



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri

### *Effects of filling percentage on mechanical properties of PLA and PET materials*

Yazar(lar) (Author(s)): Hatice EVLEN<sup>1</sup>, Merve Ayfer ÖZDEMİR<sup>2</sup>, Aydın ÇALIŞKAN<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-8214-6286

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-5406-6879

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-5639-637X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Evlen H., Özdemir M. A. ve Çalışkan A., “Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1031-1037, (2019).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.426413

# Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Hatice EVLEN<sup>1\*</sup>, Merve Ayfer ÖZDEMİR<sup>2</sup>, Aydın ÇALIŞKAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Müh. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Müh. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

## ÖZ

Gerçekleştirilen çalışmada, yığılma teknolojisi ile üretim yapan bir yazıcı modellemek ve modellenen üç boyutlu yazıcıda doluluk oranının mekanik özellikler üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında kartezyen tipi açık kaynaklı bir üç boyutlu yazıcı modellenmiştir. Prototip imalatı yapılan üç boyutlu yazıcı kullanılarak PET ve PLA malzemelerin %10, 20, 30, 40 ve %50 doluluk oranlarında mekanik test numuneleri yazdırılmıştır. Elde edilen numuneler tek eksenli çekme testleri tabii tutulmuş, sertlik ve pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler neticesinde PET ve PLA malzemelerde sertlik değerinin malzemenin doluluk oranı ile doğru orantılı olduğu, doluluk oranı arttıkça malzemelerin sertliklerinin de arttığı görülmüştür. PLA ve PET malzemelerden üretilen numunelerin pürüzlülük ve çekme değerlerinin birbiriyle ters orantılı olduğu, pürüzlülük ve çekme mukavemeti değerlerinin %30 doluluk oranından itibaren %10 ve %20 doluluk oranındaki aksine yönde seyrettiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Doluluk oranı, PET, PLA, pürüzlülük, sertlik.

## Effects of Filling Percentage on Mechanical Properties of PLA and PET Materials

### ABSTRACT

In this study, it is aimed to design a printer which has fused deposition technology and determine experimentally the effect of infill percentage on the mechanical properties with samples produced on the printer. A Cartesian type and open source three dimensional printer was modelled. Mechanical test samples were printed at 10, 20, 30, 40 and 50% infill percentage of PET and PLA materials using a three-dimensional printer manufactured as a prototype. Using the obtained samples, uniaxial tensile tests, hardness and surface roughness values were measured. As a result of the measurements, the hardness values of PET and PLA materials were directly related to the infill percentage of the material, and the hardness of the materials increased as the filling percentage increased. It was observed that roughness and tensile values of PLA and PET materials were inversely related to each other and roughness and tensile strength values were observed in the opposite direction from 30% infill percentage to 10% and 20% infill percentage.

**Keywords:** Infill percentage, PET, PLA, surface roughness, hardness.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üç boyutlu yazıcılar, 3 boyutlu olarak çizilen geometriyi katı, elle tutulabilir gerçek objelere dönüştürebilen makinelerdir. Eklemeli imalat (additive manufacturing) olarak da bilinen bu teknolojinin en büyük avantajı geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen karmaşık yapıdaki geometrilerin kalıba ya da başka herhangi bir araca ihtiyaç duymadan üretilmesidir. Eklemeli imalat teknolojileri hammaddenin katman katman yığılması mantığına dayanmaktadır.

Üç boyutlu olarak herhangi bir CAD programında modellenen nesne “.STL (stereolithography)” formatında kaydedilir. Böylece model, parçayı bölüntüleme işlemini yapacak programa gönderilmeye hazır hale getirilmiş olur. Üç boyutlu model oluşturma aşamasından sonra modelin 3B’lu yazıcıya transferi için arayüz programına aktarılması gerekmektedir. Böylelikle 3B’lu nesnenin doluluk oranı, dolgu geometrisi, katman yüksekliği gibi

yazdırma parametreleri kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Arayüz programında yazdırma parametreleri belirlenen model dilimleme işlemine tabii tutulur. Bunun neticesinde yazıcı uç yolları ve üretim kodları üretilmiş olur. Genellikle tescilli ve markalı 3B’lu yazıcılar kendileri için tasarlanmış arayüz programları ile satışa sunulmaktadırlar. Ancak açık kaynaklı yazıcılar için de ücretli ve ücretsiz birçok farklı arayüz programı mevcuttur. Skeinforge, RepRap Host, SuperSkein, Slicer, Cura, KiSSlicer, Repetier Host ücretsiz açık kaynaklı programlardır.

Günümüzde üç boyutlu yazıcı teknolojisi; tıbbi ekipman ve yapay organ üretiminde, endüstriyel ve mimari tasarımlarda, inşaat mühendisliğinde, yapı işlerinde, otomotiv sanayisinde, havacılık ve uzay endüstrisinde, dişçilikte, eğitimde, coğrafik topografya çalışmalarında ve daha birçok farklı alanda yapılan bilimsel çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Araştırmacılar eklemeli imalat teknolojisinin farklı tür ve yazdırma parametrelerini kıyaslayan birçok yaygın

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : hkgul@karabuk.edu.tr

yapmışlardır. Eklemeli imalat teknolojileriyle ilgili yapılan araştırmalarda kullanım kolaylığı, ulaşılabilirlik ve sarf malzeme maliyetinin düşük olması açısından özellikle Eriyik Yığıma Modelleme (Fused Deposition Modelling-FDM) teknolojisi tercih edilmiştir. Yapılan çalışmada genel olarak FDM teknolojisinin ürünün mekanik özellikleri [1-3], geometrik ve boyutsal hassasiyeti [4], yüzey pürüzlülüğü [5], üzerine etkileri incelenirken, FDM teknolojisinin genel özellikleri [6, 7], farklı modelleme metotlarıyla kıyaslanması [8] ve ürünün yazıcı tablasındaki konumlandırmasının mekanik özellikler üzerine etkileri [9] de incelenmiştir. Üç boyutlu yazıcılarla ilgili yapılan çalışmaların birçoğunun baskı kalitesini artırmak ve en iyi baskı parametrelerini tespit etmek üzere yapıldığı söylenebilmektedir. Araştırmacılar baskı teknolojisinin ve baskı parametrelerinin yanı sıra sarf malzeme üzerinde yapılan iyileştirme çalışmalarının da ürünün kalitesini artırdığını tespit etmişlerdir. Stephens ve arkadaşları [10] üç boyutlu yazıcı malzemelerinin tane boyutunu küçültmekle daha iyi kalitede ürün elde etmeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bunların yanında FDM teknolojisinde kullanılan biyo malzemeler, nano malzemeler ve polimer matrisli kompozitlerin hızlı prototiplenmesi üzerine de yoğunlaşmıştır.

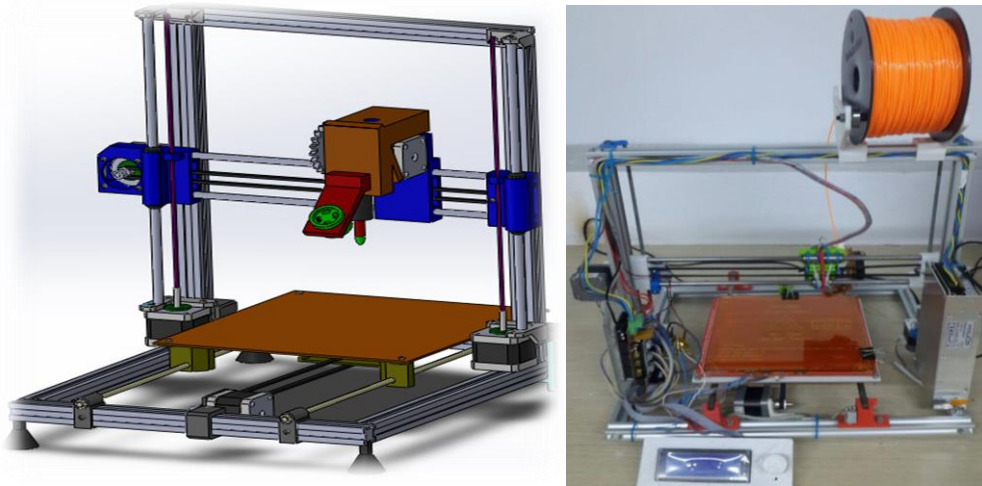
processing (DLP)) [25, 26], eriyik yığıma modelleme (Fused deposition modelling (FDM)) [27-31] gibi katman katman yazdırma mantığıyla çalışan 3 boyutlu yazıcılarda tercih edilen bazı biyo malzemelerdir.

Bunların dışında farklı takviye elemanı ve matris malzemeleriyle biyo ve nano kompozitler hazırlayıp, bunların üç boyutlu yazıcılardaki uygulamalarını araştıran çalışmalar da literatürde mevcuttur [32-35]. Böylelikle eklemeli imalat teknolojileri ile daha mukavemetli, insan sağlığına ve çevreye daha duyarlı malzemelerin daha az enerji, iş gücü ve maliyet ile son ürün kalitesinde üretilmesi amaçlanmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada açık kaynaklı bir üç boyutlu yazıcı modellenmiş, konstrüksiyonu yapılmıştır. Tasarlanan açık kaynaklı yazıcıda cisimlerin dilimlenmesi ve yazdırma parametrelerinin belirlenmesi için Repetier Host [36] arayüz programından faydalanılmıştır. SolidWorks [37] programında üç boyutlu CAD modeli oluşturulan deney numuneleri “.STL” formatında kaydedilip dilimleyici arayüz programına aktarılmıştır. PLA ve PET malzemelerden Çizelge 1.’de verilen üretim parametrelerinde çekme ve sertlik numuneleri üç boyutlu olarak üretilmiştir. Numuneler belirtilen deneylere tabi tutularak elde edilen bulgular kıyaslanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Üç boyutlu yazıcı ana gövdesi sigma profiller ile yapılmıştır (Şekil 1). Toplam dört adet adım motoru ve eksen hareketleri için triger kayış-kasnak sistemi kullanılmıştır. Tabla ölçüleri 20x20 boyutundadır ve tabla hareket sistemi lineer rulmanlar ile yataklanmıştır.



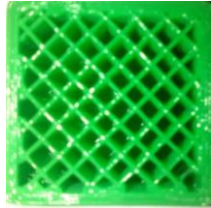
Şekil 1. Modellenen (solda) ve konstrüksiyonu sağlanan (sağda) yazıcı (Modeled (left) and constructed (right) printer)

Polilaktik asit (PLA) [11, 12], polilaktik asit ko-glikolik asit (PLGA) [13-15], polietereeterketon (PEEK) [16], akrilonitril butadien stiren (ABS) [17], polikaprolakton (PCL) [18], kalsiyum [18], çitosan [19, 20] gibi birçok polimer seçici lazer sinterleme (selective laser sintering (SLS)) [16, 21, 22], stereolitografi (stereolithography (SLA)) [23, 24], dijital ışık işlemi (digital light

Deneyel numuneler PLA ve PET malzemelerden çizgi kafes dolgu örüntüsü ile üretilmiştir. Malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1.’de, çizgi kafes dolgu örüntüsü ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** PLA ve PET malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri [38] (Physical and mechanical properties of PLA and PET materials)

		PET	PLA
<b>Fiziksel Özellikler</b>	Yoğunluk	0.0700 - 1.45 g/cc	1.24 g/cc
	Erime akış hızı		7.00 - 9.00 g/10 dk.
	Erime Sıcaklığı	245 °C	165-180 °C
<b>Mekanik Özellikler</b>	Çekme Dayanımı	90 MPa	43 MPa
	Darbe Dayanımı	0.200 J/cm <sup>2</sup>	0.310 J/cm
	Erime Noktası	245 °C	165-180 °C
<b>Termal Özellikler</b>	Maksimum Servis Sıcaklığı,	100 °C	70 °C
	Havada		
	Camsı Geçiş Sıcaklığı, T <sub>g</sub>	98.0 °C	55-60 °C
	Nozul Erime Sıcaklığı	230 °C	220 °C

**Şekil 2.** Çizgi kafes dolgu örüntüsü (Rectilinear infill pattern)

Son 20 yıl içerisinde uygulama alanı hızla gelişen PET (polietilen tereftalat), en önemli mühendislik polimerlerinin arasına girmiştir. Kimyasal maddelere karşı olan kararlılığı, işlenebilirliği, renklendirilebilirliği ve üstün termal özellikleri mühendislik uygulamalarında tercih sebebi olmuşlardır. PET, termoplastikler arasında zayıf asitlere, bazlara ve çoğu çözücülere karşı dayanımı olduğu kadar, sağlamlık, sertlik, parlaklık ve yüksek darbe dayanımı gibi özellikleriyle de üstündür. Ayrıca PET 'in gaz geçirgenliği diğer plastiklerin çoğundan daha düşüktür [32]. PLA gıda ve ambalaj sektöründe, doğal organik kimyasallardan üretildiği için tercih edilen bir termoplastik malzemedir. 3B'lu baskı sektöründe, düşük genleşme katsayısından dolayı gündeme gelmiştir. Isı tablası gerektirmemesi veya ısı tablasına çok az ihtiyaç duyması ve parça büyüklüğünü tolere edebilmesi birçok üreticinin doğrudan bu malzemeyi tercihine sebep olmuştur. Ayrıca PLA, petrol bazlı yakıtlardan değil mısır nişastasından elde edildiği için diğer plastiklere göre çevre dostu malzemeler arasındadır. Biyo bozunur ve saydam olması sağlık alanındaki uygulamalarda dikkat çekmesini sağlamıştır [39-42]. PLA' nın en büyük dezavantajı gerilme uzaması, darbe direnci ve ısı dayanımının düşük olmasıdır [43]. Gerekli esnetici katkıları ile tokluğu arttırılsa da ABS kadar dayanım gösterememektedir [44]. Bir zayıflığı da düşük sayılabilecek sıcaklık altında (50-60°C) mekanik olarak yumuşamaya başlaması ve 80-90°C civarlarında deforme olmasıdır. Gerçekleştirilen çalışmada deneysel numunelerin baskısında Slic3r [45] programından yararlanılmıştır. Test numunelerinin üretimi Çizelge 2' de verilen parametrelerle yapılmıştır.

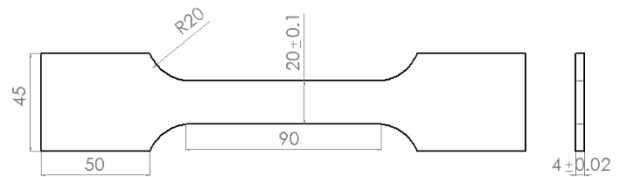
Çekme testi için beş farklı doluluk oranında her numuneden üçer adet olmak üzere toplam 15 adet çekme numunesi basılmıştır. Testler Karabük Üniversitesi

laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU marka 50 kN kapasiteli çekme cihazında yapılmıştır. TS 138 A standardında üretilen çekme numunelerinin boyutları Şekil 3' de verilmiştir. Çekme testi için üretilen numuneler önce yüzey pürüzlülük testine tabi tutulmuştur. Çizgi kafes dolgu örüntüsü ile oluşturulmuş beş farklı doluluk oranına (%10-50) sahip numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için Mitutoyo marka cihazda yapılmıştır.

**Çizelge 2.** Deneysel numunelerin üretiminde kullanılan baskı parametreleri (Printing parameters used in the production of experimental samples)

Yazıcı Malzemesi	PLA	PET
Katman Yüksekliği (mm)	0.4	0.4
Doluluk Oranı (%)	10, 20, 30, 40, 50	10, 20, 30, 40, 50
Yazıcı Nozul sıcaklığı	225°C	220°C
Tabla Sıcaklığı	25°C	25°C
Kabuk sayısı	2	2
Filament Çapı (mm)	1,75	1,75
Dolgu Örüntüsü	Çizgi Kafes	Çizgi Kafes

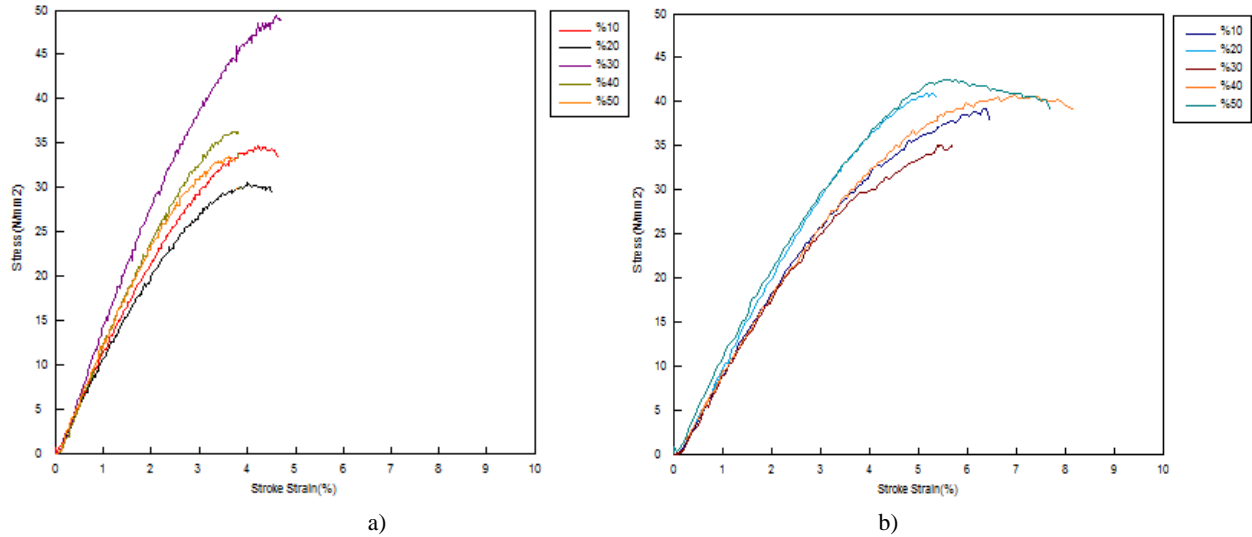
Shore D sertlik ölçümü yapmak üzere 10x10mm boyutlarında kübik sertlik ölçüm numuneleri de üretilmiştir. Her bir parametreden beşer ölçüm alınmış, bu ölçümlerin ortalaması hesaplanmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sertlik ölçümleri PCE-DD D Dijital Shore D Durometre ile gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 3.** TS 138 A Standardına uygun çekme numunesi boyutları (Tensile specimen sizes according to TS 138 A Standard)

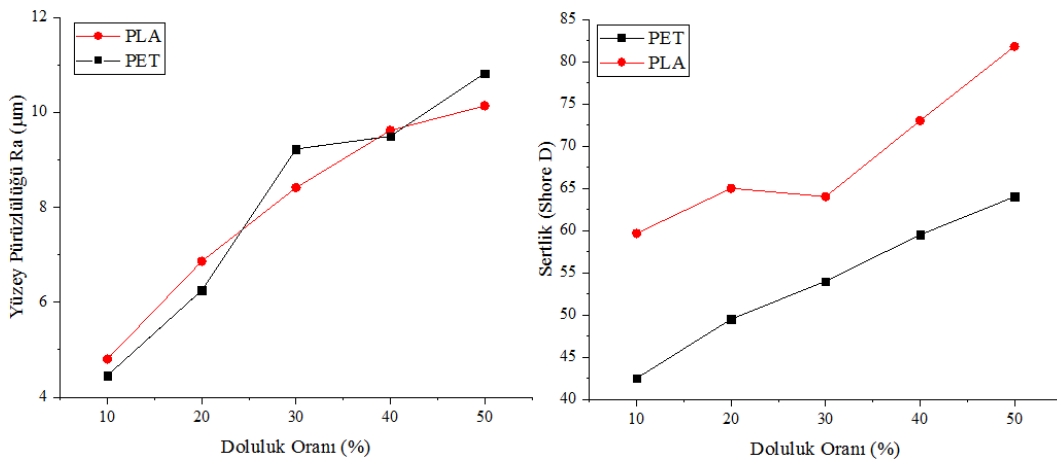
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 4a'da verilen çekme grafikleri değerlendirildiğinde; PLA malzemede %10 doluluk oranından %30 doluluk oranına doğru gittikçe artan bir çekme mukavemeti elde edildiği, ancak %40 ve %50 doluluk oranında çekme mukavemetinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun mısır nişastası bazlı organik bir malzeme olan PLA' da katmanlar arasında olması beklenen adhezyonun yeterince gerçekleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Decuir ve arkadaşları farklı doluluk oranlarında ürettikleri PLA ve ABS numunelere çekme testine tabi tutmuşlardır [46]. Yaptıkları testlerde %20 ve %40 doluluk oranında PLA malzemenin çekme mukavemetinin arttığını fakat %60 doluluk oranında azaldığını vurgulamışlardır.

Ancak doluluk oranı %80 ve %100 olduğunda çekme mukavemetinin tekrar arttığını, çekme mukavemetindeki bu değişimin sebebinin kullanılan yazıcıdan, filamentten ve yazdırma işleminde tercih edilen dolgu örüntüsünden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir [46]. En düşük doluluk oranı olan %10 doluluk oranına sahip çizgi kafes dolgu örüntülü numunelerde en küçük çekme mukavemeti değeri 31 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilirken, en yüksek çekme mukavemeti değeri ise %30 doluluk oranına sahip numunelerde 48 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Şekil 4b'de verilen PET malzemenin çekme eğrilerinde ise doluluk oranı %10'dan %50'ye doğru gittikçe doluluk oranına paralel olarak çekme mukavemetinin de arttığı görülmüştür. En düşük doluluk oranı olan %10 doluluk oranına sahip çizgi kafes dolgu örüntülü numunelerde en küçük çekme mukavemeti değeri 34 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilirken, en yüksek çekme mukavemeti değeri ise %50 doluluk oranına sahip numunelerde 42 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Çekme deneyi grafikleri, a) PLA malzemesi, b) PET malzemesi (Tensile test graphs, a) PLA material, b) PET material)



Şekil 5. PET ve PLA malzemeye ait a) Yüzey pürüzlülüğü, b) Sertlik grafikleri (PET and PLA material a) Surface roughness, b) Hardness graphs)

Şekil 5a'da yer alan yüzey pürüzlülük grafiğine bakıldığında; PLA malzemenin en büyük yüzey pürüzlülük değerinin  $R_a=10,82\mu\text{m}$  ile %50 doluluk oranında, en küçük yüzey pürüzlülük değerinin  $R_a=4,46\mu\text{m}$  değeri ile %10 doluluk oranında elde edildiği, PET malzemede ise en büyük yüzey pürüzlülük değerinin  $R_a=4,80\mu\text{m}$  ile %50 doluluk oranında, en küçük yüzey pürüzlülük değerinin ise  $R_a=10,14\mu\text{m}$  değeri ile %10 doluluk oranında elde edildiği görülmektedir. PET malzemenin üretilen numunelerde %30 doluluk oranında yüzey pürüzlülüğü hızlı bir artış göstermiştir. Bu da malzemenin %30 doluluk oranında çekme mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. Numune yüzeyinde oluşan pürüzlülüğün artış sebebinin ise yazdırma işlemi esnasında gerçekleşen yazıcı kaynaklı bir sorundan olduğu düşünülmektedir.

Sertlik ölçüm sonuçlarının yüzey pürüzlülüğü değerlerini destekler nitelikte olduğu Şekil 5'den görülmektedir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça sertlik ve pürüzlülük değerleri de artmaktadır. Bu durum literatürde yapılan çalışmaları destekler niteliktedir [47]. PLA malzeme grubunda en büyük sertlik değeri 81,8 Shore ile %50 doluluk oranında, en küçük sertlik değerinin ise 59,66 Shore ile %10 doluluk oranında elde edildiği görülmektedir. PET malzeme grubunda da benzer bir davranış sergilenmiş ve en büyük sertlik değeri 64 Shore ile %50 doluluk oranında, en küçük sertlik değerinin ise 42,5 Shore ile %10 doluluk oranında elde edildiği görülmüştür.

Doluluk oranı, 3b yazıcılarda imalatı yapılacak parçanın içinin malzemeyle doldurulma miktarıdır. Dolayısıyla doluluk oranı arttıkça yazıcı ucunun izleyeceği yol sıklığı artmaktadır. Bu da katmanlar arasındaki adhezyonu güçlendirecek ve malzemenin mukavemet değerlerini olumlu etkileyecektir. Ancak izlenecek yol sıklığı dolayısıyla dolgu oranı arttıkça parçanın yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır (Şekil 5a) [48]. Yüzey pürüzlülüğünün artması PLA gibi nişasta kökenli bir polimerde çentik etkisi oluşturup malzemenin mukavemet değerlerini düşürmüştür. Ayrıca nişasta kökenli olan PLA malzeme ortam koşullarından etkilenmekte, oksijenle temas süresi arttıkça nem almakta ve dolayısıyla da mukavemet değerleri değişiklik gösterebilmektedir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Gerçekleştirilen deneysel çalışmanın neticesinde PLA ve PET malzemenin çekme testi değerlerinde doluluk oranının artmasıyla çekme mukavemeti değerlerinde düzenli bir artış veya azalmanın olmadığı görülmüştür. PLA malzemede pürüzlülük değeri ile çekme mukavemeti ve çekme mukavemeti ile sertlik değerleri arasında ters bir orantı olduğu, pürüzlülük arttıkça çekme mukavemeti değerinin azaldığı; sertlik ve pürüzlülük değerlerinin birbirleriyle doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. PLA malzeme ekstrüzyon esnasında ya da yazıcıda kullanımı esnasında neme maruz kaldığında farklı tepkiler verebilmektedir. PLA malzemenin

ekstrüzyonundan önce malzemenin kurutma fırınında kurutulması ve ekstrüzyon esnasında da vakumlama ya da gaz ortamında oksijen giderme işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Filament üretildikten sonra ise kullanımında filament malzemenin oksijenle uzun süreli teması engellenmeli, mümkünse kapalı kapta muhafaza edilmelidir. Aksi halde filament gevrekleşmekte, esnekliğini ve mukavemetini kaybetmekte, nozul ucunda baloncuklanma, hava boşluklarının oluşması, nozuldan fişkırmaya ve renk değişikliği meydana gelmektedir.

Deneysel çalışmalarda numune üretimi gerçekleştirilen PLA malzeme Karabük Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği laboratuvarlarında mevcut olan filament makarasından üretilmiştir. Dolayısıyla yukarıda sıralanan olumsuzluklar da göz önüne alındığında PLA malzemenin oksijenden ve nemden etkilenmiş olabileceği, bundan dolayı mukavemet değerlerinde bir belirsizlik olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, daha sonraki yapılacak çalışmalarda kullanılacak PLA malzemenin oksijen ve nem ortamından uzaklaştırılarak muhafaza edilmesi gerektiği sonucuna ulaştırılmıştır.

PET malzeme grubunda ise sertlik çekme ve pürüzlülük değerlerinin doğru orantılı olduğu, sertlik arttıkça, çekme mukavemetinin de arttığı görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Szykiedansa K. and Credo W., "Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints", *Procedia. Eng.*, 136: 257 – 262, (2016).
- [2] Dawoud M., Taha I. and Ebeid S.J., "Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques", *J. of Manuf. Proces.*, 21: 39–45, (2016).
- [3] Sood A.K., Ohdar R.K. and Mahapatra S.S., "Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement", *J. of Adv. Resea.*, 3: 81–90, (2012).
- [4] Gurralla P.K. and Regalla S.P., "DOE Based Parametric Study of Volumetric Change of FDM Parts", *Proc. Mater. Sci.*, 6: 354 – 360, (2014).
- [5] Nuñeza P.J., Rivasa A., García-Plaza E., Beaudub E. and Sanz-Loberac A., "Dimensional and surface texture characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS plus", *Procedia Eng.*, 32: 856 – 863, (2015).
- [6] Jaina P. and Kutheb A.M., "Feasibility Study of manufacturing using rapid prototyping: FDM Approach", *Procedia Eng.*, 63: 4 – 11, (2013).
- [7] Leary M., Kron T., Keller C., Franich R., Lonski P., Subic A. and Brandt M., "Additive manufacture of custom radiation dosimetry phantoms: An automated method compatible with commercial polymer 3D printers", *Mater. and Design*, 86: 487–499, (2015).
- [8] Cubric D., Lencova B., Read F.H. and Zlamal J., "Comparison of FDM, FEM and BEM for electrostatic charged particle optics", *Nuclear Instr. and Methods in Phys. Resea. A*, 427: 357-362, (1996).
- [9] Rauta S., Jattib V.K.S., Nitin K., Khedkar K. and Singh T.P., "Investigation of the effect of built orientation on

- mechanical properties and total cost of FDM parts”, *Procedia Mater. Sci.*, 6:1625–1630, (2014).
- [10] Stephens B., Azimi P., Orch Z.E. and Ramos T., “Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers”, *Atmospheric Env.*, 79: 334-339, (2013).
- [11] Santoro M., Shah S.R., Walker J.L. and Mikos A.G., “Poly (lactic acid) nano fibrous scaffolds for tissue engineering”, *Adv. Drug Delivery Revie.* 107: 206-212, (2016).
- [12] Haddad T., Noel S. and De Crescenzo G., “Fabrication and surface modification of poly lactic acid ( PLA ) scaffolds with epidermal growth factor for neural tissue engineering”, *Biomatter.* 6(1):1–12, (2016).
- [13] Karp J.M., Shoichet M.S. and Davies J.E., “Bone formation on two-dimensional poly ( DL-lactide- coglycolide ) (PLGA) films and three-dimensional PLGA tissue engineering scaffolds in vitro”, *J. of Biomed. Mater. Resea. Part A.* 64A(2): 388-396, (2002).
- [14] Holy C.E., Cheng C., Davies J.E. and Shoichet M.S., “Optimizing the sterilization of PLGA scaffolds for use in tissue engineering”, *Biomaterials.* 22:25–31, (2000).
- [15] Sahoo S., Toh S.L. and Goh J.C.H., “A bFGF-releasing Silk/PLGA-based biohybrid scaffold for ligament/tendon tissue engineering using mesenchymal progenitor cells”, *Biomaterials.* 31(11):2990–2998, (2017).
- [16] Tan K.H., Chua C.K., Leong K.F., Cheah C.M., Cheang P., Abu Bakar M.S. and Cha S.W., “Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone–hydroxyapatite biocomposite blends”, *Biomaterials.* 24(18): 3115-3123, (2003).
- [17] Rosenzweig D., Carelli E., Steffen T., Jarzem P. and Haglund L., “3D-printed ABS and PLA scaffolds for cartilage and nucleus pulposus tissue regeneration”, *I. J. of Molec. Sci.* 16(7): 15118–15135, (2015).
- [18] Rau J.V., Antoniac I., Cama G., Komlev V.S. and Ravaglioli A., “Bioactive materials for bone tissue engineering”, *BioMed Resea. Int.* 2016:1-3, (2016).
- [19] Di A., Sittinger M. and Risbud M.V., “Chitosan: a versatile biopolymer for orthopaedic tissue-engineering”, *Biomaterials.* 26: 5983–5990, (2005).
- [20] Tan W., Krishnaraj R., Desai T.A., “Evaluation of Nanostructured Composite Collagen–Chitosan Matrices for Tissue Engineering”, *Tissue Eng.* 7(2): 203-210, (2001).
- [21] Williams J.M., Adewunmi A, Schek R.M., Flanagan C.L., Krebsbach P.H., Feinberg S.E., Hollister S.J. and Das S., “Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering”, *Biomaterials.* 26: 4817–4827, (2005).
- [22] Zhou W.Y., Lee S.H., Wang M., Cheung W.L. and Ip W.Y., “Selective laser sintering of porous tissue engineering scaffolds from poly (L-lactide)/carbonated hydroxyapatite nanocomposite microspheres”, *J. of Mater. Sci. Mater. in Medicine.* 19(7): 2535–2540, (2008).
- [23] Cooke M.N., Fisher J.P., Dean D., Rimnac C. and Mikos A.G., “Use of stereolithography to manufacture critical-sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth”, *J. of Biomedical Mater. Resea. Part B Applied Biomat.* 64B(2): 65-69, (2015).
- [24] Seck T.M., Melchels F.P.W., Feijen J. And Grijpma D.W., “Designed poly (ethylene glycol)/poly(D,L-lactide)-based hydrogel structures prepared by stereolithography”, *11th European Symposium on Controlled Drug Delivery*, Netherlands, (2010).
- [25] Tesavibul P., Felzmann R., Gruber S., Liska R., Thompson I., Boccaccini A.R. and Stampfl J., “Processing of 45S5 Bioglass by lithography-based additive manufacturing”, *Mater. Lett.* 74: 81-84, (2012).
- [26] Zhu W., Ma X., Gou M., Mei D., Zhang K. and Chen S., “3D printing of functional biomaterials for tissue engineering”, *Current Opinion in Biotech.* 40: 103–112, (2016).
- [27] Hutmacher D.W., “Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage”, *The Biomat.: Silver Jubilee Compendium.* 21: 2529–2543, (2006).
- [28] Sittinger M., Hutmacher D.W., Sittinger M. and Risbud M.V., “Scaffold-based tissue engineering: rationale for computer-aided design and solid free-form fabrication systems”, *Trends in Biotech.* 22(7): 354-362, (2004).
- [29] Yeong W., Chua C., Leong K. and Chandrasekaran M., “Rapid prototyping in tissue engineering: challenges and potential”, *Trends in Biotech.* 22: 643–652, (2005).
- [30] Zein I., Dietmar W.H., Kim C.T., Swee H.T., “Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications”, *Biomaterials.* 23(4): 1169-1185, (2002).
- [31] Gupta S., Bissoyi A., Bit A., “A Review on 3D Printable Techniques for Tissue Engineering”, *BioNanoScience.* 8(3): 868–883, (2018).
- [32] Ahrabi A.Z., Bilici İ., Bilgesu A.Y., “Pet Atıkları Kullanılarak Kompozit Malzeme Üretiminin Araştırılması”, *Gazi Üniv. Müh. Mimarlık Fak. Derg.*, 27:467-471, (2012).
- [33] Reddy M.M., Vivekanandhan S., Misraa M., Bhatia S.K. and Mohantya A.K., “Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities”, *Progress in Polym. Sci.*, 38:1653–1689, (2013).
- [34] Armentano I., Bitinis N., Fortunati E., Mattioli S., Rescignano N., Verdejo R., Machado M.A.L. and Kenny J.M., “Multifunctional nanostructured PLA materials for packaging and tissue engineering”, *Progr. in Polymer Sci.*, 38:1720–1747, (2013).
- [35] Raquez J.M., Habibi Y., Murariu M. and Dubois P., “Polylactide (PLA)-based nanocomposites”, *Progr. in Polymer Sci.*, 38:1504–1542, (2013).
- [36] www.repetier.com
- [37] www.solidworks.com
- [38] www.matweb.com
- [39] Koenig M.F. and Huang S.J., “Biodegradable blends and composites of polycaprolactone and starch derivatives”, *Polymer*, 36(9):1877-1882, (1995).
- [40] Park E.S., Kim M.N. and Yoon J.S.J., “Grafting of polycaprolactone onto poly(ethylene-co-vinyl alcohol) and application to polyethylene-based bioerodable blends”, *Polymer Sci. Part B Polymer Phys.*, 40:2561-2569, (2002).
- [41] Tsuji H. and Yamada T.J., “Blends of aliphatic polyesters. VIII. Effects of poly(L-lactide-co-ε-caprolactone) on enzymatic hydrolysis of poly(L-lactide), poly(ε-caprolactone), and their blend films”, *Applied Polymer Sci.*, 87: 412-419, (2003).

- [42] Maria D., Sanchez-Garcia and Jose M. L., “On the use of plant cellulose nanowhiskers to enhance the barrier properties of polylactic acid”, *Cellulose*, 17(5): 987–1004, (2010).
- [43] [www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/67-filamentlerin-detayli-karsilastirilmesi](http://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/67-filamentlerin-detayli-karsilastirilmesi)
- [44] <http://priyoid.com/3d-yazici-hammaddeleri/yerli-filament-ureticisi-oo-kuma-ile-merak-edilen-sorulari-yanitladik/>
- [45] [www.slicer.org](http://www.slicer.org)
- [46] Decuir F., Phelan K. and Hollins B., “Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments”, *32nd Southern Biomedical Engineering Conference*, Louisiana Tech. University, Ruston, LA United States, 47-48, (2016).
- [47] Göztaş Z., Tosun G., Yıldız E. and Kahraman K., “Nano doldurucu içeren beş farklı kompozitin yüzey sertliği ve pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi”, *Selcuk Dental J.*, 2: 43-48, (2014).
- [48] Özel C. and Baydar U., “Onarım Ve Güçlendirmede Kullanılan Polimer Betonların Aderans Özelliklerinin Beton Yüzey Karakteristikleri İle İlişkileri”, *SDU Int. J. of Tech. Sci.*, 8(3): 46-61, (2016).