



## Investigation of wear behavior of PA 12 matrix ceramic reinforced composites produced by selective laser sintering method

Burçin Özbay Kısasöz<sup>1\*</sup>, İbrahim Tütük<sup>1</sup>, Ebubekir Koç<sup>1,2</sup>, Sencer Süreyya Karabeyoğlu<sup>3</sup>, Alptekin Kısasöz<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ALUTEAM, Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, 34445, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Biomedical Engineering, Fatih Sultan Mehmet Vakıf University, 34445, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Kırklareli University, 39100, Kırklareli, Türkiye

<sup>4</sup>Department of Metallurgical And Materials Engineering, Yıldız Technical University, 34210, İstanbul, Türkiye

### Highlights:

- Composite production by selective laser sintering additive manufacturing method
- The effect of energy density change in the SLS method
- Wear resistance of ceramic reinforced polyamide 12 composites

### Keywords:

- Polymer composites
- Selective laser sintering
- Wear behaviour

### Article Info:

Research Article

Received:29.11.2022

Accepted: 27.05.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1207967

### Correspondence:

Author: Burçin Özbay

Kısasöz

e-mail:

burcinozbay@gmail.com

phone: +90 212 521 8100 /

4373

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, ceramic-reinforced PA 12 matrix composites were fabricated by using Selective Laser Sintering (SLS) additive manufacturing method with different energy density values. Additionally, dry sliding wear tests were performed at 25 mm/sec and 100 mm/sec velocity values and at 5 N and 20 N wear load values. In conclusion with the tests, it was found that when energy density increases the wear rate increases. The wear rate values are given in Table A.

**Table A.** Samples' codes, SLS production parameters and wear rate values

Sample	Laser Power (W)	Laser Scan Speed (mm·s <sup>-1</sup> )	Energy Density (J·mm <sup>-3</sup> )	Wear Rate (10 <sup>-7</sup> ·mm <sup>3</sup> ·(N·mm) <sup>-1</sup> )			
				25 mm·s <sup>-1</sup> sliding speed		100 mm·s <sup>-1</sup> sliding speed	
				5 N test load	20 N test load	5 N test load	20 N test load
PA 12	21	2500	0.336	1.90	3.90	1.81	2.14
PA 12/W75-1	21	2100	0.400	1.61	2.81	1.32	1.72
PA 12/W75-2	21	1675	0.500	1.80	3.03	1.51	1.84

### Purpose:

The aim of the study was to produce ceramic microsphere-reinforced composite materials and to investigate the tribological behavior of unfilled and filled PA 12 materials in a dry-wear environment.

### Theory and Methods:

Ceramic microspheres were added to the matrix material at a rate of 20% by weight and dry mixing was done by a rotating drum. SLS additive manufacturing was done with various laser parameters. The laser parameters used in the productions are given in Table A.

### Results:

The increase in the energy density value during the production of the composite material with the SLS method adversely affected the properties of the PA 12 matrix material, and the structural integrity of the composite material was impaired, a damaged wear surface was obtained, and the wear resistance decreased. As can be seen in the wear behavior of PA 12, increased test load increased the interaction between abrasive and material, resulting in a higher wear rate.

### Conclusion:

In this study, composite materials with PA 12 matrix W75 ceramic-based microspheres reinforced with thermal resistance were produced using different energy density values. In general, it was determined that the increase in the wear load also decreased the wear resistance. In addition, increasing the energy density value in the production of composite materials by the SLS method affected the wear resistance negatively and a higher wear resistance was obtained in PA 12/W75-1 composite material.



## Seçici lazer sinterleme yöntemiyle üretilen PA 12 matrisli seramik takviyeli kompozitlerin aşınma davranışının incelenmesi

Burçin Özbay Kısasöz<sup>1\*</sup>, İbrahim Tütük<sup>1</sup>, Ebubekir Koç<sup>1,2</sup>, Sencer Süreyya Karabeyoğlu<sup>3</sup>, Alptekin Kısasöz<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, ALUTEAM, 34445, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 34445, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup>Kırklareli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 39100, Kırklareli, Türkiye

<sup>4</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34210, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Seçici lazer sinterleme eklemeli imalat yöntemiyle kompozit üretimi
- SLS yönteminde enerji değişiminin etkisi
- Seramik katkı poliamid 12 kompozitlerin aşınma dayanımı

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.11.2022

Kabul: 27.05.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1207967

#### Anahtar Kelimeler:

Polimer kompozitler,  
seçici lazer sinterleme,  
aşınma davranışı

#### ÖZ

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi kullanılarak seramik takviyeli PA 12 matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve kompozit malzemelerin aşınma davranışları incelenmiştir. Kompozit malzemelerin SLS ile üretilmesinde iki farklı enerji yoğunluğu değeri kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemelere kuru aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma testleri 25 mm/sn ve 100 mm/sn hız değerlerinde ve 5 N ile 20 N aşınma yükü değerlerinde uygulanmıştır. Aşınma test yükü arttıkça aşınma oranı artmış, ayrıca kompozit malzeme üretiminde enerji yoğunluğu değerindeki artışın aşınma özelliklerini olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

## Investigation of wear behavior of PA 12 matrix ceramic reinforced composites produced by selective laser sintering method

### H I G H L I G H T S

- Composite production by selective laser sintering additive manufacturing method
- The effect of energy density change in the SLS method
- Wear resistance of ceramic reinforced polyamide 12 composites

#### Article Info

Research Article

Received:29.11.2022

Accepted: 27.05.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1207967

#### Keywords:

Polymer composites,  
selective laser sintering,  
wear behaviour

#### ABSTRACT

In this study, ceramic-reinforced PA 12 matrix composite materials were produced using Selective Laser Sintering (SLS), one of the additive manufacturing methods, and the wear behaviour of composite materials was investigated. Two different energy density values were used in the production of composite materials with SLS. Dry wear tests were applied to the produced composite materials. Wear tests were carried out at 25 mm/sec and 100 mm/sec velocity values and at 5 N and 20 N wear load values. As the wear test load increased, the wear rate increased, and it was determined that the increase in the energy density value in the production of composite materials adversely affected the wear properties.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*burcinozbay@gmail.com, itutuk@fsm.edu.tr, ekoc@fsm.edu.tr, sencerkarabey@gmail.com, akisasoz@gmail.com / Tel: +90 212 521 8100 / 4373

## 1. Giriş (Introduction)

Ekleme imalat katmanlar halinde gerçekleştirilen üretimle nihai parçanın elde edilmesini sağlayan ve karmaşık şekilli parçaların da üretilebilmesine olanak veren bir üretim yöntemidir [1, 2]. Ekleme imalatın kullanılmasıyla tasarımda esneklik, gelişmiş mekanik özellikler ve üretimde kalıp kullanılmasına gerek kalmaması gibi avantajlar elde edilir. Poliamidler, sırasıyla PA 12, PA 11, PA 6, bu yöntemde en çok kullanılan termoplastik hammaddelerdir [3-6].

Diğer pek çok yöntemde olduğu gibi SLS ekleme imalat yönteminde de polimer malzemelerin sahip olduğu özellikleri geliştirmek amacıyla çeşitli seramik ve metal esaslı takviye elemanları kullanılmaktadır. Özellikle toz yataklı bir ekleme imalat tekniği olan SLS'de PA 12 (Poliamid 12) en yaygın kullanıma sahip olan polimer malzemedir. PA 12 malzemenin SLS ile üretilmesinde hem üretim parametreleri hem de üretilen malzemelerin mekanik özellikleri üzerine pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Özellikle SLS ile üretimde baskı doğrultusu ve enerji yoğunluğu üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır [7-9]. Ayrıca çekme dayanımı, sürtünme özellikleri ve çatlak ilerlemesi gibi parametreler üzerine çalışılmış ve PA 12 malzemenin mekanik özelliklerinin SLS üretim yöntemine bağlı olarak nasıl değiştiği ortaya konulmuştur [10-12].

PA 12 matrisli kompozitlerin geliştirilmesinde bor nitrid [13], alüminyum oksit [14], silisyum oksit [15], demir oksit [16], metal nano partikül [17], karbon fiber [18], grafen [19] ve dendritik bakır [20] gibi farklı malzeme türleri kullanılmaktadır [18-25]. PA 12'nin uçucu kütle birlikte kullanılmasıyla üretilen kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin yükseldiği görülmüştür [21]. Öte yandan cam küre ve seramik esaslı fiberlerin PA 12'nin kuru ortamdaki akma dayanımını artırdığı belirlenmiştir [12]. SLS ile üretilen PA 12 matrisli kompozit malzemeler; PA 12'ye göre iyi mekanik özelliklere sahip olmakla birlikte, dayanım ve modül değerlerinde de artışlar elde edilmektedir [22-24].

Bu çalışmada PA 12 matrisli seramik takviyeli kompozit malzemeler SLS yöntemiyle, farklı enerji yoğunluğu değerleri kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin aşınma direnci değerleri kuru sürtünme koşullarında gerçekleştirilen deneylerle araştırılmıştır. Bu çalışmayla ilk kez PA 12 matris malzemesi mikro seramik kürelerle desteklenmiş, kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen kompozit malzemelerin kuru aşınma ortamındaki tribolojik davranışı incelenmiştir.

## 2. Deneysel Metot (Experimental)

### 2.1. SLS Ekleme İmalat (SLS Additive Manufacturing)

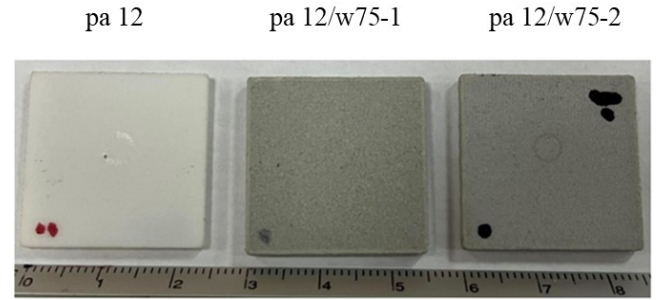
EOS P 110 SLS cihazı [25] 100 mikron katman kalınlığında katkısız PA 12 ve PA 12/W75 kompozitleri üretmek için kullanılmıştır. Üretim cihazı maksimum lazer gücü 30 watt olan bir CO<sub>2</sub> lazere sahiptir. Söz konusu polimer kompozit hammaddeler bir döner tamburda karıştırıldıktan sonra üretimler gerçekleştirilmiştir. PA 12 matris malzemesi olarak kullanılırken, seramik esaslı W75 ısı dayanımlı seramik mikroküreler takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Matris malzemesi olan PA 12 (EOS GmbH-PA 2200) ve seramik katkı olarak kullanılan W75 mikro seramik küreler (Thermo Spheres® W75) matris malzemesine ağırlıkça %20 oranında

eklenerek döner bir tambur ile karıştırılmıştır. Üretimlerde kullanılan lazer parametreleri aşağıdaki Tablo 1'de yer almaktadır.

Enerji yoğunluğu (ED) değeri (Eş. 1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$ED = \frac{P}{v \cdot h} \quad (1)$$

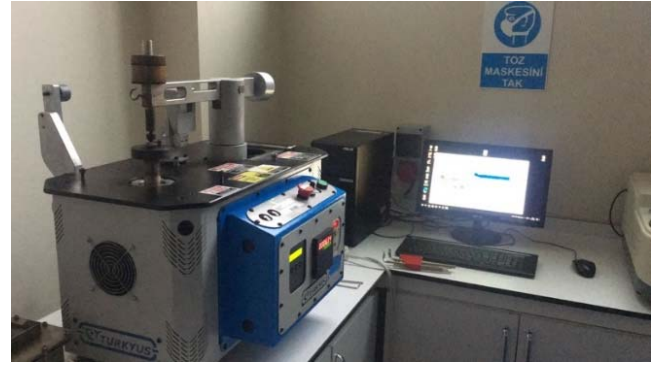
Eş. 1'de yer alan ED, P, v ve h değerleri sırasıyla enerji yoğunluğunu (J/mm<sup>3</sup>), lazer gücünü (W), lazer tarama hızını (mm/s) ve lazer tarama aralığını (mm) temsil etmektedir. Üretilen numuneler Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. PA 12 ve kompozit malzemelerin makro görüntüsü (Macrostructure of the PA 12 and composite samples)

### 2.2. Mekanik Testler (Mechanical Tests)

Aşınma testleri Türkyus marka aşınma cihazı (Şekil 2) yardımıyla, 6 mm çapındaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcı top ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler 25 mm/sn ve 100 mm/sn olmak üzere iki ayrı aşınma hızında, 5 N ve 20 N olmak üzere iki ayrı aşınma yükü kullanılarak test edilmiştir.



Şekil 2. Aşınma cihazı (Wear test machine)

Aşınma testlerinin tamamı 150 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Her bir test parametresinde üç tekrarlı olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan aşındırıcının özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Aşınma testleri ASTM G99-17 standardına göre uygulanmış ve aşınma oranı aşağıdaki eşitlikler (Eş. 2 ve Eş. 3) yardımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 1. Numune kodları ve SLS üretim parametreleri (Samples' codes and SLS production parameters)

Numune Adı	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (mm)	ED (J/mm <sup>3</sup> )
PA 12	21	2500	0,25	0,336
PA 12/W75-1	21	2100	0,25	0,400
PA 12/W75-2	21	1675	0,25	0,500

**Tablo 2.** Aşındırıcı (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) özellikleri [26] (Properties of abrasive)

Özellikler	Değer
Safılık	%99,5
Çap	6 mm
Yoğunluk	3,86 g/cm <sup>3</sup>
Sertlik	1410 HV

$$V = 2\pi R[r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2}] \quad (2)$$

$V$  aşınma sonucundaki hacim kaybını,  $R$  aşınma izi yarıçapını,  $r$  aşındırıcı yarıçapını ve  $d$  aşınma izi genişliğini temsil etmektedir.

$$AO = \frac{V}{DF} \quad (3)$$

$AO$  aşınma oranını,  $D$  kayma mesafesini ve  $F$  ise test yükünü temsil etmektedir.

Aşınma testi sonucunda, özellikle aşınma davranışını incelemek amacıyla numunelere taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri uygulanmıştır.

### 2.3. Mikroyapı Analizleri (Microstructural Characterization)

Uygulanan aşınma testlerinin akabinde katkısız ve seramik katkılı kompozit ürünlerde gerçekleştirilen aşınma testinin etkilerini inceleyebilmek için aşınma izleri Hitachi SU3500 T2 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında incelenmiştir. Görüntüler BSE modunda, 5 kV'da ve x750 büyütmede alınmıştır.

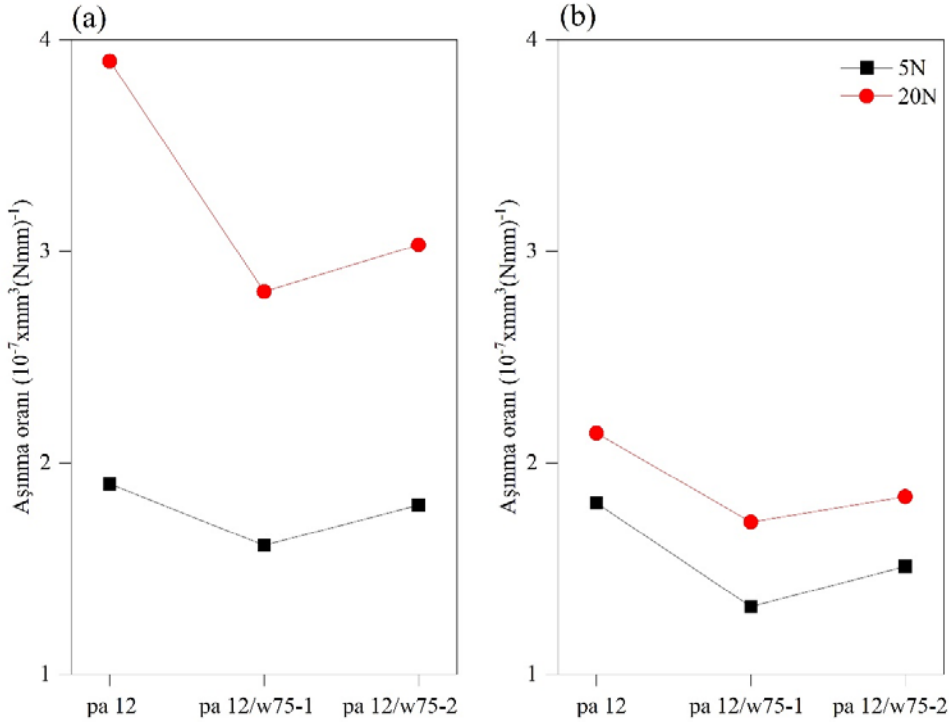
### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussion)

Şekil 3'te farklı hız ve yük değerleri kullanılarak gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma oranları verilmiştir. Her iki hız değerinde de test yükünün artmasıyla aşınma oranının arttığı görülmektedir. Aşınma testinde yükün 5 N değerinden 20 N

değerine çıkarılması, malzeme ile aşındırıcı arasındaki etkileşimin artmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak aşındırıcı ucun malzeme yüzeyinde ortaya çıkardığı aşınma etkisi artmış ve aşınma oranı değeri yükselmiştir. Ayrıca test hızının azalmasıyla birlikte, aşınma oranında artış görülmüştür. Aynı kayma mesafesi için aşınma hızının azalması, aşındırıcı uç ile malzeme yüzeyindeki etkileşim süresinin artmasına neden olarak daha yıkıcı bir aşınma ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte 25 mm/sn aşınma hızı değerinde, test yükünün 5 N'dan 20 N'a yükselmesi 100 mm/sn aşınma hızına göre aşınma oranının artmasında çok daha etkili olmuştur. Düşük aşınma hızında malzeme ve aşındırıcı arasındaki etkileşimin daha uzun sürelerde gerçekleşmesi, artan yükün aşınma davranışı üzerindeki olumsuz etkisinin daha baskın şekilde ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Takviyesiz PA 12 malzemede en yüksek aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. PA 12/W75-1 numunesinde ise diğer numunelere kıyasla en düşük aşınma oranı elde edilmiştir. PA 12 malzemenin W75 seramik mikroküreler ile takviyelendirilmesi aşınma dayanımının artmasına neden olmuştur. Dayanımı ve sertliği yüksek seramik esaslı malzemenin takviye elemanı olarak kullanılması, tribolojik özelliği sınırlı olan PA 12'nin aşınma dayanımını artırıcı bir etki sağlamıştır. PA 12/W75-1 ve PA 12/W75-2 kompozit malzemelerin aşınma özellikleri kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise PA 12/W75-1'in aşınma özelliklerini daha iyi olduğu görülmüştür. Her iki kompozit malzeme arasındaki temel fark, kompozit malzemelerin SLS yöntemiyle üretilmesinde kullanılan enerji yoğunluğu değerleridir. PA 12/W75-1 kompozit malzeme 0,400 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu değeriyle üretilmişken, PA 12/W75-2 kompozit malzeme 0,500 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu değeriyle üretilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalarda PA 12 matrisinin bakır, karbon, MoS<sub>2</sub> gibi partiküllerle takviye edilmesiyle aşınma özelliklerinin geliştirildiği belirtilmiştir [27, 28]. Seramik mikro küre takviyesinin de PA 12 matrisinin aşınma dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Özellikle, Shibata ve arkadaşları PA 12 matrisli seramik partikül



**Şekil 3.** PA 12 ve kompozit malzemelerin aşınma oranları: a) 25 mm/sn, b) 100 mm/sn  
(Figure 3. Wear rates of PA 12 and composite materials: a) 25 mm/sn, b) 100 mm/sn)

takviyeli kompozitlerde, seramik elemanın malzeme ve aşındırıcı arasındaki etkileşimi azaltarak aşınma dayanımını artırdığını belirlemiştir [29]. Bununla birlikte, bu çalışmada SLS yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde, enerji yoğunluğu parametresinin de aşınma özellikleri üzerinde etkisinin olduğu belirlenmiştir. Enerji yoğunluğu değerinin artması kompozit malzemenin aşınma özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Literatürde enerji yoğunluğu değerindeki yükselmelerin kısmi ergimelere neden olduğu da raporlanan bilgiler arasındadır [30]. PA 12 W/75-2 malzeme de görece daha yüksek değerlerde kullanılan enerji yoğunluğuna değeri aşınma dayanımının azalmasına, aşınma oranının artmasına neden olmuştur.

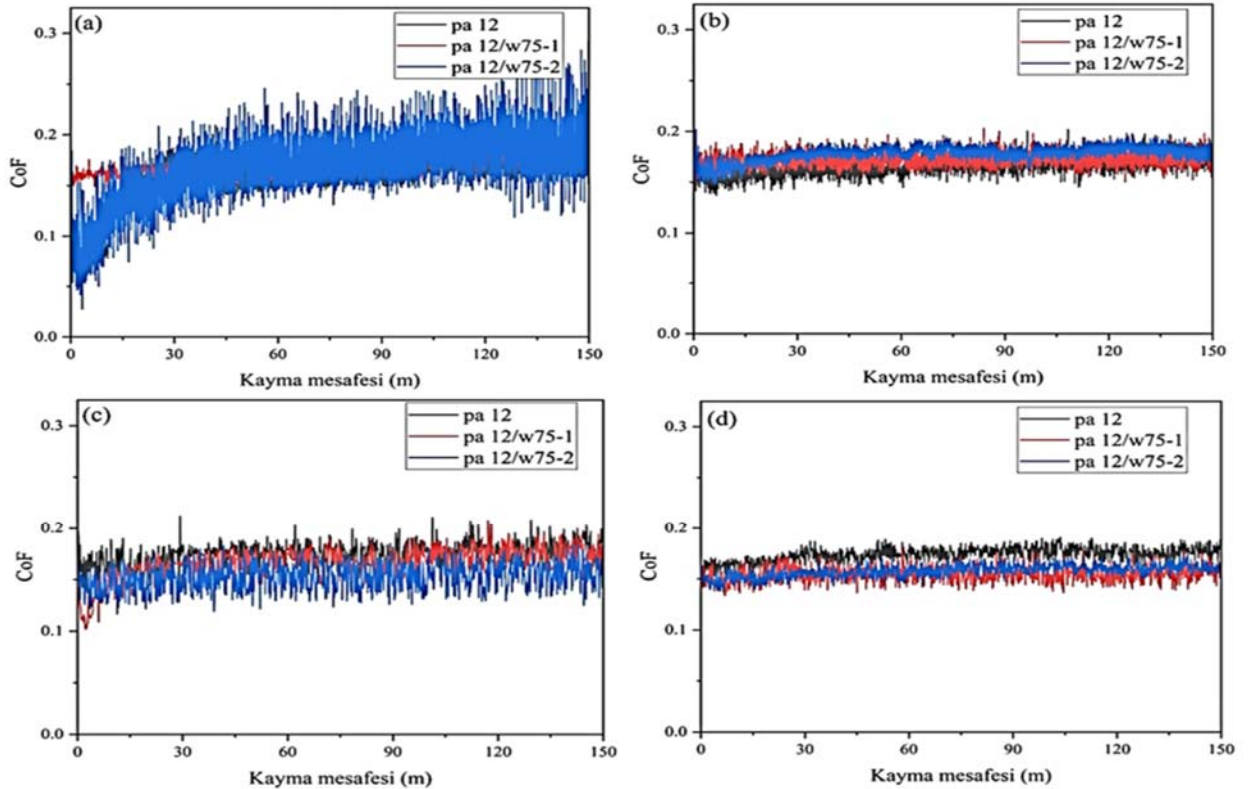
Şekil 4'te PA 12 ile kompozit malzemelere uygulanan testler sonucunda elde edilen aşınma katsayıları (CoF) verilmiştir. Genel olarak elde edilen CoF değerleri literatürde yer alan değerlerle uyumludur [30, 31]. Değişken aşınma hızlarında ve yüklerinde gerçekleştirilen çalışmalarda CoF değerlerinin belirgin bir değişiklik göstermediği ve birbirine yakın aşınma katsayısı değerlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ancak 5 N test yükünde gerçekleştirilen aşınma deneylerinde, hem 25 mm/sn hem de 100 mm/sn aşınma hızlarında aşınma katsayısı değerlerinin yüksek bir salınım yaptığı görülmüştür.

Özellikle aşınma hızının düşmesi, salınımın artmasına neden olmuştur. Test yükünün düşük değerlerde kullanılması malzeme ve aşındırıcı uç arasında tam bir temasın oluşmasını sağlayamamakta ve yüksek bir salınım ortaya çıkmaktadır. Aşınma testinin düşük hızda uygulanması kararsızlığı artırmış ve CoF değerindeki salınım daha geniş bir aralıkta olmuştur. Aşınma testi yükünün 20 N olarak kullanılması ise malzeme ve aşındırıcı uç arasında kararlı aşınmanın (stabil CoF değeri) oluşmasını sağlayacak bir temasın kurulmasını

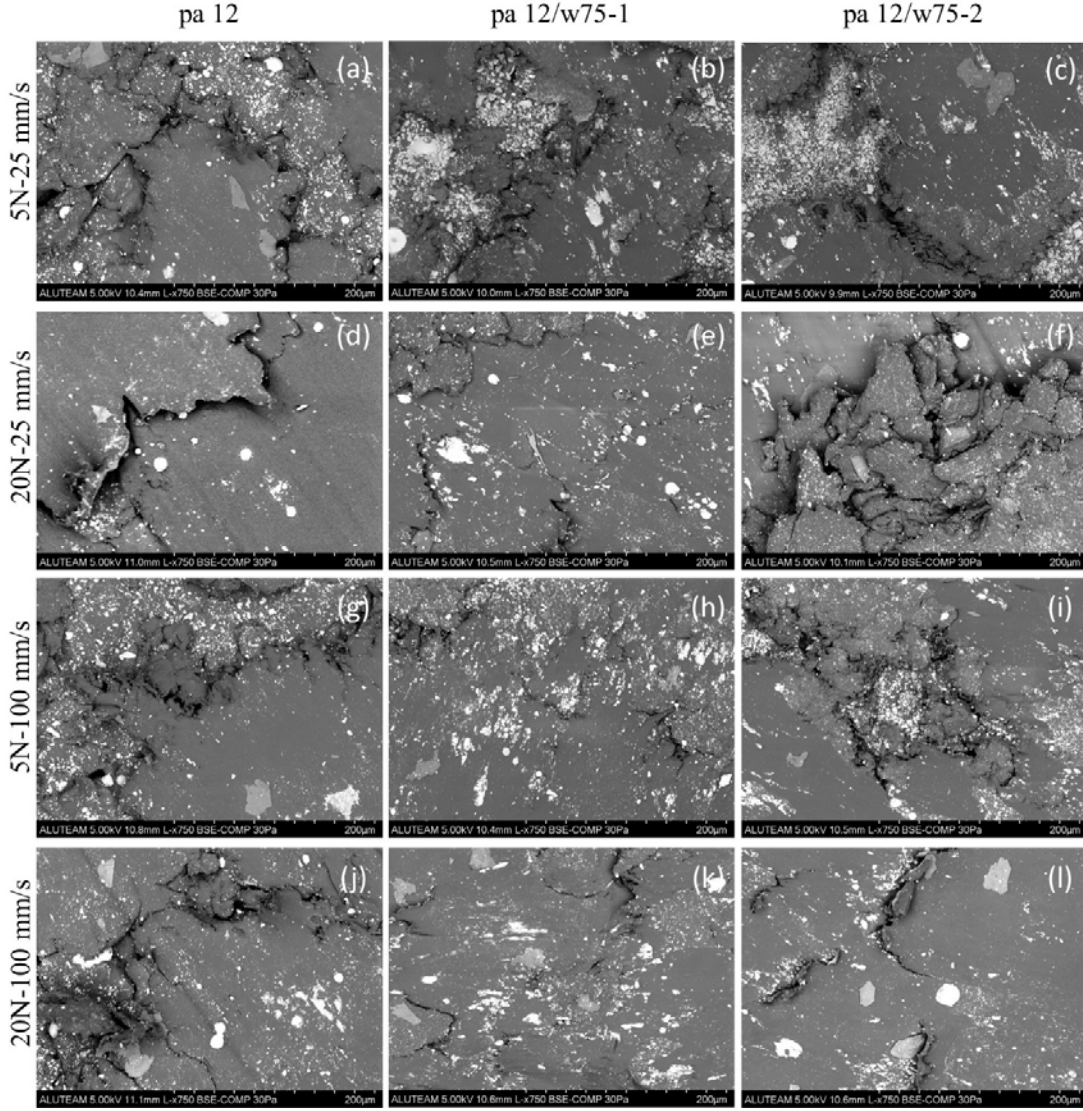
sağlamıştır. Buna bağlı olarak her iki aşınma hızı değerinde de stabil CoF eğrisi elde edilmiş ve kararlı bir aşınma karakteristiği ile çalışılmıştır.

Şekil 5'te aşınma testi sonrasında, aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma yüzey görüntüleri, aşınma oranı ve CoF incelemeleri sonucunda elde edilen sonuçlarla uyumludur. Seramik esaslı takviye malzemesi içermeyen PA 12 malzeme de aşınma testi sonucunda aşınma doğrultusuna dik yönde delaminasyon oluşumu gözlemlenmiştir.

Malzemenin aşındırılması sırasında, etki eden aşındırıcının oluşturduğu gerilme ve PA 12'nin yumuşak bir malzeme olması nedeniyle oluşan gerilmelere dayanamaması nedeniyle aşınma yüzeyinde delaminasyon oluşumu gerçekleşmiştir. Özellikle aşınma yükünün 5 N değerinden 20 N değerine çıkarılmasıyla, aşınma yüzeyinde oluşan gerilme artmış ve daha şiddetli bir yüzey hasarı meydana gelmiştir. Seramik esaslı ısıl dayanımlı mikroküreler ile takviye edilen malzemelerde ise PA 12'de görülen delaminasyon önemli oranda giderilmiştir. Özellikle 0,400 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu ile üretilen kompozit malzeme de, aşınma yüzeyi diğer iki numuneye göre oldukça iyi durumdadır. Özellikle 100 mm/saniye aşınma hızında gerçekleştirilen aşınma testlerinde yapısal bütünlüğünü koruyan yüzeyler elde edilmiştir. Kompozit malzemelerin aşınma yüzey görüntüleri karşılaştırıldığında, 0,400 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğunda üretilen PA 12/W75-2 numunesinde hasarının daha fazla olduğu görülmüştür. Kompozit malzemenin SLS yöntemiyle üretimi sırasında enerji yoğunluğu değerinin artması PA 12 matris malzemesinin sahip olduğu özellikleri olumsuz etkilemiş ve söz konusu kompozit malzemenin yapısal bütünlüğü bozulmuş, hasarlı bir aşınma yüzeyi elde edilmiş ve aşınma direnci azalmıştır. PA 12'nin



Şekil 4. Aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma katsayısı (CoF) değerleri: a) 25 mm/sn ve 5 N, b) 25 mm/sn ve 20 N, c) 100 mm/sn ve 5 N, d) 100 mm/sn ve 20 N (Wear coefficient (CoF) values obtained as a result of the wear test: a) 25 mm/s and 5 N, b) 25 mm/s and 20 N, c) 100 mm/s and 5 N, d) 100 mm/s and 20 N)



**Şekil 5.** Aşınma yüzeyi SEM görüntüleri: a) PA 12 5N-25mm/s, b) PA 12/W75-1 5N-25mm/s, c) PA 12/W75-2 5N-25mm/s, d) PA 12 20N-25mm/s, e) PA 12/W75-1 20N-25mm/s, f) PA 12/W75-2 20N-25mm/s, g) PA 12 5N-100mm/s, h) PA 12/W75-1 5N-100mm/s, i) PA 12/W75-2 5N-100mm/s, j) PA 12 20N-100mm/s, k) PA 12/W75-1 20N-100mm/s, l) PA 12/W75-2 20N-100mm/s  
(SEM images of wear surface: a) PA 12 5N-25mm/s, b) PA 12/W75-1 5N-25mm/s, c) PA 12/W75-2 5N-25mm/s, d) PA 12 20N-25mm/s, e) PA 12/W75-1 20N-25mm/s, f) PA 12/W75-2 20N-25mm/s, g) PA 12 5N-100mm/s, h) PA 12/W75-1 5N-100mm/s, i) PA 12/W75-2 5N-100mm/s, j) PA 12 20N-100mm/s, k) PA 12/W75-1 20N-100mm/s, l) PA 12/W75-2 20N-100mm/s)

aşınma davranışında da görüldüğü gibi artan test yükü aşındırıcı ve malzeme arasındaki etkileşimi artırmış ve daha yüksek bir aşınma oranı elde edilmiştir.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada farklı enerji yoğunluğu değerleri kullanılarak PA 12 matrisli W75 seramik esaslı ısıl dayanıma sahip mikroküreler takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Seramik esaslı takviye elemanının PA 12 malzemenin aşınma dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Aşınma deneylerinde farklı aşınma hızı ve aşınma yükü kullanılmıştır. Genel olarak aşınma hızındaki artışın aşınma dayanımını da artırdığı, aşınma yükündeki artışın ise aşınma dayanımını azalttığı belirlenmiştir.

Takviye elemanı içermeyen PA 12 malzemenin aşınma davranışı incelendiğinde, özellikle aşınma yüzeylerinde yoğun hasarların olduğu gözlemlenmiştir. PA 12 matris malzemesi aşınma sırasında ortaya çıkan gerilmelere dayanamamış ve yüzeyde delaminasyon oluşumu gerçekleşmiştir.

Ayrıca kompozit malzemelerin SLS yöntemiyle üretilmesinde enerji yoğunluğu değerinin artırılması aşınma dayanımını olumsuz etkilemiş ve PA 12/W75-1 kompozit malzemede daha yüksek bir aşınma direnci elde edilmiştir.

#### Kaynaklar (References)

1. Taormina G., Sciancalepore C., Messori M., Bondioli F., 3D printing processes for photocurable polymeric materials : technologies, materials, and future trends, Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials, 16 (3), 151-160, 2018.

2. Farahani R.D., Dubé M., Theriault D., Three-Dimensional Printing of Multifunctional Nanocomposites : Manufacturing Techniques and Applications, *Advanced Materials*, 28 (28), 5794–5821, 2016.
3. Nath S.D., Nilufar S., An Overview of Additive Manufacturing of Polymers and Associated Composites, *Polymers*, 12 (11), 2719, 2020.
4. Wu H., Fahy W.P., Kim S., Zhao N., Pilato L., Kafi A., Bateman S., Koo J.H., Progress in Materials Science Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing, *Progress in Materials Science*, 111, 100638, 2020.
5. Jasiuk I., Abueidda D.W., Kozuch C., Pang S., Su F.Y., Mckittrick J., An Overview on Additive Manufacturing of Polymers, *Journal of Materials*, 70 (3), 275–283, 2018.
6. Alghamdi S.S., John S., Choudhury N.R., Dutta N.K., Additive Manufacturing of Polymer Materials : Progress , Promise and Challenges, *Polymers*, 13 (5), 1–39, 2021.
7. Lammens N., Kersemans M., De Baere I., Van Paepegem W., On the visco-elasto- plastic response of additively manufactured polyamide-12 (PA-12) through selective laser sintering, *Polymer Testing*, 57, 149–155, 2017.
8. Schneider J., Kumar S., Multiscale characterization and constitutive parameters identification of polyamide (PA12) processed via selective laser sintering, *Polymer Testing*, 86, 106357, 2020.
9. Starr T.L., Gornet T.J., Usher J.S., The effect of process conditions on mechanical properties of laser-sintered nylon, *Rapid Prototyping Journal*, 17, 418–423, 2011.
10. Amel H., Moztarzadeh H., Rongong J., Hopkinson N., Investigating the behavior of laser-sintered Nylon 12 parts subject to dynamic loading, *Journal of Materials Research*, 29, 1852–1858, 2014.
11. Salazar A., Rico A., Rodríguez J., Segurado Escudero J., Seltzer R., Martin De La Escalera Cutillas F., Fatigue crack growth of SLS polyamide 12: effect of reinforcement and temperature, *Composites Part B: Engineering*, 59, 285–292, 2014.
12. Özbay Kısaşöz, B., Kısaşöz, A., An Overview of the Quality Characteristics Challenges in Additive Manufacturing, *Handbook of Post-Processing in Additive Manufacturing*, Sing G., Kumar, R., Sandhu, K., Pei, E., Singh, S., CRC Press, Boca Raton, 181-192, 2023.
13. Shiva Kumar K., Chennakesava Reddy A., Investigation on mechanical properties and wear performance of Nylon-6/Boron Nitride polymer composites by using Taguchi Technique, *Results in Materials*, 5, 100070, 2020.
14. Kumar S.S., Kanagaraj G., Investigation on mechanical performances of PA6 and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced PA6 polymer composites, *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 7 (1), 69-74, 2016.
15. Hasan M.M., Zhou Y., Mahfuz H., Jeelani S., Effect of SiO<sub>2</sub> nanoparticle on thermal and tensile behavior of nylon-6, *Materials Science and Engineering A*, 429 (1–2), 181–188, 2006.
16. Karan Agarwal N.A., Sirinivas R., Reddy A.C., Enhancement in mechanical behavior of nylon/teflon composites by addition of nano iron oxide ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), *International Journal of Science and REsearch*, 4 (5), 927-932, 2015.
17. Martelli V., Toccafondi N., Ventura G., Low-temperature thermal conductivity of Nylon-6/Cu nanoparticles, *Physica B: Condensed Matter*, 405 (20), 4247–4249, 2010.
18. Hui C., Qingyu C., Jing W., Xiaohong X., Hongbo L., Zhanjun L., Interfacial enhancement of carbon fiber/nylon 12 composites by grafting nylon 6 to the surface of carbon fiber, *Applied Surface Science*, 441, 538–545, 2018.
19. Rafiq R., Cai D., Jin J., Song M., Increasing the toughness of nylon 12 by the incorporation of functionalized graphene, *Carbon*, 48 (15), 4309–4314, 2010.
20. Bekem A., Özbay B., Bulduk M., Effect of dendritic copper powder addition to polyamide 12 in selective laser sintering, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 421-432, 2020.
21. Li M., Chen A., Lin X., Wu J., Chen S., Cheng L., Chen Y., Wen S., Li C., Shi Y., Lightweight mullite ceramics with controlled porosity and enhanced properties prepared by SLS using mechanical mixed FAHSs/polyamide12 composites, *Ceramics International*, 45 (16), 20803-20809, 2019.
22. Jucan O.D., Gadalean R.V., Chicinaş H.F., Hering M., Balc N., Popa C.O., Study on the indirect selective laser sintering (SLS) of WC-Co/PA12 powders for the manufacturing of cemented carbide parts, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 96, 105498, 2021.
23. Özbay Kısaşöz B., Serhatlı İ.E., Bulduk M.E., Selective Laser Sintering Manufacturing and Characterization of Lightweight PA 12 Polymer Composites with Different Hollow Microsphere Additives, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 4049–4059, 2022.
24. Balzerit S., Proes F., Altstadt V., Emmelmann C., Properties of copper modified polyamide 12-powders and their potential for the use as laser direct structurable electronic circuit carriers, *Additive Manufacturing*, 23, 347–354, 2018.
25. <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/eos-polymer-systems/formiga-p-110-velocis>
26. Erol M., Kısaşöz A., Yaman P., Karabeyoğlu S.S., Barut U., A study on high temperature dry sliding wear of AA7050-T4 and effects of the test temperature on microstructure, corrosion behavior, hardness and electrical conductivity, *Materials Today Communications*, 31, 103410, 2022.
27. Konieczny J., Chmielnicki B., Tomiczek A., Evaluation of selected properties of PA6-copper/graphite composite, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 60 (1), 23-30, 2013.
28. Özbay Kısaşöz B., Koç E., Kısaşöz A., Karabeyoğlu S.S., Dry sliding wear behavior of energy density dependent PA 12/Cu composites produced by selective laser sintering, *Materials Testing*, 65 (2), 303-312, 2023.
29. Shibata K., Fukuda M., Yamaguchi T., Hokkirigawa K., Relationship between sliding-induced wear and severity of sliding contact for polyamide 66 filled with hard filler, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 231 (6), 783-790, 2017.
30. Wagner T., Höfer T., Knies S., Eyerer P., Laser Sintering of High Temperature Resistant Polymers with Carbon Black Additives, *International Polymer Processing*, 19 (4), 395–401, 2004.
31. Wu Y., Yu Z., Liu X., Tribological performance of in-situ epoxy composites filled with micro-sized ZrB<sub>2</sub> particles, *Composites Part B*, 123, 148-153, 2017.

