

Orijinal Makale/Research Article

Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemeden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

Ömer KARABIYIK¹, Kenan APAK²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 32100, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 32100, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Eklemeli imalat
Ergiyik biriktirme modelleme
Polilaktik asit
Mekanik özellikler

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 15.07.2021

Kabul Tarihi: 23.09.2021

Öz: Bu çalışmada, hızlı prototiplemede yaygın olarak kullanılan ve bir eklemeli imalat yöntemi olan, Ergiyik Biriktirme Yöntemi (EBY) (FDM-Fused Deposition Modeling) kullanılarak, mavi renkli polilaktik asit (PLA) malzemelerinden üretilen deney numunelerinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Deney numunelerinin elde edilmesinde; üç farklı dolgu deseni "Çizgi, Izgara, Eş Merkezli", üç farklı doluluk oranı "%20, %60, %100" ve üç farklı üretim hızları (baskı hızı) "20 mm/sn, 40 mm/sn, 60 mm/sn" değişken olarak belirlenmiştir. Daha sonra deney numuneleri sertlik ölçümü ve çekme testlerine tabi tutularak, ürünlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre; doluluk oranındaki artış ile birlikte numunelerin çekme mukavemeti de artmıştır. Dolgu deseni ve üretim hızının değişimi, çekme mukavemeti açısından kayda değer bir değişikliğe neden olmamıştır. Doluluk oranının artışı ve üretim hızının azalması ise uzama değerlerinde azalmaya, sertlik değerinde ise azda olsa artışa neden olmuştur. Dolgu deseni farklılığının anlamlı bir değişime neden olmadığı görülmüştür. Deney sonuçları karşılaştırmalı grafikler halinde verilmiştir.

Atıf için/To Cite:

Karabiyik, Ö. Apak K. Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemeden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 13(2), 62-68, 2021.

Investigation of mechanical properties of products produced from PLA material by additive manufacturing method

Keywords

Additive manufacturing
Fused Deposition Modeling
Polylactic acid
Mechanical properties

Article history:

Received: 15.07.2021

Accepted: 23.09.2021

Abstract: In this study, the mechanical properties of test specimens produced from blue color polylactic acid (PLA) materials were investigated by using Fused Deposition Modeling (FDM), which is widely used in rapid prototyping. In obtaining test samples; three different filling patterns "Line, Grid, Concentric", three different filling rates "20%, 60%, 100%" and three different production speeds (print speed) "20 mm/sec, 40 mm/sec, 60 mm/sec" as variable determined. Then, the mechanical properties of the products were examined by subjecting the test samples to hardness measurement and tensile tests. According to the test results; The tensile strength of the samples increased with the increase in the fullness rate. The change of filling pattern and production speed did not cause a significant change in terms of tensile strength. The increase in the filling rate and the decrease in the production speed caused a decrease in the elongation values and a slight increase in the hardness values. It was observed that the filling pattern difference did not cause a significant change. Experiment results are given in comparative graphics.

1. Giriş

Eklemeli imalat (Eİ), bir nesnenin üç boyutlu model verilerinden yola çıkarak malzemeleri katman katman

birleştirilerek parça yapma işlemi olarak tanımlanabilir [1],[2]. Bu özelliğiyle eklemeli imalat, özellikle hızlı prototipleme süreçlerinde geleneksel imalat yöntemlerine göre birçok avantajlar sunmaktadır

[3],[4]. Eklemeli imalat ile basit bir geometrik şekildeki parça ile aynı hacimdeki daha karmaşık yapıdaki bir parçanın üretimi arasında zaman ve zorluk açısından bir fark olmaksızın imal edilebilmektedir. Günümüzde eklemeli imalat; otomotiv, uzay, havacılık, savunma sanayi, inşaat, tıp, prototipleme, biyomedikal,

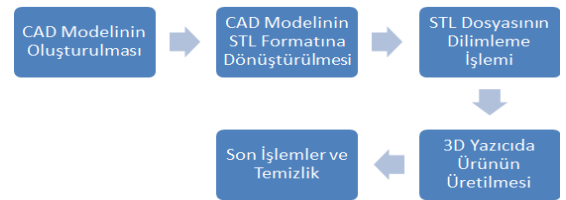
biyomekanik, kimya endüstrisi, spor malzemeleri, oyuncak, kâğıt imalatı, dökümhane endüstrileri, elektronik ve akıllı yapılar dahil olmak üzere farklı endüstrilerde kullanılmaktadır [2],[4]-[9]. Eklemeli imalat yöntemleri ve özelliklerinin kısaca yer aldığı bilgiler Tablo 1’de verilmiştir [6],[10],[11].

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri ve özellikleri

Eklemeli İmalat Yöntemi	Çalışma Şekli	Kullanılan Malzemeler
3D P Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi (3D Printing)	Bağlayıcı ile toz bağlama ve kurutma	Yüksek Performanslı Kompozit
3D BJ Üç Boyutlu Bağlayıcı Püskürtme (3D Binder Jet)	Bağlayıcı ile metal toz bağlama ve sinterleme	17-4PH, 304L, 316L, Aluminum 6061, Cobalt Chorome, Copper, H13 Tool Steel, Inconel 718, Inconel 625, M2 Tool Steel, Titanium, Tungsten.
CC Kontür İşçiliği (Contour Craft)	Macun kıvamında konsantre harcı katmanlı yığma	Seramik, Kil, Beton ve Toprak
EBM Elektron Işınli Ergitme (Electron Beam Melting)	Elektron ışınli ergitme	Kobalt Krom ve Titanyum Alaşımları
FDM Ergiyik Biriktirme Yöntemi (Fused Deposition Modeling)	Ektrüzyonla eritilmiş malzemenin katmanlı yığma tekniği	ABS, PLA, Poliamid, Polikarbonat, Polietilen, Polipropilen ve Hassas Döküm Mumu
LOM Tabakalı Yapıştırma Parça İmalatı (Laminated Object Manufacturing)	Tabakaların lazerle kesilip yapıştırılması	Kâğıt, Plastik Köpük, Metal ve Seramik Tozu Emdirilmiş Malzemeler
MJM Çok Jetli Modelleme (Multi-Jet Modelling)	Çok jetli püskürtme ve UV ışını ile katılaştırma	Parafin, Mum, Termopolimerler
SDM Şekil Biriktirme İmalatı (Shape Deposition Manufacturing)	Malzemenin yığılması ve CNC işleme merkezi ile işlenmesi	Metal, Plastik, Seramik tozları
SGC PolyJet Teknolojisi, Katı Tabaka Kurutma Teknolojisi (Solid Ground Curin)	Foto maskeleme ve UV ışını ile katılaştırma	Fotopolimer, Akrilik, Mum
SLA Tarayarak Işıklı Kütleme Tekniği (Stereo Lithography Apparatus)	Fotopolimer malzemenin UV ışını ile katılaştırma	Reçine Bazlı Malzemeler, Akrilik, Epoksi, Polipropilen
SLS Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)	Tozun lazer ile sinterlenmesi	Poliamid, Polistren, Karbon Fiber ve Alüminyum Katkılı Poliamid, Polikarbonat, Paslanmaz Çelik
SLM Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)	Tozun lazer ile eritilmesi	Çelik ve Alüminyum gibi bazı Metaller
POLYJET	Fotopolimer püskürtme ve UV ile katılaştırma	Akrilik gibi Termoplastikler

Eklemeli imalatla, ilkönce tasarlanan ürünün bilgisayar ortamında CAD modeli oluşturulur. Oluşturulan CAD model, STL uzantılı transfer dosyası biçimine dönüştürülür. Uygun bir CAM benzeri arayüz programı ile ürün modeli katman katman ince tabakalar halinde dilimlenerek, G-CODE adı verilen ve esasında Eİ makinesinin (yaygın adıyla “3B-yazıcının”) ekstrüzyon kafasının hareket yolu elde edilir. Ektrüzyonla eritilen malzeme katmanlı olarak üst üste

yığılarak/biriktirilerek ürün elde edilir. Son olarak varsa çapaklar temizlenir (Şekil 1).



Şekil 1. FDM Eİ yönteminde işlem aşamaları

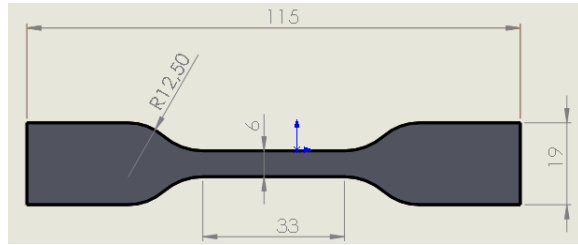
2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, EBY-Ergiyik Biriktirme Yöntemi (FDM-Fused Deposition Modelling) kullanılarak mavi renkli PLA (Polilaktik Asit) malzemesi ile üretilen ürünlerin (Tablo 2) [12], ürün elde etme süreçlerinde tercih edilen; dolgu deseni, doluluk oranı, biriktirme/yığıma hızı (bundan sonra “üretim hızı” olarak belirtilecektir) değişkenleri dikkate alınarak (Tablo 3), en iyi ürünün elde edilebileceği ayarlanabilir yazıcı değişkenlerinin belirlenmesine çalışılmıştır.

Tablo 2. Deney numunelerinde kullanılan PLA malzemesinin özellikleri [12].

Özellikler	Birim	PLA
Yoğunluk	kg/m ³	1.20-1.25
Erieme Sıcaklığı	°C	190-220
Erieme Akış İndeksi	g/10 min	7.8
Çekme Dayanımı	Mpa	62.63
Uzama Dayanımı	%	4.43
Eğilme Dayanımı	Mpa	65.02
Eğilme Modülü	Mpa	2504.4
Darbe Dayanımı	kJ/m ²	4.28

Bu amaçla, EBY makinesi/yazıcısı olarak HyperCube marka 3D yazıcı kullanılmıştır. Tabaka kalınlığı 0.1 mm, nozul sıcaklığı (200 °C) ve tabla sıcaklığı (50 °C) sabit tutularak, Tablo 2’de belirtilen “ürün üretim değişkenleri” ve ASTM D638-14 standardına uygun ölçülerde deney numuneleri üretilmiştir (Şekil 2) [13].



Şekil 2. ASTM D638-14' e göre tasarlanan numune

Tablo 3. Ürün üretim değişkenleri

Değişken 1	Değişken 2	Değişken 3
Doluluk Oranı	Dolgu Deseni (STL Görselleri)	Üretim Hızı (Baskı Hızı)
%20	Çizgi (Line)	20 mm/sn
%60	Izgara (Grid)	40 mm/sn
%100	Eş Merkezli (Concentric)	60 mm/sn

Deney numunelerinin sayısının belirlenmesinde Taguchi deney tasarım metodu kullanılmıştır (Tablo 3) [14],[15]. Buna göre üretilen 27 adet deney numunesine çekme deneyi ve sertlik ölçme deneyi yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir.

Bu amaçla sıcaklık sabit tutularak 3 farklı dolgu deseninde, 3 farklı üretim hızında ve 3 farklı doluluk oranı seçimi yapılmıştır. 3D yazıcıda kullanılan üretim hızları; V=20 mm/sn, V=40 mm/sn ve V=60 mm/sn. Dolgu desenleri; Çizgi, Izgara, Eş Merkezli. İç doluluk oranları ise %20, %60 ve %100 olarak belirlenmiştir (Tablo 3).

Daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada; sıcaklık sabit tutularak, farklı hızlarda, farklı doluluk oranlarında ve farklı dolgu desenlerinde üretilmiş numuneler SHIMADZU marka test cihazı ile 2 mm/dk hızında çekilerek çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. HWMMT-X sertlik ölçme cihazında Vickers Sertlik Deney yöntemi kullanılarak yapılmıştır. 19614 mN’lik kuvvet uygulanarak gerçekleştirilen sertlik ölçme deneylerinde bekleme süresi 15 sn olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Taguchi metoduyla belirlenen deney numune sayısı ve özellikleri

Numune No	1. Değişken % Doluluk Oranı	2. Değişken Dolgu Deseni	3. Değişken Üretim Hızı mm/sn
1	20	Çizgi	20
2	20	Çizgi	40
3	20	Çizgi	60
4	60	Çizgi	20
5	60	Çizgi	40
6	60	Çizgi	60
7	100	Çizgi	20
8	100	Çizgi	40
9	100	Çizgi	60
10	20	Izgara	20
11	20	Izgara	40
12	20	Izgara	60
13	60	Izgara	20
14	60	Izgara	40
15	60	Izgara	60
16	100	Izgara	20
17	100	Izgara	40
18	100	Izgara	60
19	20	Eş Merkezli	20
20	20	Eş Merkezli	40
21	20	Eş Merkezli	60
22	60	Eş Merkezli	20
23	60	Eş Merkezli	40
24	60	Eş Merkezli	60
25	100	Eş Merkezli	20
26	100	Eş Merkezli	40
27	100	Eş Merkezli	60

3. Bulgular ve Tartışma

Farklı desen, doluluk oranları ve üretim hızlarına göre karşılaştırmalı olarak elde edilen Vickers sertlik değerleri Şekil 4'te, çekme dayanımı değerleri Şekil 5'te, uzama değerleri ise Şekil 6'da verilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalarla uyumludur. Başlıklar halinde açıklanacak olursa;

3.1. Sertlik değerine etkisi

Sertlik değeriyle ilgili olarak, doluluk oranı arttıkça sertlik değerinin arttığı tespiti literatür tarafından da doğrulanmaktadır [16]. Böğrekci vd., farklı desen ve doluluk oranında PLA malzemeden üretilen numunelerden 100% doluluk oranına sahip 80 mm/sn hızında üretilen Linear desenli numunenin sertlik değeri 19,2 HV olarak ölçülmüştür. Bu değer, bu çalışmada yer alan 100% doluluk oranına sahip 60 mm/sn hızında Izgara desenli numunede ölçülen 19.1 HV sertlik değerine çok yakındır. Dolgu deseninin sertliğe etkisinin olduğu literatürde belirtilmiş olsa da [17],[18], bu çalışmada dolgu deseninin sertliğe anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bunun birkaç nedeni olabilir. Öncelikle 3B yazıcıların sunduğu desenlerdeki geometri farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan desen geometrisi ile literatürde kullanılan desen geometrileri farklılık göstermektedir. Literatürde dolgu deseni olarak "linear, solid, rectangular, diamond, and hexagon" geometri desenlerin kıyaslandığı görülmüştür. Bu çalışmada ise "Linear, Grid, Concentric" desenleri kıyaslanmıştır. Baskı hızı olarak literatürde 60-150 mm/sn arasında değişen değerler tercih edildiği ve tüm numunelerde sabit tutulduğu görülmüştür [17],[18]. Bu çalışma da ise baskı hızları sabit tutulmayıp mekanik özelliklere etkisinin olup olmadığı anlaşılmaya çalışılmıştır. Deneysel sonuçları incelendiğinde baskı hızının da sertlik değerleri üzerine anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

3.2. Çekme ve uzama değerlerine etkisi

Çekme ve uzama değerleriyle ilgili olarak, bu çalışmada %100 doluluk oranında mavi renkli PLA malzemeden üretilen çizgi desenli numunede ortalama 45 MPa, ızgara desenli numunede ise ortalama 46 MPa çekme dayanımı ölçülmüştür. Dolgu yüzdesi arttıkça çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Literatürde yer alan çalışmalarda da durum böyledir [19]. Wittbrodt vd., farklı renklerde PLA malzeme ile farklı nozul sıcaklıklarında hazırladıkları numunelere çekme testi uygulamışlar, 200°C'de Izgara desenli dolgu biçiminde bastıkları %100 doluluk oranındaki (mavi renkli numunelerle çok yakın değerler elde ettikleri) beyaz renkli PLA'da max. 53.97 MPa'lık çekme dayanımı tespit etmişlerdir [20]. Tymrak vd. ise farklı 3B yazıcılar ve bu yazıcılara ait (ancak

çalışmalarında özellikle belirtmedikleri) değişkenlere göre, bu çalışmadaki benzerlik açısından sadece çapraz ve doğrusal desenli PLA malzemeden ürettikleri numuneler dikkate alındığında doğrusal desenli numunede ortalama 54.9 MPa, çapraz desenli ise ortalama 52.3 MPa çekme dayanımı elde ettikleri görülmüştür [21]. Dolgu desenindeki değişimin saf PLA'dan mamul ürünlerde çekme dayanımına anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda bu durum belirtilmiştir [22]. Literatürdeki deney şartları ile bu çalışmadaki deney şartlarının birebir aynı olmadığı dikkate alınacak olursa, çekme deneyleri sonuçları açısından bu çalışmanın literatür ile tutarlı olduğu görülmektedir. Uzama değerleri üzerine; üretim hızının, dolgu deseninin ve dolgu yüzdesinin çok anlamlı olmasa da kısmen bir etkisinin olduğu görülmüştür. Bazı numunelerde dolgu desenleri aynı olduğunda, doluluk oranı arttıkça ve üretim hızı azaldıkça uzama değerinin azaldığı görülmüştür. Bu sonuca göre PLA malzemesinin, dolgu oranı arttıkça ve üretim hızı azaldıkça daha fazla ısıya maruz kalması nedeniyle gevreklediği, bunun sonucunda da uzama değerinin bir miktar azaldığı sonucuna varılmıştır. Bu durum sertlik değerlerindeki artış ile paralellik arz ettiği görülmüştür. Gevreklenen malzeme aynı zamanda da sertleşmiştir. Bu konuda Pillin vd. yaptıkları çalışmada, PLA'nın içerisinde bulunan monomerinin zaman içinde sertleşmeye neden olacak şekilde malzeme yüzeyine göç ettiklerini tespit etmişlerdir [23].

Deneysel sonuçlarının tam anlamlandırılmaması ve sonuçların çok değişkenlik gösterebildiğine dair tespitlere literatürde yer verildiği görülmüştür. Evlen vd., nişasta kökenli olan PLA malzeme ortam koşullarından etkilendiğini, oksijenle temas süresi arttıkça nem almakta ve dolayısıyla da mukavemet değerleri değişiklik gösterebildiğini, ürün basılmadan önce gerekli olan ön kurutma işleminin yeterli gerçekleştirilmemesinden kaynaklandığı belirtilmiştir [24]. Ayrıca baskı işleminin kapalı veya açık ortamda yapılmasının tüm mekanik özellikleri etkilediğini belirtmişlerdir [25].

3.3. Doğrulama deneyleri

Yapılan testlerin güvenilirliğini kontrol etmek için, en yüksek sertlik değerine sahip numune ile çekme dayanımı en yüksek olan numuneden birer adet daha üretilerek doğrulama deneyleri yapılmıştır. Doğrulama deneyleri sonuçlarına göre bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerin güvenilir olduğu teyit edilmiştir (Şekil 3).

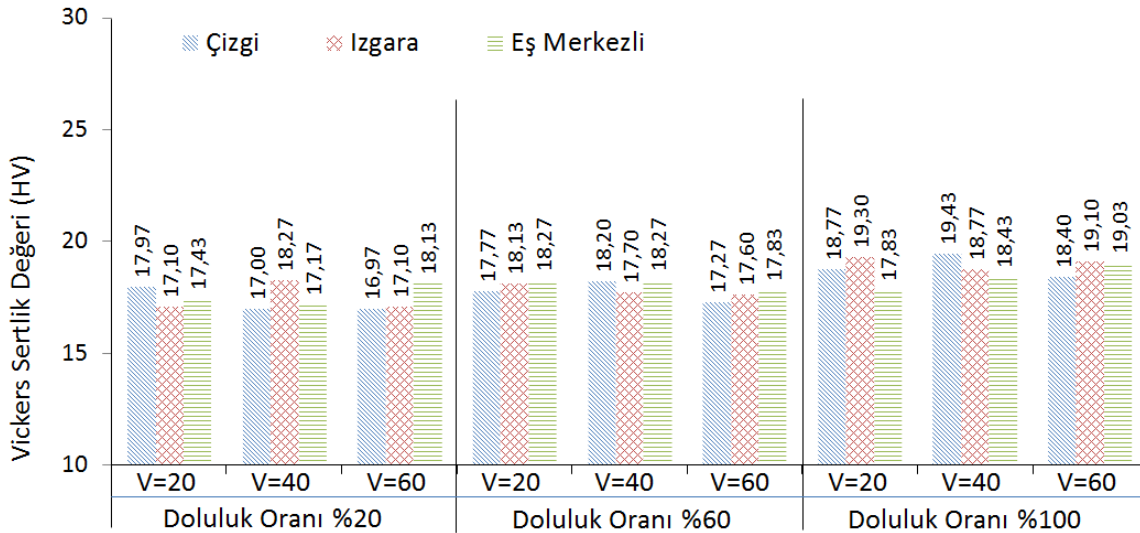
Sertlik doğrulama deneyi sonuçları

	Doluluk Oram (%)	Dolgu Deseni	Üretim Hızı (mm/sn)	Uygulanan Kuvvet (mN)	Ölçüm 1 (VSD)	Ölçüm 2 (VSD)	Ölçüm 3 (VSD)	Ortalama (VSD)
İlk Deney	100	Çizgi	40	19614	19.60	19.30	19.40	19.43
Doğrulama Deneyi	100	Çizgi	40	19614	19.20	19.30	19.20	19.23

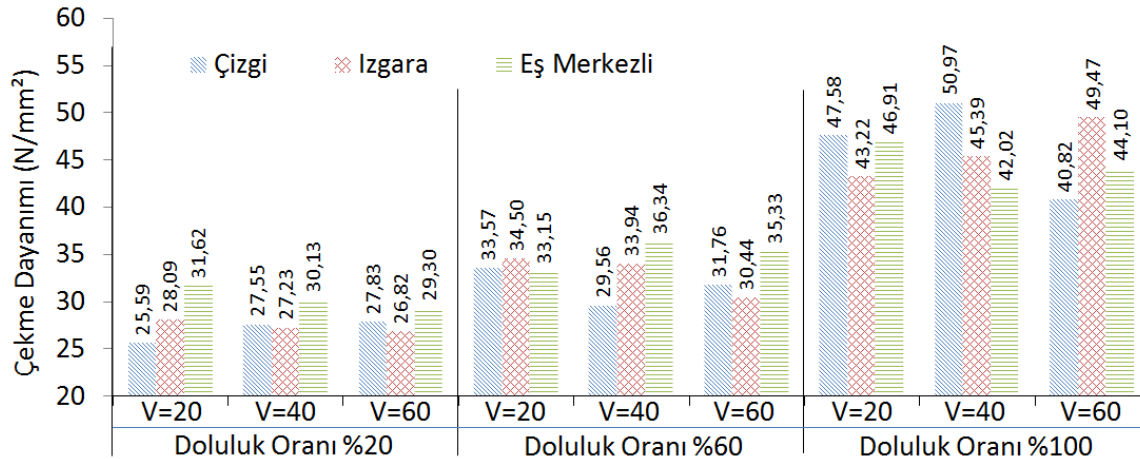
Çekme dayanımı doğrulama deneyi sonuçları

	Doluluk Oram (%)	Dolgu Deseni	Üretim Hızı (mm/sn)	Max. Kuvvet (N)	Max. Uzama (mm)	Max. Yüzde Uzama (%)	Max. Gerilme (N/mm ²)
İlk Deney	100	Çizgi	40	1223.24	1.41	4.29	50.97
Doğrulama Deneyi	100	Çizgi	40	1144.33	1.26	3.84	47.68

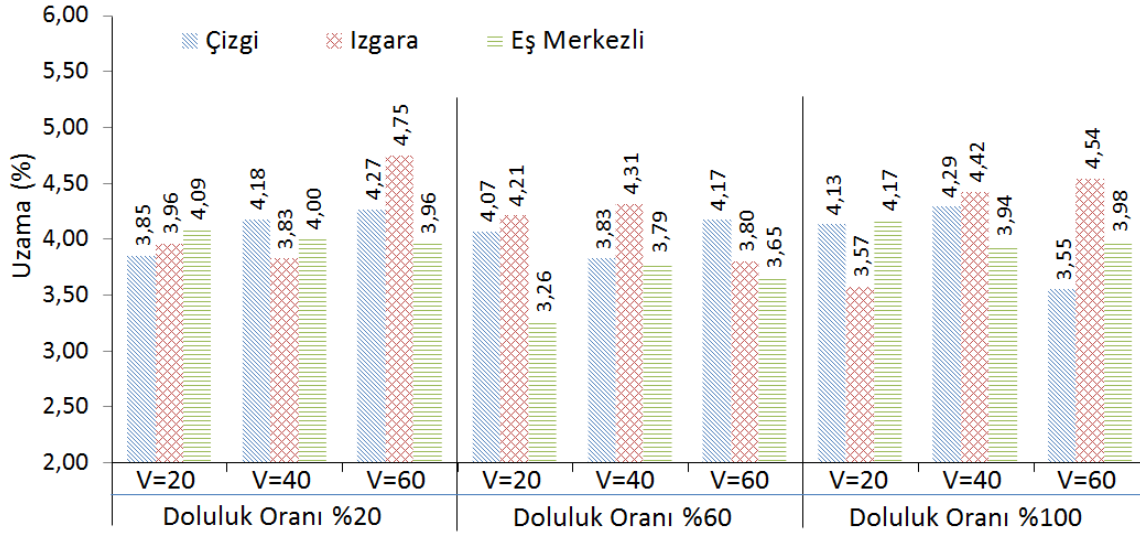
Şekil 3. Doğrulama deneyleri sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4. Farklı desen, doluluk oranları ve üretim hızlarına göre elde edilen Vickers sertlik değerleri



Şekil 5. Farklı desen, doluluk oranları ve üretim hızlarına göre elde edilen çekme dayanımı değerleri



Şekil 6. Farklı desen, doluluk oranları ve üretim hızlarına göre elde edilen uzama değerleri

4. Sonuçlar

Bu deneysel çalışma aşağıda maddeler halinde verilen sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

1-Bu çalışmada kullanılan 3B yazıcı özelliklerinde bulunan Çizgi (line), Izgara (Grid), Eş Merkezli (Concentric) olarak tanımlı dolgu deseni değişkeninin sertlik, uzama ve çekme mukavemeti açısından anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

2-Dolgu desenleri aynı olup, doluluk oranı arttıkça ve üretim hızı azaldıkça sertlik değerinin arttığı görülmüştür.

3- Literatürde tespit edilen üretim hızları en düşük 60 mm/sn, en yüksek 150 mm/sn arasında değişen değerlerdedir. Bu çalışmada tercih edilen (20, 40, 60 mm/sn) üretim hızlarının sertlik, uzama ve çekme mukavemeti açısından anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

4-PLA malzemesi kullanılarak yapılacak çalışmalarda, deney numunelerine ön kurutma işleminin yapılması, 3B yazıcının kapalı bir kabininin olması deney sonuçlarının güvenilirliği açısından önemlidir.

Kaynaklar

[1] ASTM F2792e12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies, West Conshohocken: ASTM International, 2012.
 [2] Yalçın B, Ergene B. Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *SDÜ Uluslararası Teknoloji Bilimi Dergisi*, 9(3), 65-88, 2017.

[3] Marcincinova LN, Marcincin JN, Barna J, Torok J. Special materials used in FDM rapid prototyping technology application, *Proceedings of IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, Lisbon, 73-76, 2012.
 [4] Gibson I, Rosen D, Stucker B. *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*, Second edition, Springer, 2015.
 [5] Sezer HK, Eren O, Börklü HR, Özdemir V. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2), 663-674, 2019.
 [6] Çelik İ, Karakoç F, Çakır MC, Duysak A. Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 53-70, 2013.
 [7] Edgar J, Tint S. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, *Johnson Matthey Technology Review*, 59(3), 193-198, 2015.
 [8] Tuan DN, Kashania A, Imbalzano G, Nguyena KTQ, Huib D, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196, 2018.
 [9] Ergene B, Sekeroğlu İ., Bolat Ç, Yalçın. B. An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness, *Journal of Mechanical Engineering And Sciences*, 15(2), 8169-8177, 2021.

- [10] ExOne, <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting> (Erişim Tarihi: 11.06.2021).
- [11] Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information Technologies, *Automation in Construction*, 13 (1), 5-19, 2004.
- [12] MakeItFrom.com, <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide> (Erişim Tarihi: 14.06.2021).
- [13] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee. West Conshohocken, 2014.
- [14] Taguchi G. *Taguchi on Robust Technology Development Methods*, ASME Press, New York, 1-40, 1993.
- [15] Koca N, *Dolgu maddeli polimer malzemelerin taguchi yöntemi ile performans optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [16] Bögrekci İ, Demircioğlu P, Sucuoğlu HS, Turhanlar O, The effect of the infill type and density, *International journal of 3d printing technologies and digital industry*, 3:3, 212-219, 2019.
- [17] Sucuoğlu HS, Bögrekçi İ, Demircioğlu P, Gültekin A, The Effect of Three Dimensional Printed Infill Pattern on Structural Strength, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(3), 785-796, 2018.
- [18] Harpool TD, *Observing the effects of infill shapes on the tensile characteristics of 3d printed plastic parts*, MSc Thesis, Wichita State University, USA, 2016.
- [19] Evlen H, Özdemir MA, Çalışkan A, Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri, *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1031-1037, 2019.
- [20] Wittbrodta B, Pearcea JM. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components, *Additive Manufacturing*, 8, 110–116, 2015.
- [21] Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials and Design*, 58, 242–246, 2014.
- [22] Kaygusuz B, Özerinç S. 3 Boyutlu yazıcı ile üretilen PLA bazlı yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(1), 1-6, 2018.
- [23] Pillin I, Montrelay N, Grohens Y. Thermo-mechanical characterization of plasticized PLA: Is The Miscibility The Only Significant Factor?. *Polymer*. 47(13), 4676-4682, 2006.
- [24] Akkurt S, Abs Plastiklerinin çekme kopma mukavemeti üzerine tavlama sıcaklığının etkisi, *Erciyes Üniversitesi Bilim Dergisi*, 3, 516-525, 1987.
- [25] Evlen H, Erel G, Yılmaz E, Açık ve kapalı sistemlerde doluluk oranının parça mukavemetine etkisinin incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 21(3), 651-662, 2018.