

Alınma
7 Mayıs 2025
Kabul
24 Haziran 2025

* Sorumlu yazar.
e-mail: ikbalkara@erciyes.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

- FDM
- Triboloji
- Grafen
- Nanoparçacık
- Sürtünme ve Aşınma

Eriyik Yığılma Modellemesi (FDM) Yöntemi Kullanılarak Üretilen Grafen Katkılı PLA+ Malzemeden Üretilen Numunelerin Çeşitli Sürtünme ve Aşınma Şartları Altında Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi

Muhammed İkbāl KARA¹

¹ Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Mevcut çalışmada ağırlıkça %2 oranında grafen takviye edilmiş PLA+ filament kullanılarak eriyik yığılma modellemesi (FDM) yöntemiyle özdeş 9 adet numune üretilmiştir. Üretilen grafen katkılı numunelerin farklı tribolojik koşullardaki sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Farklı tribolojik koşulların oluşturulması adına deneyler boyunca uygulanan yük, dönme hızı (devir) ve kayma mesafesi değişken parametre olarak belirlenmiştir. Değişken olarak belirlenen her parametrede ise 3 farklı seviye seçilmiştir. Uygulanan yük 30 – 40 – 50 Newton, dönme hızı (rpm) 200 – 250 – 300, kayma mesafesi ise 100 – 150 – 200 metre olarak belirlenmiştir. Seçilen 3 farklı parametre ve 3 farklı seviyede deney sayısını düşürmek amacıyla Taguchi L9 dizilimi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda ise 30 N yük, 200 rpm ve 100 metre kayma mesafesiyle üretilen Numune 1'in en yüksek aşınma oranına ve sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. 30 N yük – 300 rpm ve 200 metre kayma mesafesiyle üretilen Numune 3'ün en düşük aşınma oranına ve sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 0,0422 delta değeri ile devir parametresinin sürtünme katsayısı üzerine en etkili parametre olduğu, parametre seviyelerinin doğrusal veya tutarlı bir artış ya da azalışa etkisinin olmadığı, devir parametresinin Sinyal / Gürültü oranları bakımından incelendiğinde 0,889 Delta değeri ile en etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Investigation of Tribological Behavior of Samples Produced from Graphene Additive PLA+ Material Using Fused Deposition Modeling (FDM) Method Under Various Friction and Wear Conditions

Muhammed İkbāl KARA¹

¹ Department of Airframe and Powerplant, Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

Received
07 May 2025
Accepted
24 June 2025

* Corresponding author.
e-mail: ikbalkara@erciyes.edu.tr

Keywords:

- FDM
- Tribology
- Graphene
- Nanoparticle
- Friction and Wear

In the present study, 9 identical samples were produced by using 2% graphene reinforced PLA+ filament by Fused Deposition Modeling (FDM) method. The friction and wear behaviors of the produced graphene-doped samples under different tribological conditions were investigated. In order to create different tribological conditions, the applied load, rotational speed (rpm) and sliding distance were determined as variable parameters throughout the experiments. 3 different levels were selected for each parameter determined as variable. The applied load was determined as 30 – 40 – 50 Newton, rotational speed (rpm) as 200 – 250 – 300, and sliding distance as 100 – 150 – 200 meters. Taguchi L9 array was used in order to reduce the number of experiments in the 3 different parameters and 3 different levels selected. As a result of the experiments performed, it was observed that Sample 1 produced with 30 N load, 200 rpm and 100 meters sliding distance had the highest wear rate and friction coefficient. It was observed that Sample 3, produced with 30 N load – 300 rpm and 200 meters sliding distance, had the lowest wear rate and friction coefficient. In addition, it was observed that the speed parameter was the most effective parameter on the friction coefficient with a delta value of 0.0422, that the parameter levels did not have a linear or consistent increase or decrease effect, and that the speed parameter was the most effective with a delta value of 0.889 when examined in terms of S / N ratios.

1. Giriş (Introduction)

3 boyutlu (3D) baskı olarak da bilinen Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi 2000’li yılların başından itibaren üretim endüstrileri ve akademilerde üzerine çalışmalar gerçekleştirilen gözde bir konu olmuştur. Eklemeli imalat; hızlı prototipleme, ekonomik üretim, atık malzemelerin yeniden kullanımı, karmaşık geometrilerin kolaylıkla üretimi, iş gücünden tasarruf sağlama gibi parametreler yönünden geleneksel imalata karşı sahip avantajlara sahiptir (Fasel vd., 2020; Gonabadi vd., 2020). Eklemeli imalat, sahip olduğu üstün kabiliyetler sayesinde günümüzde biyomedikal uygulamaların yanı sıra otomotiv, inşaat ve havacılık gibi alanlarda kullanılmaktadır (Huang, Aslan, vd., 2020; Vyas vd., 2020). Bu sistemlerin temel çalışma prensibi nesnelerin katmanlar halinde üretimine dayanmaktadır. FDM (Fused Deposition Modeling) çok yönlülüğü ve mali yönden ekonomik olması sebebiyle Eİ alanında yaygın bir şekilde kullanılan üretim yöntemlerinden birisidir. FDM yönteminde, sistem küçük bir enjeksiyon nozuluna sahiptir. Kafa, makaralı termoplastik filamentten beslenir ve nozuldan ekstrüde edilir. Ekstrüde edilen termoplastik filament bir tabla üzerinde katman oluşturacak şekilde katılır ardından ikinci katman alttaki katmanın üzerine eritilir ve birbirine bağlanır. Bir yapı oluşturmak için belirtilen sistem katmanlar halinde devam ettirilir. Bu süreç, üretimden önce tasarlanan yapı elde edilene kadar devam ettirilir (Şirin vd., 2022). FDM sürecinde polilaktik asit (PLA), polikarbonat, poli-kaprolakton, akrilonitrile bütadien stiren (ABS) ve çeşitli katkılara sahip kompozit filamentler istenilen parçaları üretmek için kullanılmaktadır (Azadi vd., 2021, 2021; El Magri vd., 2021; Gonabadi vd., 2020; Huang, Vyas, vd., 2020; Şirin vd., 2022; Zhiani Hervan vd., 2021). Özellikle PLA, kolay işlenebilirliği, biyobozunur bir malzeme olması, kolay temin edilebilmesi ve biyoyumlu olması gibi avantajlarından dolayı FDM yönteminde sıkça kullanılmaktadır. PLA, mısır nişastası, şeker kamışı veya şeker pancarı gibi yenilenebilir doğal kaynaklardan üretilen 50°C-180°C arasında bir camsı geçiş sıcaklığına ve yaklaşık 180°C erime sıcaklığına sahip bir termoplastik polimerdir. Sahip olduğu özelliklerden dolayı literatürde PLA hakkında mekanik, kimyasal, biyolojik, fiziksel özelliklerinin incelenmesi adına çalışma gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir (Ahmed ve Varshney, 2011; Carrasco vd., 2010; Ćwikła vd., 2017; Dou vd., 2022; Farah

vd., 2016; Gonabadi vd., 2020; Grémare vd., 2018; Patrício vd., 2013; Sedničková vd., 2018; Zhiani Hervan vd., 2021). 3D baskılar gerçekleştirilirken kullanılan baskı parametrelerinin PLA numunelerin mekanik karakteristiği üzerindeki etkileri Gonabadi ve ark. (Gonabadi vd., 2020) tarafından araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda dolgu yoğunluğunun ve yapı oryantasyonunun 3D baskı işlemi sonucunda üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu iddia edilmiştir. Ayrıca, literatürde yer alan bir diğer çalışmada Anderson (Anderson, 2017) PLA ve geri dönüştürülmüş PLA kullanarak numuneler üretmişlerdir. Ardından üretilen numuneler mekanik testlere tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen testler sonucunda numunelerin mekanik özelliklerinde herhangi bir fark olmadığı belirtilmiştir. Ek olarak, geri dönüştürülmüş filament kullanımının enerji tasarrufunda ve CO_2 emisyonlarının azaltılmasında rol alabileceği savunulmuştur.

Polimer malzemelerin mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri kadar aşınma ve sürtünme karakterizasyonları da oldukça önemlidir. Hali hazırda plastik ve polimer malzemeler, sürgülü kapılar, kılavuz rayları ve kaplinler gibi birçok sistemde aktif olarak kullanılmaktadır (Şirin vd., 2022). Dolayısıyla çalışan sistemlerde bu malzemeler temas halinde olduğundan aşınma ve sürtünme karakterizasyonlarının incelenmesi önem arz ettiği düşünülmektedir. Çalışan sistemler içerisinde fiziksel olarak etkileşimde bulunan malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristiğinin incelendiği bilim dalına ise ‘Triboloji’ adı verilmektedir. Triboloji, dünyanın var olduğu günden itibaren fiziksel olarak etkileşim içerisinde olan nesnelerin sürtünme ve aşınma durumlarını incelemektedir. Küresel çapta harcanan enerjinin bir çeyreği sürtünme kuvvetini aşmak amacıyla harcandığından, sürtünen yüzeylerdeki durumlar insan medeniyetlerinin ve ekonomilerinin gelişimlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Meng vd., 2022; Zhang vd., 2024).

PLA, doğal olarak mısır, şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilen bir malzemedir. Biyoyoumlu olması ve mekanik özelliklerinin tatmin edici düzeyde olması sebebiyle birçok sektörde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır (Khouri vd., 2024; Pradhan vd., 2022). Sahip olduğu avantajların aksine PLA düşük aşınma direncine sahip olduğundan uygulamada kısıtlamaları mevcuttur. PLA’nın bu kısıtlamalarını gidermek amacıyla nano boyutta katkı malzemeleri kullanılarak aşınma direnci ve sürtünme katsayısı gibi tribolojik özellikleri artırmak oldukça sık kullanılan bir yöntemdir (Gangadharan vd., 2024; Mishra & Abdulrahman, 2018). Örneğin, Anzum ve ark. (Abir & Trindade, 2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 1:1 oranında grafen nanopartikülleri ve kısa karbon lifleri eklenerek sertlikte %10 artış, sürtünme katsayısında (CoF) %12 düşüş ve özgül aşınma oranının $1.5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N} - \text{m}$ arttığı belirtilmiştir. Laraba ve ark. (Laraba vd., 2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise PLA malzemeye grafen oksit takviyeleri eklenmiştir. Gerçekleştirilen tribolojik çalışmalardan sonra aşınma oranlarında %50 düşüş elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, polietilen glikol (PEG) eklendiğinde ise PLA’nın aşınma davranışlarının yapışmadan aşındırıcıya geçtiği ifade edilmiştir. Literatürdeki bir diğer çalışmada ise Hussain ve ark. (Hussain vd., 2024), PLA malzemeye selüloz elyaf takviyeleri ekleyerek PLA’nın CoF değerinde – 80 N yük altında %61.45 gibi - önemli bir düşüş elde edildiği ifade edilmiştir.

Gerçekleştirilen literatür çalışmasında da görüldüğü üzere sürtünme ve aşınma testleri belirli koşullar altında bir malzemenin farklı maddelerle reaksiyonuna ve temasına bağlı olarak tribolojik

karakterizasyonun bilinmesini sağlamaktadır. Günlük hayatta PLA ve türevlerinden üretilen malzemeler fiziksel olarak temas halinde çalıştığından, PLA ve türevi hammaddelerinin tribolojik davranışlarının bilinmesi elzemdir. Tribolojik davranışlarının bilinmesiyle kullanılan PLA ve türevi malzemelerin mekanik performansına ve hizmet ömrüne etkisi kaçınılmazdır. Tam da bu noktada PLA ve türevlerinden üretilen çeşitli 3D baskılı parçaların tribolojik özellikleri üzerine çok sayıda çalışma yürütüldüğü gözlemlenmektedir. Tribolojik davranışların incelenmesi hatta iyileştirilmesi amacıyla PLA ve türevleri içerisine çeşitli nano malzemeler katılarak tribolojik davranışları inceleyen çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, PLA ve türevleri içerisine ağırlıkça %2 oranında grafen katılarak üretilen filamentin, çeşitli koşullar altında tribolojik davranışlarının incelenmesi üzerine hiçbir çalışma bulunamamıştır. Mevcut çalışma, literatürdeki boşluğu gidermeyi ve gelecekteki araştırmalar için içgörü sağlamayı hedeflemektedir.

2. Materyal Metot

Mevcut çalışma içerisinde grafen katkısının eklenebilmesi adına PLA+ Filameon (Türkiye) marka şeffaf filament kullanılmıştır. Şeffaf PLA+ filamentin teknik özellikleri Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Şeffaf PLA+ Filamentin Teknik Özellikleri (*Filameon*, t.y.).

Teknik Özellikler	Birimler	Değerler
Çap	mm	1.75-2.85
Uzunluk	m	335
Tolerans	mm	0.03-0.04
Yoğunluk	g/cm^3	1.24
Tabla Sıcaklığı	°C	60
Nozul Sıcaklığı	°C	190-230
Akma Sınırındaki Gerilme Direnci	MPa	60
Uzama Gerinimi	%	6
Eğme Dayanımı	MPa	83
Sertlik Değeri	Rockwell	105
Sıcaklık Dayanımı	°C	55

Şeffaf PLA+ filamente ise ağırlıkça (wt) %2 grafen karıştırılmıştır. Grafen katkılı PLA+ filamentin üretimi ise Filameon markası tarafından mekanik karıştırma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PLA+ ile grafen öncelikle çift vidalı extruder kullanılarak compound hale getirilmiştir. Karışım oranlarında granüller oluşturulmuştur. Ardından tek vidalı extruder kullanılarak grafen katkılı PLA+ filament üretilmiştir. Üretim sürecinin başından sonuna kadar 43°C soğutma havuzu sıcaklığı ve extrüzyon sıcaklıkları 180-207 arasında kademeli olarak değiştirilmiştir (*Filameon*, t.y.). Katkılı filament üretimi için kullanılan grafen ise Nanografi (Türkiye) markasından temin edilmiştir. Kullanılan grafenin teknik özellikleri ise Tablo 2’de belirtilmiştir. 1 kg PLA+ içerisine wt %2 oranında grafen katılarak mekanik karıştırma yöntemi kullanılarak wt %2 oranında grafen katkılı PLA+ filament üretimi gerçekleştirilmiştir. Grafen katkılı PLA+ filamentin üretimi tamamlandıktan ve temini tarafımızca gerçekleştirildikten sonra Taguchi deney tasarımının hazırlanışına geçilmiştir.

Tablo 2. Grafenin Teknik Özellikleri (*Nanografi*, t.y.).

Teknik Özellikler	Birimler	Değerler
Saflık Derecesi	%	99.9
Kalınlık	nm	3
Çap	µm	1.5
Spesifik Yüzey Alanı	m^2/g	800
İletkenlik	s/m	1500-1980

Taguchi yöntemi, çeşitli ve mühendislik üretim süreçlerinde kullanılan sağlam bir istatistiksel yaklaşımdır. Taguchi analizleri, kaliteyi tehlikeye atmadan maliyet ve deney sayısında optimizasyonu hedeflemektedir. Taguchi, süreç üzerinde çeşitli faktörlerin farklı seviyelerinin etkisini belirlemek amacıyla ortogonal bir dizi geliştirmektedir (Rice & Moslehy, 1997). Mevcut çalışmada, uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi parametreleri değişken olarak kabul edilmiş ve Tablo 3'te sunulmuştur. Tam faktöriyel deney tasarımı 27 ($3^3 = 27$) adet deney gerçekleştirmek gerekmektedir. Ancak, Taguchi yöntemi kullanılarak Tablo 4'te sunulduğu L9 ortogonal dizisi yardımıyla 9 deneye indirilmiştir (Gbadeyan vd., 2021; Hiremath vd., 2020; Kumar vd., 2024).

Tablo 3. Sürtünme ve Aşınma Deney Parametreleri

Parametreler	Birimler	Değerler
Uygulanan yük	N	30 – 40 – 50
Kayma Mesafesi	m	100 – 150 – 200
Kayma Hızı	rpm	200 – 250 - 300

Tablo 4. L9 Ortogonal Deney Düzenegi

Deney Numuneleri	Uygulanan Yük (N)	Dönme Hızı (rpm)	Kayma Mesafesi (m)
1	30	200	100
2	30	250	150
3	30	300	200
4	40	200	150
5	40	250	200
6	40	300	100
7	50	200	200
8	50	250	100
9	50	300	150

Grafen katkılı PLA+ filament kullanılarak sürtünme ve aşınma testlerine tabi tutulacak numunelerin önce bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları kullanılarak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tasarım 'standart tessellation language' (STL) formatında kaydedilmiştir. Ardından STL dosyası 3D yazıcıların okuyabileceği formata dönüştürülmesi amacıyla UltimakerCura adı verilen bir dilimleme programına aktarılmıştır. Numune STL'leri, dilimleme programı sayesinde '.gcode' formatına dönüştürülmüştür. Taşınabilir bellek kullanılarak 3D yazıcıya '.gcode' dosyaları aktarılmıştır ardından da üretim gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin üretiminde kullanılan Creality marka Ender 3S1 3D yazıcı

Şekil 1’de sunulmuştur. Ayrıca test numunelerinin üretiminde sabit olarak belirlenen üretim parametreleri Tablo 5’te sunulmuştur.

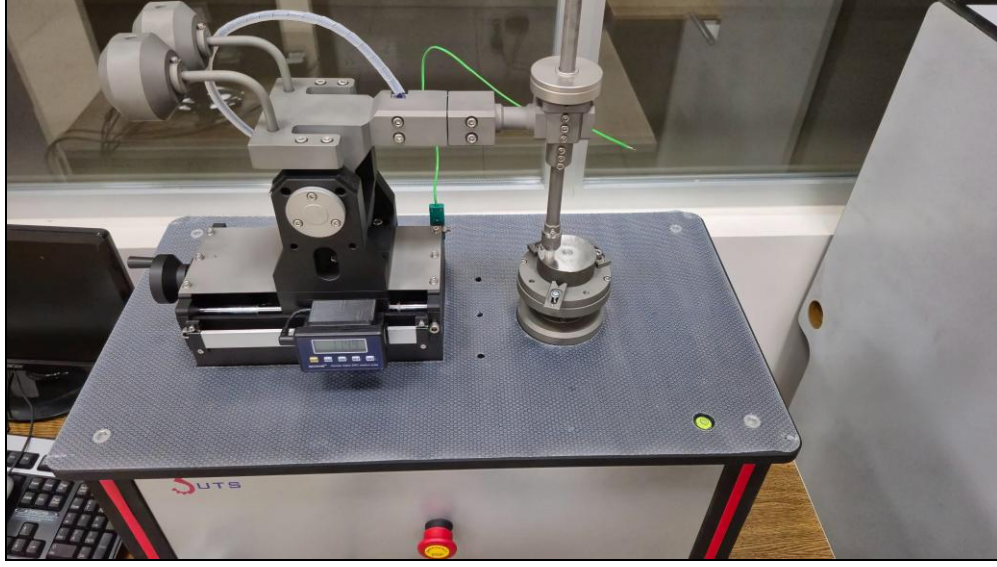


Şekil 1. Creality Ender 3S1-3D yazıcı

Tablo 5. Test Numuneleri Üretim Parametreleri

Üretim Parametreleri	Birimler	Değerler
Katman Yüksekliği	mm	0.1
Duvar Kalınlığı	mm	0.8
Üst/Alt Kalınlık	mm	0.4
Üst/Alt Katmanlar	Adet	2
Dolgu Yoğunluğu	%	50
Dolgu Şekli	-	Üçlü Altıgen
Nozul Sıcaklığı	°C	200
Tabla Sıcaklığı	°C	60
Baskı Hızı	mm/s	50

Grafen katkılı PLA+ malzemeden üretilen numunelerin tribolojik özellikleri Şekil 2’de sunulan UTS Tribolog (Türkiye) marka bir sürtünme aşınma cihazı kullanılarak test edilmiştir.



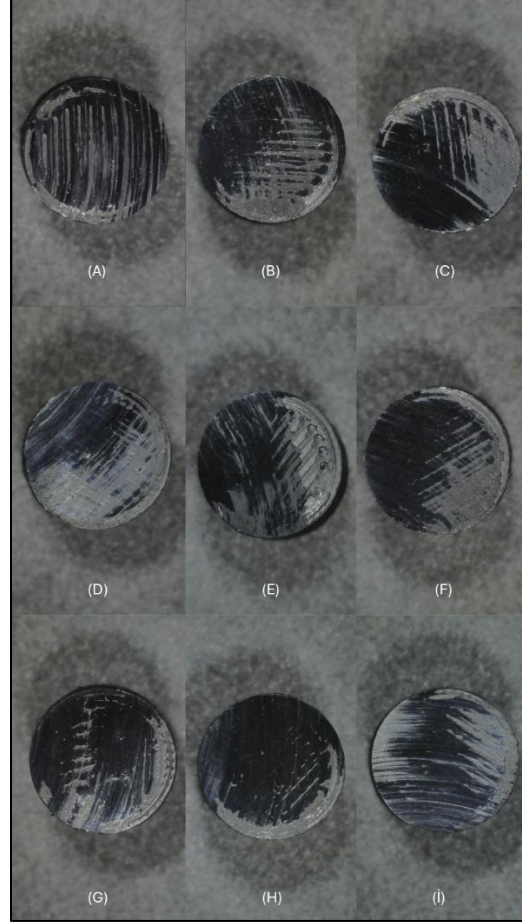
Şekil 2. UTS Tribolog - Tribometre

Gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma testi sonrasında aşınma kaybının ve aşınma oranının kıyaslanması amacıyla Denklem (1) kullanılarak deney öncesinde ve sonrasında numunelerin kütlesi ölçüldü (Taguchi, 1986). Kütle ölçümleri sonucu miligram (mg) mertebesinde değişimler gözlemlendiğinden aşınma oranı miligram cinsinden hesaplanmıştır. Kütle ölçümlerinde 0.0001-gram hassasiyetine sahip WSA-224T (Weightlab Instruments) analitik terazi kullanılmıştır.

$$\text{Aşınma Oranı} = \frac{\text{Kütle Değişimi}}{\text{Kayma Mesafesi}} \quad (1)$$

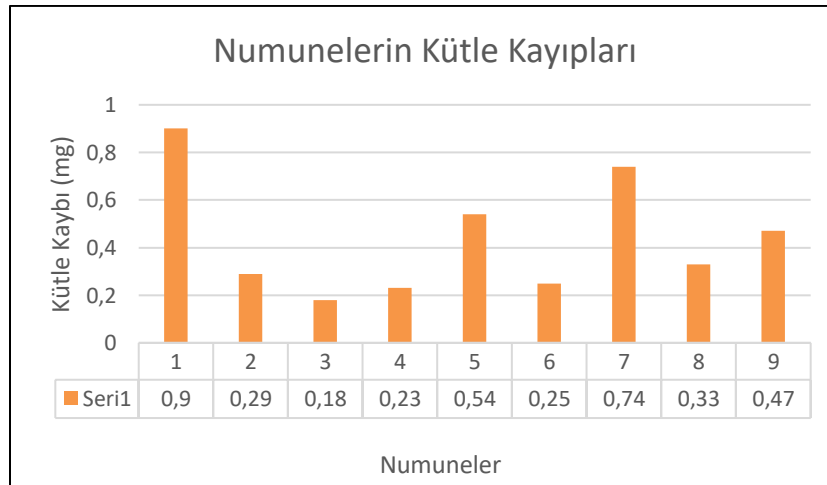
3. Bulgular

Sonuçların istatistiksel olarak incelenmesi amacıyla Minitab-21 yazılımı kullanılmıştır. Minitab 21 yazılımı içerisinde Taguchi deney tasarımlarının analizinde S/N oranları kullanılmaktadır. S/N oranında ‘istenen çıktı sinyal (signal)’ olarak ‘istenmeyen çıktı ise gürültü (Noise)’ olarak kabul edilmektedir. Bu sayede S/N oranı, bir sürecin veya ürünün karakteristik özelliğinin hem ortalamasını hem de değişken parametrelerini dikkate alarak, dış faktörlerin etkisini en aza indirmeye yardımcı olur ve hesaplanan işlem parametrelerinin S/N oranları, işlem parametrelerinin sağlamlığı ve en uygun sürtünme ve aşınma sonuçlarına yol açan koşulların nicel bir ölçüsünü sağlar (Aydın, 2023) (Sundarasetty & Sahu, 2025). Aşınma ve sürtünme katsayısı (CoF) için küçük değerlerin daha iyi olması şartlandırıldı. Gerçekleştirilen tribolojik testler sonrasında test numunelerinin sürtünen yüzeyleri Şekil 3’te sunulmuştur. Şekil 3 içerisinde alfabetik olarak gerçekleştirilen sıralama, test numunelerini sırasıyla Numune 1’den Numune 9’a kadar temsil etmektedir. ((A)-Numune 1, (B)-Numune 2, (C)-Numune 3, (D)-Numune 4, (E)-Numune 5, (F)-Numune 6, (G)-Numune 7, (H)-Numune 8, (İ)-Numune 9)



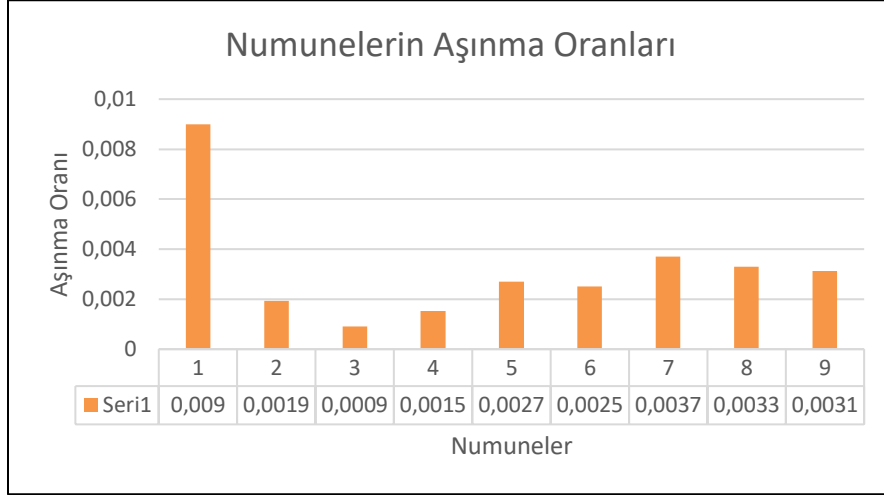
Şekil 3. Numunelerin sürtünen yüzeylerinin görselleri

Aşınma oranı ve CoF analizlerinin verileri toplamak amacıyla L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Deneylerde seçilen parametreler ve seviyeler ise Taguchi yaklaşımı kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 4’de sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda numunelerin kütle kayıpları sunulmaktadır.



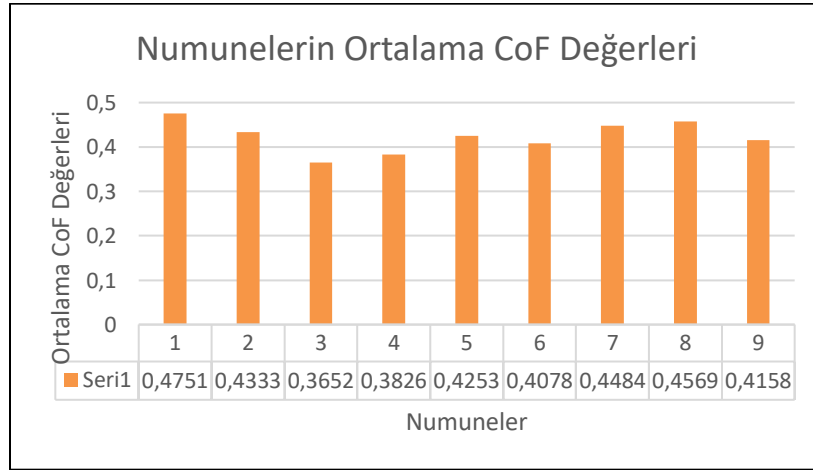
Şekil 4. Numunelerin kütle kayıpları

Şekil 4’deki kütle kayıpları incelendiğinde en yüksek kayıp 0,9 mg ile 30 N yük, 200 rpm devir ve 100 m kayma mesafesine sahip Numune 1’de gözlemlenmiştir. En düşük kütle kaybı ise 30 N yük, 300 rpm devir ve 200 m kayma mesafesine sahip Numune 3’te gözlemlenmiştir. Denklem (1) kullanılarak hesaplanan aşınma oranı ise Şekil 5’te sunulmuştur.



Şekil 5. Numunelerin Aşınma Oranları

Şekil 5 incelendiğinde ise Denklem (1) kullanılarak hesaplanan en düşük aşınma oranı Numune 3’te, en yüksek aşınma oranı ise Numune 1’de gözlemlenmiştir. Aşınma Oranının incelenmesinin ardından deney sonucunda numunelerin CoF değerleri incelendi. Test edilen numunelerin CoF değerleri UTS Tribolog şirketi tarafından temin edilen ve kullanılan tribometreyle uyumlu bir yazılım yardımıyla cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Numunelerin CoF değerleri Şekil 6’te sunulmuştur.



Şekil 6. Numunelerin Ortalama CoF Değerleri

Şekil 6 incelendiğinde ise en yüksek CoF değerine Numune 1’in; en düşük CoF değerine ise Numune 3’ün sahip olduğu görülmektedir. Değişken parametrelerin CoF değerlerine üzerine etkisi ise Minitab 17 kullanılarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucu ise Tablo 6’da sunulmuştur. CoF için S/N analizinin sonucu ise Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 6. Parametrelerin CoF Üzerine Etkisi

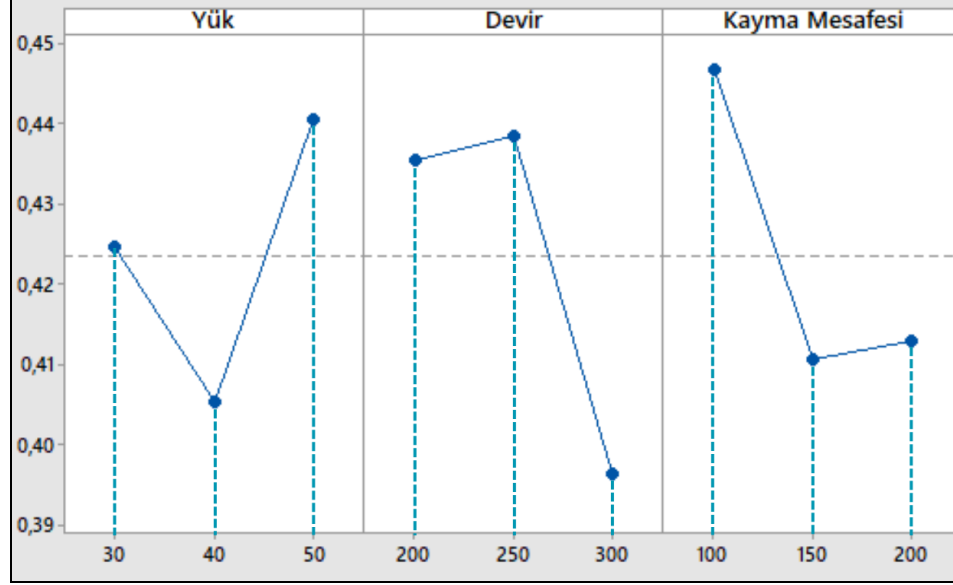
Seviye	Yük	Devir	Kayma Mesafesi
1	0,4246	0,4354	0,4466
2	0,4052	0,4385	0,4106
3	0,4404	0,3963	0,4130
Delta	0,0352	0,0422	0,0360
Rank	3	1	2

Tablo 7. Parametrelerin S/N Oranı

Seviye	Yük	Devir	Kayma Mesafesi
1	7,492	7,259	7,020
2	7,854	7,165	7,743
3	7,131	8,054	7,714
Delta	0,724	0,889	0,724
Rank	3	1	2

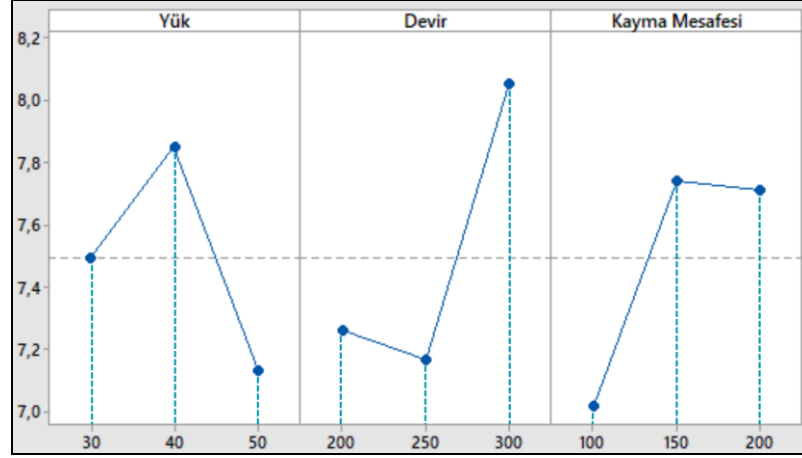
Tablo 6 ve 7 incelendiğinde, 0,0422 delta değeriyle devrin (dönme hızı) seçilen parametreler arasından en baskın etkiye sahip parametre olduğu gözlemlenmiştir. Devir parametresinin kayma mesafesi ve yük ile mukayese edildiğinde CoF üzerinde daha çok etkiye sahip olması da literatürle uyumludur. Ayrıca, devir arttığında normal yöndeki momentum transferi arttığından ve sürtünen yüzeyin yukarı yönde bir kuvvet oluşturması sebebiyle kayma mesafesi CoF üzerinde daha yüksek bir etkiye sahiptir. Oluşan bu kuvvet ise sürtünen yüzeylerin arasındaki mesafeyi artırdığından CoF’u etkilediği düşünülmektedir (Chowdhury vd., 2011). Ardından kayma mesafesi parametresinin ortalama bir etkiye sahip olduğu ve değişken yükün ise en düşük etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 7’de ise değişken parametrelerin Minitab 17 içerisinde ‘en düşük en iyidir’ şartlandırmasıyla CoF’a etkisi gösterilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde seçilen bütün parametrelerin doğrusal ve tutarlı bir eğilime sahip olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla wt %2 grafen katkılı filamentten üretilen numunelerin tribolojik davranışlarına bağımlı olarak çalışma gerçekleştirildiğinde parametrelerin ve seviyelerinin oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7. Değişken Parametrelerin CoF'a Etkisi

Şekil 8'de ise Minitab 17 içerisinde 'en düşük en iyidir' şartlandırmasıyla değişken parametrelerin S/N oranları sunulmuştur. Şekil 8 incelendiğinde ise 0,889 Delta değeri ile devir parametresinin S/N oranı bakımından yük ve kayma mesafesine göre daha etkin olduğu görülmektedir. 0,724 Delta değeri ile S/N oranı bakımından yük ve kayma mesafesinin etkinliğinin eşit olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde farklı test koşullarında gerçekleştirilen testlerde değişken parametrelerin düzenli bir artış ya da azalış olarak CoF'a etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Yük parametresi incelendiğinde, viskoelastik deformasyon özelliği gösterdiği bilinen parametrelerin artan yük altında CoF' değerinin düştüğü bilinmektedir. Ancak, uygulanan yük polimer malzemenin sınıf değerine ulaştığında ya da aştığında polimerlerin kritik yüzey enerjisi neyle CoF ve aşınmanın arttığı gözlemlenmektedir. Dahası, test parametrelerin sürtünen yüzeylerdeki mevcut ısıya doğrudan etkisi olduğundan parametrelerin farklı seviyeleri sıcaklığın değişmesine sebebiyet verecektir. Dolayısıyla da farklı parameter ve seviyeler sürtünen polimerin zincir yapısını değiştirecektir (Unal & Mimaroglu, 2003). Parametre seviyelerinin CoF üzerinde düzenli bir artış ya da azalışa; hem polimerin sınırlarına yaklaşıldığından ya da aşıldığından hem de parametrelerin, polimerin zincir yapısını değiştirilmesinin etkisi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8. Değişken Parametrelerin S/N oranları

4. Sonuç

Mecvut çalışma içerisinde wt %2 grafen katkılı PLA+ malzemenin farklı sürtünme ve aşınma koşullarındaki tribolojik davranışlarını incelemektedir. Gerçekleştirilen inceleme ve analizler sonucunda elde edilen temel çıkarımlar aşağıda listelenmiştir:

- 30 N yük, 200 rpm devir ve 100 m kayma mesafesine sahip Numune 1'in en yüksek aşınma oranına ve CoF değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- 30 N yük, 300 rpm devir ve 200 m kayma mesafesine sahip Numune 3'ün en düşük aşınma oranına ve CoF değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- 0,0422 delta değeri ile devir parametresinin CoF üzerine en etkili parametre olduğu gözlemlenmiştir.
- Parametrelerin seviyelerine göre doğrusal ve tutarlı bir artış ya da azalış olmadığı görülmüştür.
- S/N oranları bakımından inceleme gerçekleştirildiğinde 0,889 Delta değeri ile devir parametresinin en etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışma süresince maddi ve manevi olarak desteğini ve emeğini esirgemeyen Hakan YEŞİLKAYA'ya sonsuz teşekkürleri borç bilirim.

Kaynaklar (References)

- Abir, A. A., & Trindade, B. (2023). A Comparative Study of Different Poly (Lactic Acid) Bio-Composites Produced by Mechanical Alloying and Casting for Tribological Applications. *Materials*, 16(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/ma16041608>
- Ahmed, J., & Varshney, S. K. (2011). Polylactides—Chemistry, Properties and Green Packaging Technology: A Review. *International Journal of Food Properties*, 14(1), 37-58. <https://doi.org/10.1080/10942910903125284>
- Anderson, I. (2017). Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 4(2), 110-115. <https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0054>
- Aydin, E. (2023). Taguchi Optimizasyon Metodunun İmalat Mühendisliği Alanında Kullanımı: Minitab Örneği. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 28(3), 1049-1068. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1314990>
- Azadi, M., Dadashi, A., Dezhianian, S., Kianifar, M., Torkaman, S., & Chiyani, M. (2021). High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing. *Forces in Mechanics*, 3, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100016>
- Carrasco, F., Pagès, P., Gámez-Pérez, J., Santana, O. O., & Maspoch, M. L. (2010). Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 95(2), 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.045>
- Chowdhury, M. A., Khalil, M. K., Nuruzzaman, D. M., & Rahaman, M. L. (2011). *The Effect of Sliding Speed and Normal Load on Friction and Wear Property of Aluminum*. 11(01).
- Ćwikła, G., Grabowik, C., Kalinowski, K., Paprocka, I., & Ociepka, P. (2017). The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 227(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/227/1/012033>
- Dou, H., Ye, W., Zhang, D., Cheng, Y., & Tian, Y. (2022). Compression Performance with Different Build Orientation of Fused Filament Fabrication Polylactic Acid, Acrylonitrile Butadiene Styrene, and

Polyether Ether Ketone. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(3), 1925-1933.

<https://doi.org/10.1007/s11665-021-06363-2>

El Magri, A., Vanaei, S., Shirinbayan, M., Vaudreuil, S., & Tcharkhtchi, A. (2021). An Investigation to Study the Effect of Process Parameters on the Strength and Fatigue Behavior of 3D-Printed PLA-Graphene.

Polymers, 13(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/polym13193218>

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392.

<https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>

Fasel, U., Keidel, D., Baumann, L., Cavolina, G., Eichenhofer, M., & Ermanni, P. (2020). Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures. *Manufacturing Letters*, 23, 85-88.

<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.12.004>

Filameon. (t.y.). Geliş tarihi 15 Ekim 2024, gönderen <https://www.filameon.com/>

Gangadharan, G., Trivedi, S., & Vashi, O. (2024). Taguchi method AWJM optimal solution analysis on Al7050.

AIP Conference Proceedings, 3107(1), 110009. <https://doi.org/10.1063/5.0213362>

Gbadeyan, O. J., Mohan, T. P., & Kanny, K. (2021). Tribological Properties of 3D Printed Polymer Composites-Based Friction Materials. İçinde H. Jena, J. K. Katiyar, & A. Patnaik (Ed.), *Tribology of Polymer and Polymer Composites for Industry 4.0* (ss. 161-191). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3903-6_9

Gonabadi, H., Yadav, A., & Bull, S. J. (2020). The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(3), 695-709. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138-4>

Grémare, A., Guduric, V., Bareille, R., Heroguez, V., Latour, S., L'heureux, N., Fricain, J.-C., Catros, S., & Le Nihouannen, D. (2018). Characterization of printed PLA scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 106(4), 887-894. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36289>

- Hiremath, S. V., Hiremath, C. R., & Tikotkar, R. G. (2020). Optimization of tribological property of carbon fiber reinforced nano filler filled polymer composites using Taguchi method. *AIP Conference Proceedings*, 2274(1), 030035. <https://doi.org/10.1063/5.0023102>
- Huang, B., Aslan, E., Jiang, Z., Daskalakis, E., Jiao, M., Aldalbahi, A., Vyas, C., & Bártolo, P. (2020). Engineered dual-scale poly (ϵ -caprolactone) scaffolds using 3D printing and rotational electrospinning for bone tissue regeneration. *Additive Manufacturing*, 36, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101452>
- Huang, B., Vyas, C., Byun, J. J., El-Newehy, M., Huang, Z., & Bártolo, P. (2020). Aligned multi-walled carbon nanotubes with nanohydroxyapatite in a 3D printed polycaprolactone scaffold stimulates osteogenic differentiation. *Materials Science and Engineering: C*, 108, 110374. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110374>
- Hussain, H. S., Ridzuan, M. J. M., Abdul, M., Rahman, M. T. A., Ismail, M., Khasri, A., & Yudhanto, F. (2024). Effects of nanofillers on the wear and frictional properties of cellulosic fibre-reinforced composites under varying applied loads. *FME Transactions*, 52(3), 461-470. <https://doi.org/10.5937/fme2403461H>
- Khouri, N. G., Bahú, J. O., Blanco-Llamero, C., Severino, P., Concha, V. O. C., & Souto, E. B. (2024). Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications – A review of the literature. *Journal of Molecular Structure*, 1309, 138243. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138243>
- Kumar, N., Sharma, A., Manoj, M. K., & Ahn, B. (2024). Taguchi optimized wear and self-lubricating properties of Al-alloy composite reinforced with hybrid B4C–MoS2 particulates. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 4142-4151. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.006>
- Laraba, S. R., Rezzoug, A., Avcu, E., Luo, W., Halimi, R., Wei, J., & Li, Y. (2023). Enhancing the tribological performance of PLA-based biocomposites reinforced with graphene oxide. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 148, 106224. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106224>
- Meng, Y., Xu, J., Ma, L., Jin, Z., Prakash, B., Ma, T., & Wang, W. (2022). A review of advances in tribology in 2020–2021. *Friction*, 10(10), 1443-1595. <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>

- Mishra, R. K., & Abdulrahman, S. T. (2018). Tribological Performance of Polymer Composite Materials. İçinde *Advanced Polymeric Materials*. River Publishers.
- Nanografi. (t.y.). Geliş tarihi 28 Nisan 2025, gönderen <https://nanografi.com/>
- Patrício, T., Domingos, M., Gloria, A., & Bártolo, P. (2013). Characterisation of PCL and PCL/PLA *Scaffolds* for Tissue Engineering. *Procedia CIRP*, 5, 110-114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.022>
- Pradhan, S., Kumar Sahu, S., Pramanik, J., & Dhar Badgayan, N. (2022). An insight into mechanical & thermal properties of shape memory polymer reinforced with nanofillers; a critical review. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1107-1112. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.504>
- Rice, S. L., & Moslehy, F. A. (1997). Modeling friction and wear phenomena. *Wear*, 206(1), 136-146. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07360-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07360-7)
- Sedničková, M., Pekařová, S., Kucharczyk, P., Bočkaj, J., Janigová, I., Kleinová, A., Johech-Mošková, D., Omaníková, L., Perďochová, D., Koutný, M., Sedlařík, V., Alexy, P., & Chodák, I. (2018). Changes of physical properties of PLA-based blends during early stage of biodegradation in compost. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 434-442. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.078>
- Sundarasetty, H., & Sahu, S. K. (2025). Tribological behavior of PLA reinforced with boron nitride nanoparticles using Taguchi and machine learning approaches. *Results in Engineering*, 26, 104772. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104772>
- Şirin, Ş., Aslan, E., & Akincioğlu, G. (2022). Effects of 3D-printed PLA material with different filling densities on coefficient of friction performance. *Rapid Prototyping Journal*, 29(1), 157-165. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2022-0081>
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes*. <https://trid.trb.org/View/1179550>
- Unal, H., & Mimaroglu, A. (2003). Influence of test conditions on the tribological properties of polymers. *Industrial Lubrication and Tribology*, 55(4), 178-183. <https://doi.org/10.1108/00368790310480362>
- Vyas, C., Ates, G., Aslan, E., Hart, J., Huang, B., & Bartolo, P. (2020). Three-Dimensional Printing and Electrospinning Dual-Scale Polycaprolactone Scaffolds with Low-Density and Oriented Fibers to

Promote Cell Alignment. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 7(3), 105-113.

<https://doi.org/10.1089/3dp.2019.0091>

Zhang, Y., Liang, F., Lin, Y., Chen, X., & Zhu, Y. (2024). Mitigating friction and wear by pre-designed or tribo-induced heterostructures: An overview. *Materials Research Letters*, 12(8), 535-550.

<https://doi.org/10.1080/21663831.2024.2356282>

Zhiani Hervan, S., Altunkaynak, A., & Parlar, Z. (2021). Hardness, friction and wear characteristics of 3D-printed PLA polymer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*, 235(8), 1590-1598.

<https://doi.org/10.1177/1350650120966407>