

## Eriyik Yığıma Modellemesi ile Üretimde Takviyesiz ve Takviyeli PLA Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması

Mahir UZUN<sup>1</sup>, Yusuf Eren ERDOĞDU<sup>1\*</sup>

**ÖZET:** Son yıllarda eriyik yığıma modellemesi (EYM) ilkeleriyle çalışan 3 boyutlu (3B) yazıcıların kullanımı birçok alanda yaygınlaşmıştır. Bu teknoloji sayesinde başta prototipler olmak üzere karmaşık şekilli parçalar dahi kısa sürede ve hassas şekilde üretilebildiğinden çoğu sektörde araştırma geliştirme (AR-GE) çalışmalarının olmazsa olmazı haline gelmiştir. EYM işlemiyle birlikte çevresel kaygıların da etkisiyle doğada çözünümü kolay olan (biyobozunur) polilaktik asit (PLA) filamentlerin kullanımı önemli hale gelmiştir. Bundan dolayı PLA filamentlere çeşitli takviyeler yapılarak bazı özelliklerinin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması önem arz etmektedir. Bu çalışmada da takviyesiz, %20 bakır takviyeli ve %20 karbon-fiber takviyeli PLA kompozitler 3B yazıcı ile üretilmiştir. Üretilen numuneler çekme testine ve üç nokta eğilme testine tabi tutularak mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. PLA malzemeye bakır ve karbon fiber takviyeler yapmanın çekme ve eğilme dayanımlarını düşürdüğü görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Karbon fiber takviyeli PLA, bakır takviyeli PLA, mekanik özellikler, EYM.

### Investigation of the Effect of Using Unreinforced and Reinforced PLA in Production by Fused Deposition Modeling on Mechanical Properties

**ABSTRACT:** In recent years, the use of 3-dimensional (3D) printers working with the principles of fused deposition modeling (FDM) has become widespread in many areas. Thanks to this technology, even complex shaped parts, especially prototypes, can be produced in a short time and precisely, so it has become a must for research and development (R & D) studies in many sectors. With the FDM process, the use of polylactic acid (PLA) filaments, which are easy to dissolve in nature (biodegradable), has become important with the effect of environmental concerns. Therefore, it is important to make various reinforcements to PLA filaments to improve some of their properties and to expand their use. In this study, non-reinforced, 20% copper reinforced and 20% carbon fiber reinforced PLA composites were produced by 3D printer. The produced samples were subjected to tensile test and three point bending test and their mechanical properties were compared. It was observed that adding copper and carbon fiber reinforcements to PLA material reduces the tensile and bending strengths.

**Keywords:** Carbon fiber reinforced PLA, copper reinforced PLA, mechanical properties, FDM.

<sup>1</sup> Mahir UZUN (Orcid ID: 0000-0002-0907-6875), Yusuf Eren ERDOĞDU (Orcid ID: 0000-0003-3255-8466), İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

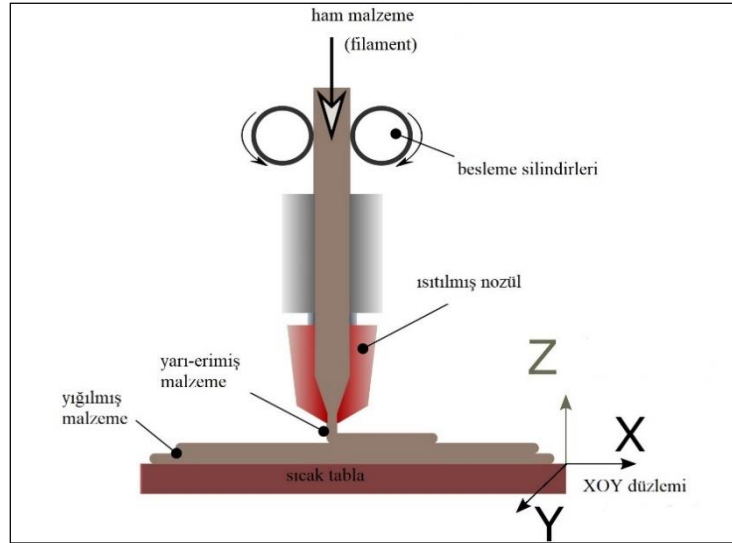
\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Yusuf Eren ERDOĞDU, e-mail: eren.erdogdu@inonu.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 24-09-2020

Kabul tarihi / Accepted: 15-10-2020

## GİRİŞ

Günümüzde gittikçe keskinleşen endüstriyel rekabet koşullarından dolayı hızlı prototipleme işlemi çok önemli hale gelmiştir. Parçanın 3 boyutlu bilgisayar destekli tasarım modeline göre termoplastik polimerlerin biriktirilmesi ile 3 boyutlu geometrileri katman katman oluşturan ekstrüzyon tabanlı bir eklemeli imalat (Eİ) yöntemi olarak tanımlanan (Sağbaşı, 2018) ve şekil 1’de şematik olarak gösterilen EYM, birçok hızlı prototipleme tekniği arasında kullanım kolaylığı, ucuz ekipman ve imal edilen parçalarının dayanıklılığı nedeniyle hızlı prototipleme için en uygun süreç olarak kabul edilir (Sood ve ark., 2012).



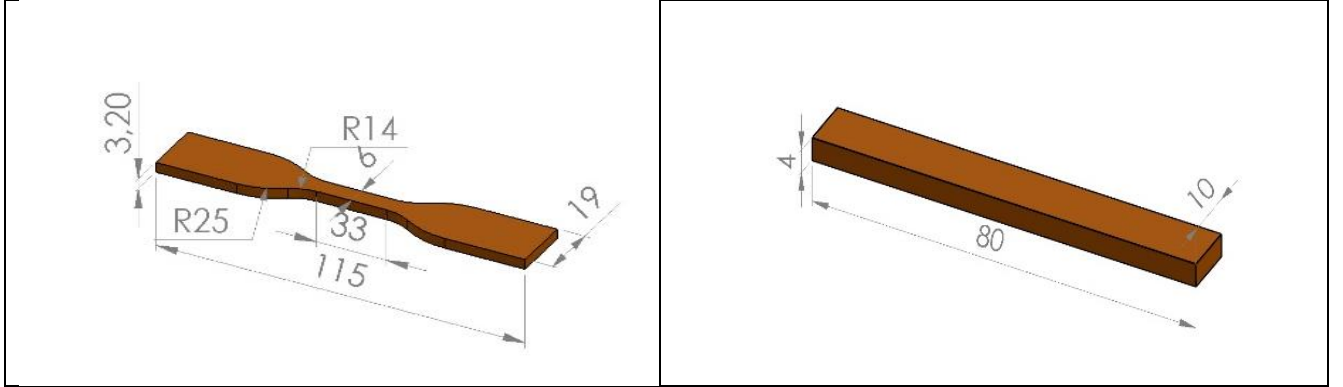
Şekil 1. EYM prosesinin şematik gösterimi (Gomez-Gras ve ark., 2018)

EYM işleminde çok çeşitli malzemeler kullanılabilir, ancak polikarbonat (PC), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asit (PLA) gibi farklı ticari polimerler, düşük erime sıcaklıklarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Ayatollahi ve ark., 2020). Bu polimerlerden PLA, bitkilerin fotosentez sırasında sentezlediği büyük bir karbonhidrat olan nişasta gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen doğal bir polimer olduğundan, tamamen alifatik bir polimer olması nedeniyle belirli uygulamalar için fosil bazlı polimerlerin yerine kullanılabilir olduğundan ve 3 boyutlu yazdırılmaya daha uygun bir malzeme olduğundan (Valerga ve ark., 2018) ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, PLA'nın kırılkan olması, düşük darbe direnci ve ticari uygulamalarda yüksek maliyetli olması gibi dezavantajları da vardır (Kaya ve ark., 2019). Bu nedenle bu malzemenin diğer ticari polimerlerle rekabet edebilir özelliklere ulaşması için çeşitli takviyelerle desteklenmesi ile ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır (Hinchcliffe ve ark., 2016; Ferreira ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2019; Liu ve ark., 2019; Arpan ve Hoong, 2019; Dobrescu ve ark., 2019).

Bu çalışmada da EYM kullanılarak üretilen takviyesiz PLA, bakır takviyeli PLA ve karbon fiber takviyeli PLA kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

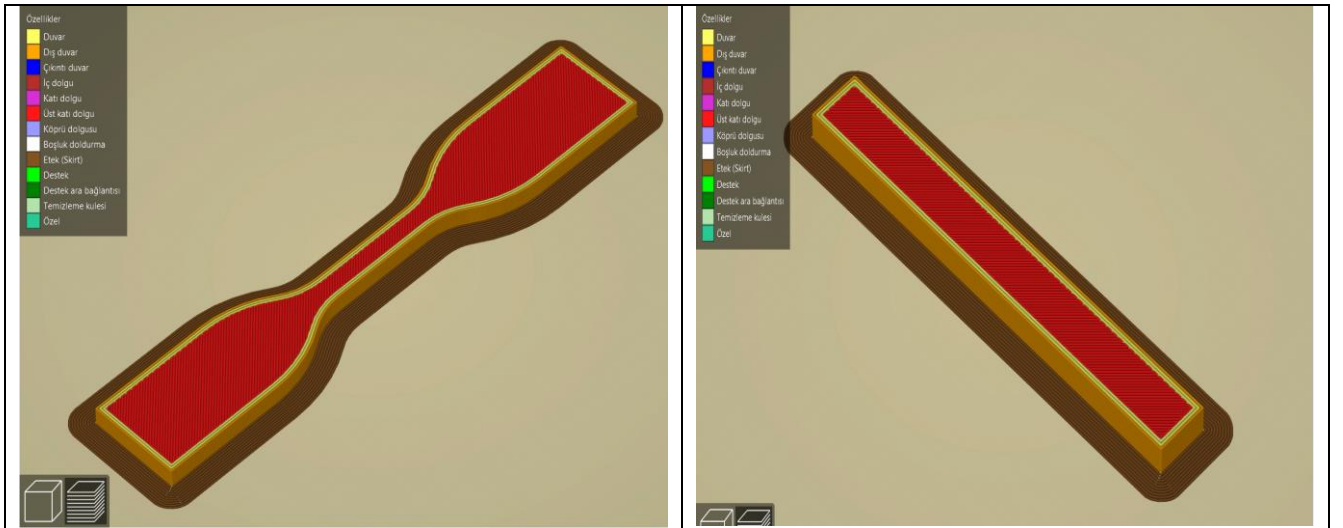
Bu çalışmada hammadde olarak 1,75 mm çapında Frosch markalı PLA, %20 bakır takviyeli PLA ve %20 karbon fiber takviyeli PLA filamentler kullanılmıştır. İlk olarak Solid Works 2019 bilgisayar destekli tasarım (BDT) programıyla ASTM D638 (ASTM, 2014) standardına göre tip IV çekme testi numuneleri (Şekil 2.a) ve BS EN ISO 178 (BS EN ISO, 2003) standardına göre üç nokta eğilme testi numuneleri (Şekil 2.b) üç boyutlu olarak tasarlanmıştır.



Şekil 2. a) Çekme testi numunesi

b) 3 nokta eğilme testi numunesi

Hazırlanan BDT datası YADA SLICER dilimleme programı kullanılarak dilimlenmiştir(Şekil 3). Dilimleme sonucunda imalat için gerekli g kodları türetilmiştir. Bu kodlar, YADA 3 boyutlu (3B) yazıcıya aktarıldıktan sonra EYM ile Çizelge 1’de gösterilen parametreler kullanılarak çekme ve üç nokta eğilme testi numuneleri imal edilmiştir(Şekil 4).



Şekil 3. a) Dilimlenmiş çekme testi numunesi

b) Dilimlenmiş 3 nokta eğilme testi numunesi

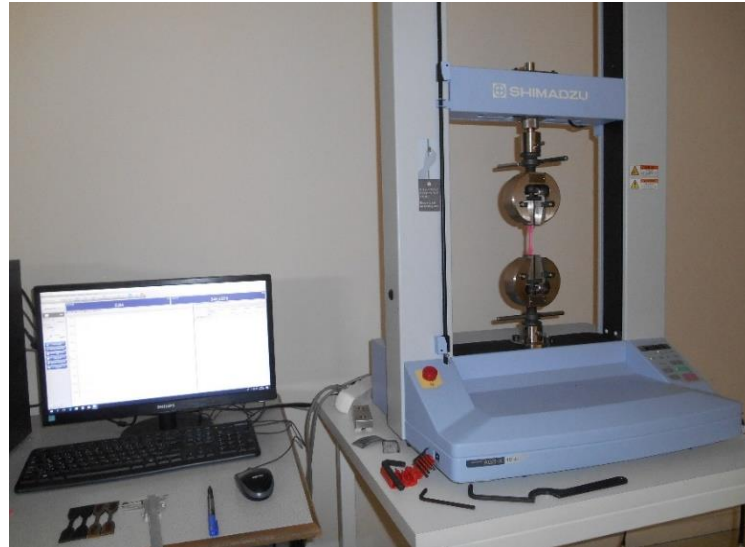


Şekil 4. 3B yazıcı ile üretilmiş çekme numuneleri

**Çizelge 1.** EYM ile 3B baskı parametreleri

İşlem Parametresi	
Doldurma açısı	45(°)
Katman yüksekliği	220(μm)
Nozül sıcaklığı	220(°C)
Tabla sıcaklığı	60(°C)
Dolgu yüzdesi	100(%)
Dolgu deseni	Düz çizgili
Çerçeve sayısı	4
Baskı hızı	55(mm sn <sup>-1</sup> )

Numunelere 10 kN yük kapasiteli Shimadzu AGS-X çekme cihazı kullanılarak çeneler arası mesafe 65 mm olacak şekilde çekme testi uygulanmıştır (Şekil 5). Testler 5 mm dak<sup>-1</sup> çekme hızında numunelerde kopma hasarı oluşuncaya kadar sürdürülmüştür. PLA, bakır takviyeli PLA ve karbon fiber takviyeli PLA olmak üzere her 3 tip numuneden 3'er adet numune teste tabi tutulmuş ve çekme testi sonrası mekanik özellikleri kıyaslanmıştır.



Şekil 5. Çekme testi düzeneği

Çekme testleri tamamlandıktan sonra aynı cihaz üzerinde üç nokta eğilme testleri yapılmıştır (Şekil 6). Numuneler 64 mm destek mesafesinde 2 mm dak<sup>-1</sup> eğilme hızında teste tabi tutulmuştur.



Şekil 6. Üç nokta eğilme testi görünümü

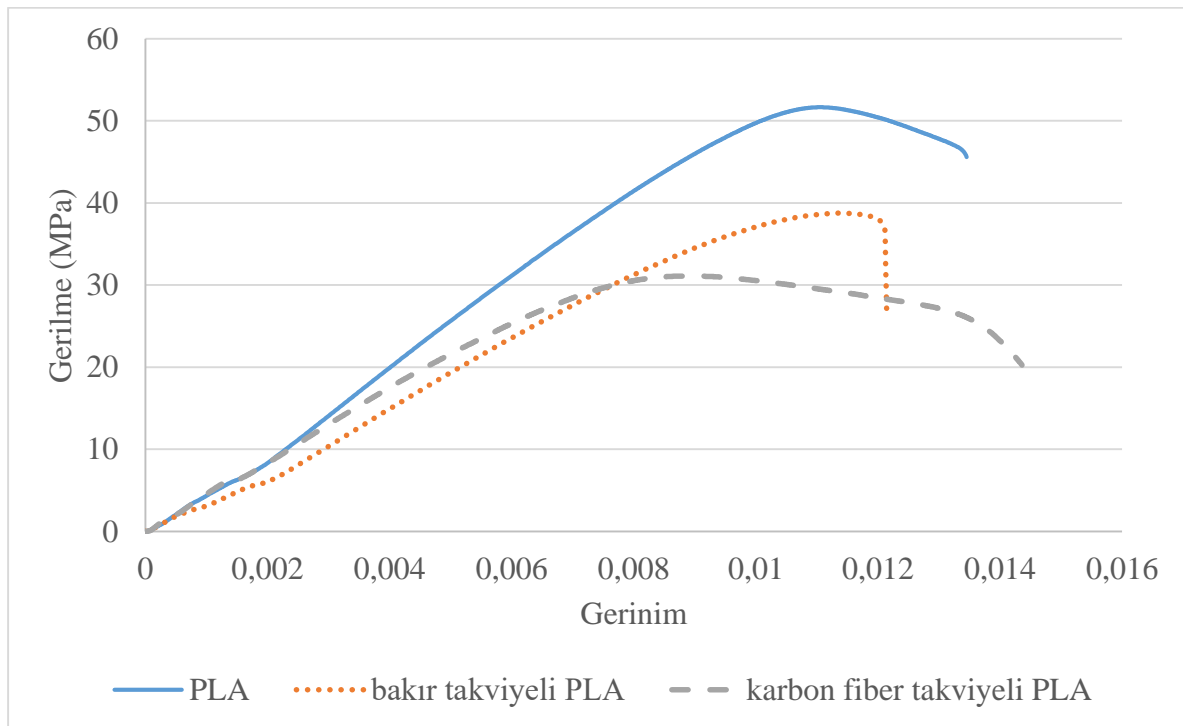
Mekanik testlerin sonrasında çekme testi numunelerinin kopma hasarı olan bölgeleri ve filamentlerden alınan örnekler altın-paladyum tozlarıyla kaplanarak hazırlandıktan sonra 20 kW'lık LEO EVO 40 taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmiştir. TEM görüntüleri alınmış ve bulgular mekanik testlerle paralel olarak incelenmiştir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Çekme deneyleri için her 3 malzeme tipinde 3'er adet çekme deneyi numunesi üretilmiş ve deneye tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak çizelge 2'de sunulmuştur. Ayrıca numunelere ait kuvvet-uzama değerlerinin ortalaması hesaplanarak şekil 7'deki gerilme-gerinim grafiği oluşturulmuştur.

**Çizelge 2.** Çekme testi sonuçları

Numune Numarası	Maksimum Büyüklük	PLA	Bakır Takviyeli PLA	Karbon Fiber Takviyeli PLA
1	Çekme Gerilmesi (Mpa)	51.5814	36.5178	29.0943
	Kuvvet (N)	1015.12	806.313	572.577
	Uzama (mm)	1.3471	1.28397	1.12563
2	Çekme Gerilmesi (Mpa)	53.6874	39.9343	30.2094
	Kuvvet (N)	1065.16	881.748	598.901
	Uzama (mm)	1.2447	1.31383	0.97553
3	Çekme Gerilmesi (Mpa)	50.7861	39.9397	31.0324
	Kuvvet (N)	1015.09	881.867	615.217
	Uzama (mm)	1.2598	1.33717	1.0147
Ortalama	Çekme Gerilmesi (Mpa)	<b>52.0183</b>	<b>38.7972</b>	<b>30.112</b>
	Kuvvet (N)	<b>1031.79</b>	<b>856.6426</b>	<b>595.565</b>
	Uzama (mm)	<b>1.2838</b>	<b>1.3116</b>	<b>1.0386</b>



**Şekil 7.** Çekme testi sonuçlarına ait gerilme-gerinim grafiği

Şekil 7’de PLA numunelerin elastisite modüllerinin (E) karbon fiber takviyeli ve bakır takviyeli PLA numunelerden daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca eğrilerin yön değiştirdiği akma bölgelerinden sonraki plastik şekil değiştirme bölgesine bakıldığında bakır takviyeli PLA numunelerin daha gevrek kırıldığı görülmektedir. Şekil 8’deki numune örnekleri de grafikten yorumlanan bu durumu doğrulamaktadır. Çizelge 2 ve şekil 7’deki verilere bakıldığında PLA numunelerin çekme dayanımlarının takviyeli PLA numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bakır takviyeli numunelerin çekme dayanımları ise karbon fiber takviyeli PLA numunelerinkinden yüksektir.



**Şekil 8.** Çekme testi sonrası numune örnekleri  
a) PLA, b) bakır takviyeli PLA, c) karbon fiber takviyeli PLA

Şekil 8’de görüldüğü gibi takviyesiz PLA numuneler takviyeli PLA numunelere kıyasla daha sünek şekilde kopmuştur. Bakır takviyeli PLA Şekil 8 b)’den de görüleceği üzere gevrek şekilde kopmuştur. Karbon fiber takviyeli PLA numunelerde ise 90° açılı duvar kısmındaki katmanların daha geç koptuğu gözlenmiştir (Şekil 8 c)). Bu durum arayüz yapışmasının 90° açılı katmanlarda daha iyi olduğuna işaret etmektedir.

Çekme deneylerindeki gibi her 3 malzeme tipinde 3’er adet eğilme deneyi numunesi üretilmiş ve üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur(Şekil 9).



Şekil 9. Üç nokta eğilme testi sonrası numune örnekleri  
a) PLA, b) bakır takviyeli PLA, c) karbon fiber takviyeli PLA

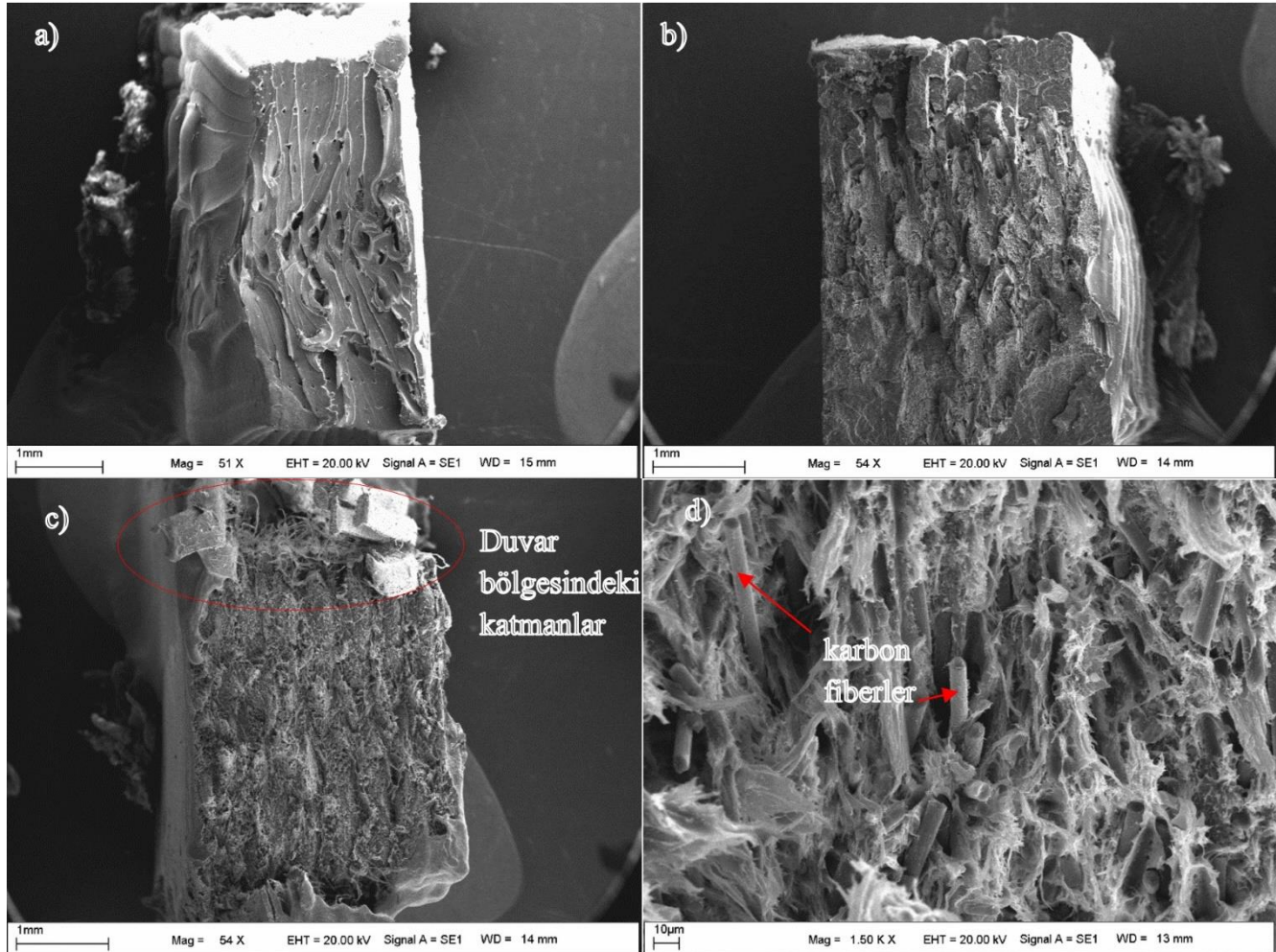
Çizelge 3. Üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Numarası	Maksimum Büyüklük	PLA	Bakır Takviyeli PLA	Karbon Fiber Takviyeli PLA
1	Eğilme Gerilmesi (Mpa)	73.0325	58.9665	38.2438
	Kuvvet (N)	122.329	98.7689	64.0583
	Sehim (mm)	7.1738	5.1533	5.9402
2	Eğilme Gerilmesi (Mpa)	66.6547	51.395	36.4512
	Kuvvet (N)	111.647	86.0866	61.0558
	Sehim (mm)	7.1486	4.5035	6.0175
3	Eğilme Gerilmesi (Mpa)	72.2259	55.1983	32.1089
	Kuvvet (N)	120.978	92.4571	53.7825
	Sehim (mm)	6.9062	4.8255	5.2812
Ortalama	Eğilme Gerilmesi (Mpa)	<b>70.6377</b>	<b>55.1866</b>	<b>35.6013</b>
	Kuvvet (N)	<b>118.318</b>	<b>92.4375</b>	<b>59.6322</b>
	Sehim (mm)	<b>7.0762</b>	<b>4.8274</b>	<b>5.7463</b>

Üç nokta eğilme deneyi sonuçları çizelge 3'te sunulmuştur. Çizelge 3'ten de görüldüğü gibi eğilme dayanımı en yüksek olan numuneler PLA numunelerdir ve karbon fiber takviyeli PLA numunelerin eğilme dayanımı en düşüktür. Üç nokta eğilme testlerinde şekil 9'dan ve çizelge 3'ten görüldüğü gibi PLA numuneler daha elastik davranmıştır ve bakır takviyeli PLA numuneler ise en az elastik davranan numunelerdir. Şekil 9 b)'de bakır takviyeli PLA numunelerin eğilme testlerini kopma ile tamamladıkları görülmektedir.

Şekil 8'de kırmızı elips ile gösterilen kopma hasarlı bölgelerin TEM görüntüleri alınarak Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10 'a bakıldığında a)'daki PLA numune yüzeyinin daha düzgün olduğu, b) ve c)'deki takviyeli PLA numunelerin yüzeylerinin ise daha gözenekli olduğu görülmektedir. Bu durum takviye ile PLA arasındaki arayüz yapışmasının daha zayıf olduğunu göstermektedir. Takviyelerin matrisin sürekliliğini bozması ve matristen kolay sıyrılabilmesinden dolayı kırılmalar takviye yüzeyinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle takviyeler matrise gömülü olarak değil de belirgin şekilde ayrılmış

olarak görünmektedir. Bu durum da kırılma yüzeyinin düz değil de gözenekli şekilde görünmesine yol açmaktadır. Ayrıca Şekil 10 d)'ye bakıldığında karbon fiberlerin dış yüzeylerinde PLA matristen parça kalmadan kopma olayının gerçekleştiği net olarak görülmektedir. Bu durum da arayüz yapışmasının zayıfladığına işaret etmektedir.



Şekil 10. Çekme testi sonrası hasarlı bölgelerin TEM görüntüleri a) PLA, b) bakır takviyeli PLA, c) ve d) karbon fiber takviyeli PLA

## SONUÇ

Bu çalışmada EYM ile 3B yazıcı kullanılarak üretilen PLA, bakır takviyeli PLA ve karbon fiber takviyeli PLA numunelerin mekanik özellikleri kıyaslanarak farklı takviyeler yapmanın PLA malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- I) PLA malzemeye bakır ve karbon fiber takviye yapılması malzemenin çekme ve eğilme dayanımını düşürmektedir. Yapılan takviyeler matrisin sürekliliğini azalttığından ve arayüz yapışmasını zayıflattığından genel olarak mekanik özelliklerde negatif değişimlere neden olmaktadır.
- II) PLA malzemelere bakır takviyesi yapılması karbon fiber takviye yapılmasına göre daha yüksek çekme ve eğilme dayanımı sağlamaktadır.
- III) PLA malzemeye bakır takviyesi yapılması malzemenin elastikliğini azaltmaktadır.



**KAYNAKLAR**

- Arpan MFZIM, Hoong LJ, 2019. Effect of Printing Temperature on Mechanical Properties of Copper Metal Polylactide Acid. AIP Conference Proceedings, 2137:1.
- ASTM, 2014. D 638. Standard test method for tensile properties of plastics. American Society for Testing and Materials Standard.
- Ayatollahi MR, Nabavi-Kivi A, Bahrami B, Yahya MY, Khosravani MR, 2020. The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens. Engineering Fracture Mechanics, 237:107225.
- BS EN ISO 178,2003. Plastics determination of flexural properties. British Standard.
- Dobrescu T, Pascu NE, Jiga G, Simion I, Adır V, Enciu G, Tudose DI, 2019. Tensile Behavior of PLA and PLA Composite Materials Under Different Printing Parameters. Materiale Plastice, 56 (4):783.
- Ferreira RTL, Amatte IC, Dutra TA, Bürger D, 2017. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. Composites Part B, 124:88-100.
- Gomez-Gras G, Jerez-Mesa R, Travieso-Rodriguez JA, Lluma-Fuentes J, 2018. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. Materials and Design, 140:278-285.
- Hinchcliffe SA, Hess KM, Srubar III WV, 2016. Experimental and theoretical investigation of prestressed natural fiber-reinforced polylactic acid (PLA) composite materials. Composites Part B, 95:346-354.
- Kaya MF, Kayataş Demir N, Hüner B, Özcan RU, 2019. Effect of copper coating on the physical and electrochemical properties of conductive pla filament. International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 3:2:128-136.
- Liu Z, Lei Q, Xing S, 2019. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. Journal of Materials Research and Technology, 8(5):3741-3751.
- Sağbaş B, 2018. Surface texture characterization and parameter optimization of fused deposition modelling process. Düzce University Journal of Science & Technology, 6: 1028-1037.
- Sood AK, Equbal A, Toppo V, Ohdar RK, Mahapatra SS, 2012. An investigation on sliding wear of FDM built parts. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5:48-54.
- Valerga AP, Batista M, Salguero J, Girot F, 2018. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. Materials, 11:1322.
- Zhang X, Chen L, Mulholland T, Osswald TA, 2019. Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling. SN Applied Sciences, 1:616.