin incelenmesi." *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 27–40. (2001).
- [14] Korku, M., Feyzullahoğlu, E., & İlhan, R. "Farklı Türlerde Polyester ve Çekme Katkısı İçeren Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerde Çevresel Koşulların Aşınma Davranışlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi." *Politeknik Dergisi*, 27(1), 197–209. (2024).
- [15] Can, H., & Tan, E. "Investigation of tribological behaviors of pure, self-lubricating and heat-resistant cast polyamide materials." *European International Journal of Science and Technology*, 7(4), 1–8. (2018).

- [16] Mimaroglu, A., Sen, U., & Unal, H. "Abrasive wear volume maps for PA6 and PA6 composites under dry working condition." *Applied Composite Materials*, 15(1), 13–25. (2008).
- [17] Çetinel, H. "Polietilen ve polipropilenin mekanik özelliklerinin incelenmesi." *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(3), 79–87. (2000).
- [18] Türk Standartları Enstitüsü (TSE). "TS EN ISO 179-1: Plastiklerin Charpy Darbe Özelliklerinin Belirlenmesi-Bölüm 1: Darbe Dayanımı Test Metodu." Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. (2023).
- [19] Türk Standartları Enstitüsü (TSE). "TS EN ISO 868: Plastik ve Sert Kauçuk Malzemeler- Sertliğin Durometre (Shore Sertliği) Yöntemi ile Tayini." *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara. (2006).
- [20] Liu, Y., Jiang, S., Yan, W., Qin, J., He, M., Qin, S., & Yu, J. "Enhanced mechanical and thermal properties of polyamide 6/p (N-(4-F-phenylmaleimide)-alt-styrene) composites based on interfacial complexation inducing crystal transformation." *Polymer*, 214, 123237. (2021).
- [21] Şengül, Ö., Şeremet, M., & Kam, M. "Sürdürülebilir üretim için grafit takviyeli polipropilen kompozit ürünlerin bazı termal ve mekanik özelliklerinin deneysel analizi." *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 10–20. (2020).
- [22] Taşdemir, M., & Ulutaş, E. "Polipropilen/üre formaldehit polimer karışımının fiziksel özelliklerinin incelenmesi." *UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 36–48. (2023).
- [23] Friedrich, J., & Schlarb, A. K. "Tribology and wear of polymer-based composites." (2nd ed.). *Wiley-VCH*, 156–160. (2014).
- [24] Callister, W. D. "Materials science and engineering: An introduction." (7th ed.). *Wiley*, 152–153. (2007).
- [25] Yetgin, S. H., Türkmen, E., & Güleşen, M. "Cam Elyaf ve Kauçuk Katkılı PA6 Polimerinin Özelliklerinin İncelenmesi." *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 15–23. (2017).
- [26] Odrobina, M., Deák, T., Székely, L., Mankovits, T., Keresztes, R. Z., & Kalácska, G. "The effect of crystallinity on the toughness of cast polyamide 6 rods with different diameters." *Polymers*, 12(2), 293. (2020).
- [27] Maddah, H. A. "Polypropylene as a promising plastic: A review." *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. (2016).
- [28] Zhu, T., Li, X., Zhao, X., Zhang, X., Lu, Y., & Zhang, L. "Stress-strain behavior and corresponding crystalline structures of four types of polyethylene under a wide range of strain rates." *Polymer Testing*, 106, 107460. (2022).
- [29] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. "The physical basis of Young's modulus." In *Engineering Materials 1: An introduction to properties, applications and design* (4th ed., pp. 83–93). *Elsevier*. (2012).
- [30] Ma, L., Jia, W., Hou, K., Yang, Y., Li, Z., Yang, S., & Wang, J. "Similar chemical composition with different tribological properties: Influences of C–F bond strength and carbon-skeleton structure on fluorinated graphene and PTFE." *Tribology International*, 165, 107250. (2022).
- [31] Li, C., Xiang, M., & Ye, L. "Structure and tribological performance of monomer casting nylon-6/colloidal graphite composites synthesized through in situ polymerization." *Polymer - Plastics Technology Engineering*, 56(12), 1345–1357. (2017).
- [32] Yılmaz, İ. "Bor mineral atığı katkılı polipropilen kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarının incelenmesi." [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. (2019).
- [33] Sharvesh, R., Babu, M., & Soundararajan, R. "Appraisal of mechanical and tribological behavior of polyamide 6 with carbon fibre-filled composites fabricated through fused deposition modeling." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. (2024).