



Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer

Muhammed Safa Kamer^{1*}, Şemsettin Temiz², Hakan Yaykaşlı³, Ahmet Kaya¹, Orhan Erdal Akay¹

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 46040, Kahramanmaraş, Turkey

²Inonu University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 44280, Malatya, Turkey

³Kahramanmaraş İstiklal University, Elbistan Vocational School, Department of Electronics Technology, 46300, Kahramanmaraş, Turkey

Highlights:

- Production with fused deposition modelling (FDM) method in 3D printer
- The effect of printing speed on the mechanical properties of the manufactured product
- Imaging of breaking regions with scanning electron microscopy (SEM)

Keywords:

- 3D printer
- Fused deposition modelling (FDM)
- Tensile test
- Porosity
- Scanning electron microscopy (SEM)

Graphical/Tabular Abstract

In this study, tensile test specimens have been produced using ABS and PLA material at different printing speeds with Ultimaker 2 Extended 3d printer. The effect of printing speed on mechanical properties has been investigated. Masses, hardness and surface roughness of the produced samples have been measured, porosity values have been calculated and tensile test has been performed on the produced samples. After the tensile test, images have been taken by scanning electron microscopy (SEM) from the breaking regions of samples.

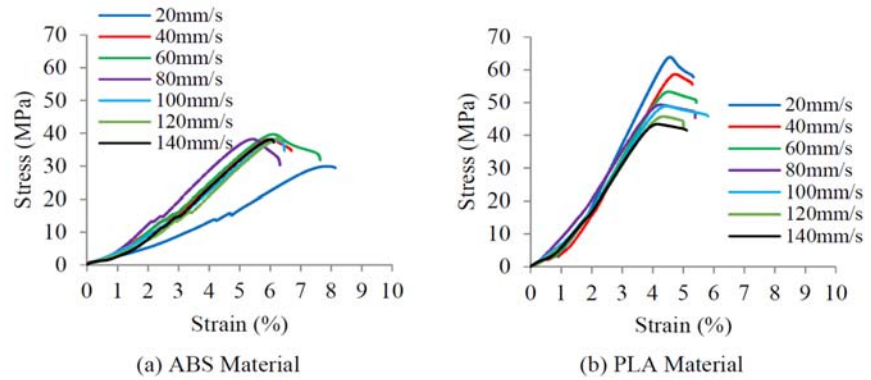


Figure A. Stress-strain curves of samples produced at different printing speeds

Article Info:

Research Article
Received: 03.07.2021
Accepted: 12.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.961981

Acknowledgement:

This work; it has been supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit of the Rectorate of Inonu University with the project number FDK-2020-2351.

Correspondence:

Author: Muhammed Safa Kamer
e-mail: msafakamer@ksu.edu.tr
phone: +90 344 300 1690

Purpose: This study has been carried out to determine the change in the mechanical properties of the products produced with the Ultimaker 2 Extended 3D printer, which produces with the Fused Deposition Modeling (FDM) method, with the printing speed.

Theory and Methods:

In this study, tensile test specimens have been produced at different printing speeds with FDM 3D printer. The effect of printing speed on mechanical properties has been investigated. The ASTM D638-14 standard has been used for sizing the tensile specimens. Tensile test has been applied to the produced samples, and after the tensile test, scanning electron microscopy (SEM) images have been taken from the breaking regions.

Results:

It has been determined that the tensile strength of the samples produced with PLA material are higher than the samples produced with ABS material, and the elongation at break values of the samples produced with ABS material are higher than the samples produced with PLA material.

Conclusion:

It has been determined that the mass, porosity, hardness, arithmetic average roughness and tensile strength values of the samples produced with ABS material did not change much with the increase in printing speed. However, it has been determined that the mass, hardness and tensile strength values decreased, and the porosity and arithmetic average roughness values increased of the samples produced with PLA material with the increase in printing speed.



3B yazıcıda farklı yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzeme ile üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

Muhammed Safa Kamer^{1*}, Şemsettin Temiz², Hakan Yaykaşlı³, Ahmet Kaya¹, Orhan Erdal Akay¹

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 46040, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

²Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 44280, Battalgazi, Malatya, Türkiye

³Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Elektronik Teknolojisi Bölümü, 46300, Elbistan, Kahramanmaraş, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- 3 boyutlu (3B) yazıcıda eriyik yığın modelleme (EYM) yöntemi ile üretim
- Yazdırma hızının üretilen ürünün mekanik özelliklerine etkisi
- Kopma bölgelerinin taramalı elektron mikroskopuyla (TEM) görüntülenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.07.2021

Kabul: 12.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.961981

Anahtar Kelimeler:

3B yazıcı,
eriyik yığın modelleme,
çekme testi,
porozite,
taramalı elektron
mikroskopu

ÖZ

Bu çalışmada, Ultimaker 2 Extended 3 boyutu yazıcı ile farklı yazdırma hızlarında (20-40-60-80-100-120-140mm/s), ABS (acrylonitrile butadiene styrene) ve PLA (poly-lactic acid) malzeme kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Yazdırma hızının, mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üretilen numunelerin kütleleri, sertlikleri ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, porozite değerleri hesaplanmış ve üretilen numunelere çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonrasında kopmuş numunelerin kopma bölgelerinden taramalı elektron mikroskopu (TEM) ile görüntüler alınmıştır. Her iki malzeme ile aynı parametrelerde üretilen numunelerin mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Sonuç olarak; PLA malzeme ile üretilen numunelerin çekme mukavemetlerinin ABS malzeme ile üretilen numunelerden daha yüksek olduğu, ABS malzeme ile üretilen numunelerin kopma uzaması değerlerinin de PLA malzeme ile üretilen numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer

H I G H L I G H T S

- Production with fused deposition modelling (FDM) method in 3D printer
- The effect of printing speed on the mechanical properties of the manufactured product
- Imaging of breaking regions with scanning electron microscopy (SEM)

Article Info

Research Article

Received: 03.07.2021

Accepted: 12.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.961981

Keywords:

3D printer,
fused deposition modelling,
tensile test,
porosity,
scanning electron
microscopy

ABSTRACT

In this study, tensile test specimens have been produced using ABS (acrylonitrile butadiene styrene) and PLA (poly-lactic acid) material at different printing speeds (20-40-60-80-100-120-140mm/s) with Ultimaker 2 Extended 3D printer. The effect of printing speed on mechanical properties has been investigated. Masses, hardness and surface roughness of the produced samples have been measured, porosity values have been calculated and tensile test has been performed on the produced samples. After the tensile test, images have been taken by scanning electron microscopy (SEM) from the breaking regions of the broken samples. The mechanical properties of the samples produced with the same parameters with both materials have been compared. As a result; it has been determined that the tensile strength of the samples produced with PLA material are higher than the samples produced with ABS material, and the elongation at break values of the samples produced with ABS material are higher than the samples produced with PLA material.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İmalat teknolojisinde, 3B yazıcı teknolojisi son on yılda hızla gelişme göstermiştir [1, 2]. Günümüzde imalatı zor olan karmaşık şekilli parçaların üretilmesinde, geleneksel yöntemlere göre avantajlı olması nedeniyle üç boyutlu yazıcılarla üretim teknolojisi yaygın olarak kullanılan bir teknik haline gelmiştir [3]. Bunun nedeni, 3B baskı tekniğinin parçaları katman katman üretilmesidir [4]. Ayrıca, 3B baskı tekniğinde plastik, metal ve seramik gibi farklı malzeme türleri ile parçalar üretilmektedir [5, 6]. 3B yazıcı teknolojisi imalat, otomotiv mühendisliği, biyomedikal mühendisliği alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [7, 8]. 3B yazıcı modelleri arasında EYM yöntemi hızlı baskı süresi, düşük maliyetli malzemelerin çeşitliliği, malzemelerin yüksek mukavemeti ve tokluğu nedeniyle diğer 3B yazıcı modellerine kıyasla daha yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. EYM ile üretim sürecinde yazdırma hızı, katman kalınlığı, yazdırma sıcaklığı, yazdırma yönü, destek yapısı vb. yazdırma parametrelerinin tümü ayarlanabilmektedir. EYM tekniğinde, filament eritilerek tabla üzerinde katman biriktirme işlemiyle parçalar üretilmektedir.

3B baskı teknolojisinin birçok avantajının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar arasında farklı malzemeler kullanılarak üretilen parçalar için mukavemet modellerinin henüz mevcut literatürde oluşturulmaması gösterilebilir [6]. 3B yazıcıların performansını [10, 11] ve üretilen parçaların özelliklerini [12, 13] etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bu parametreler: dolgu yoğunluğu [14], dolgu deseni, yazdırma sıcaklığı, yazdırma hızı vb. olarak sıralanabilir [15-17]. 3B yazıcı ile üretilen parçaların mekanik özelliklerine, üretim parametrelerinin etkisini inceleyen farklı çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu çalışmaların bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Wittbrodt ve Pearce çalışmalarında [18], RepRap 3B baskılı parça mukavemetini çevreleyen bilgi boşluğunu kapatmak, renk ve işlem sıcaklığının EYM'de biriktirilen PLA'nın malzeme özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için, tek bir tedarikçiden çeşitli renklerde PLA malzeme ile 3B yazıcıda test numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numunelere çekme testi yapmışlar, XRD (X-Ray Diffraction) ile kristal yapılarını incelemişler ve taramalı elektron mikroskobu ile mikro yapı değerlendirmesinde bulunmuşlardır. Sonuç olarak kristallığı optimize etmek için her renk için kritik bir baskı sıcaklığı olduğunu belirlemişlerdir. Yaman vd. [19], yapılandırılmış, homojen olmayan bir yapıya sahip yapay ağların 3B baskıları hakkında rapor hazırlamışlardır. 3B yazıcı ile üretilen ürün öncelikle CAM (Computer Aided Manufacturing) programında dilimlere ayrılır. 3B yazıcı bu dilimleri üretmek için gerçek tasarım üretilmiş olur. Nesnelere 3B yazıcı ile üretirken yazıcının biriktirdiği dilimlerin çoğu topolojik olarak aynıdır ve yalnızca içyapıda yerel olarak değişir. Dilimleme algoritması bu tutarlılıktan yararlanır ve malzeme bırakmayan yazıcı kafası hareketlerini en aza

indirir. Hareket sayısı baskı süresini ve yazdırılan ürünün kalitesini doğrudan etkilediğinden, malzeme bırakmayan yazıcı kafası hareketlerinin ve hızlı seyahatlerin ortadan kaldırılması çalışmalarının amacı olmuştur. Böylece aynı zamanda G-kodu dosya boyutlarının da azalmasını hedeflemişlerdir. Yılmaz ve Uğla [20] çalışmalarında, TIG (Tungsten Inert Gas) tel tabanlı Şekilli metal biriktirme (TW-SMD) yöntemini kullanarak bir eklemeli imalat sisteminin tasarımını, üretimini ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Biriktirme yönteminin sıkıcı ve zaman alan sürecini azaltabilen entegre bir sistem geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Solmaz ve Çelik [21], 3B yazıcı kullanarak ürettikleri bal peteği sandviç kompozitlerin basma yükü altındaki davranışlarını araştırmışlardır. 3 farklı hücre boyutuna ve 3 farklı hücre yüksekliğine sahip bal peteği hücrelerin üretilmesinde ABS ve PLA filament kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda PLA malzemenin ABS malzemeye göre daha üstün özelliklere sahip olduğunu belirlemişlerdir. Uzun vd. [22], 3B EYM yazıcı kullanarak yeni tip eğrisel evolvent profilli dişli üretmişler ve üretilen dişliler üzerinde geometrik ölçümler yaparak bu üretim yönteminin doğruluk değerlerini belirlemişlerdir. 3B yazıcı ile ürettikleri dişlinin diş profilinde yaptıkları ölçümlerde diş dibine yakın bölgelerde küçük bir pozitif sapma görülürken, dişin üst kısmına yakın bölgelerde negatif sapma tespit etmişlerdir. Yaman [23], erimiş yığın modelleme süreci kullanarak masaüstü 3B yazıcılarla üretilen ürünlerin deliklerindeki büzülme telafi edecek bir iç tasarım metodolojisi geliştirmiştir. Önerdiği yöntemle, ürünlerin geometrik özelliklerine göre deliklerdeki büzülme telafi etmek için çeşitli içyapılar inşa edilmesini öngörmüştür. Sonuç olarak, deliğin boyutsal doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmiştir. Dilberoğlu vd. [24], EYM yöntemiyle üretim yapılan 3B yazıcılarla üretilen parçaların büzülme sorunlarını çözmeyi ve boyutsal doğruluğu iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Deliklerin/yuvaların boyutsal doğruluğundaki bozulmayı önlemek için delik çevresinden ürünün dış sınırlarına kadar yer alan yardımcı hatlardan yararlanmışlardır. Ayrıca üretilen ürünler üzerinden gerekli ölçümler alınarak, yeni üretilen numunelerin büzülme davranışlarını tahmin edebilmek için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Schirmeister vd. [25] 3B yazıcı ile HDPE (high density polyethylene) malzeme kullanılarak üretilen parçaların Young modülünü, çekme mukavemetini ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla nozul çapı, nozul sıcaklığı, yazdırma hızı, yazdırma tablası sıcaklığı ve yazdırma tablası malzemesi gibi 3B yazdırma parametrelerini değiştirerek test numuneleri üretmişlerdir. Nozul çapı ve yazdırma hızının yüzey kalitesini etkilediğini ancak mekanik özellikleri etkilemediğini belirlemişlerdir. Sezer vd. [26], EYM ile üretilen ürünlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyeli ABS kompozit filament üretmişlerdir. Ürettikleri filament ile 3B yazıcıda çekme test numuneleri üretmişler ve karbon elyaf takviyesinin ABS malzeme ile üretilen ürünlerin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyesi

ile parça mukavemetinin önemli ölçüde iyileştirilmesine karşın; esneklik ve işlenebilirliğin artan takviye içeriği ile azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yazdırma deseninin mekanik özellikleri önemli derecede etkilediğini saptamışlardır. Yaman [27], eriyik yığıma modelleme ile üretim yapan 3B yazıcılarda üretilecek ürünlere topoloji optimizasyonu yaparak, ürünlerin doğrudan üretilebilmeleri için makine komutları üreten bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirdiği yöntemde öncelikli olarak verilen parçanın tanımlanan koşullara göre topoloji optimizasyonu yapılmakta ve sonrasında parçanın içyapısı kabuklardan oluşacak şekilde üretim komutları oluşturulmaktadır. Yöntemin geçerliliğini ortaya koymak için farklı yaklaşımlarla üretilmiş olan yalın, dayanıklı kirişleri belirli yükler altında test etmiştir. Sonuç olarak, önerdiği yöntemle üretilen kirişlerin ağırlık-mukavemet oranlarının diğerlerine göre oldukça iyi olduğunu belirlemiştir. Yaman vd. [28], farklı eklemeli üretim yöntemlerinde desenli girintiler oluşturmak için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Mevcut yöntemlerle üretim yapan 3B yazıcılarda desenli üretimler yapabilmek için tasarımı oluşturulacak girintiler, tasarım dosyasının boyutunu önemli ölçüde artırmaktadır. Bu çalışmayla önerilen yöntemde basılı ürünün enine kesitlerini temsil eden bir dizi ikili görüntü üzerinde morfolojik işlemler kullanarak, dokulu nesnelere üretirken bu tür sorunların üstesinden gelmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca önerdikleri yöntemin hemen hemen her 3B yazıcının mevcut donanımlarının kullanılarak uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Harris vd. [29], termal yaşlanmadan sonra bile yüksek mekanik özellikler sağlayabilen EYM için bir polietilen graft maleik anhidrit (PE-g-MAH) varlığında bir ABS ve HDPE (High Density Polyethylene) karışımı geliştirmişlerdir. Karışımın, mevcut EYM harmanlama malzemeleri arasında en yüksek mekanik özelliklerden birine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Uzun ve Erdoğan [30], 3B yazıcı ile takviyesiz, %20 bakır takviyeli ve %20 karbon fiber takviyeli PLA kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri numuneleri çekme testi ve üç nokta eğme testine tabi tutarak mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. PLA malzemesine bakır ve karbon fiber takviyelerinin eklenmesinin çekme ve eğilme mukavemetlerini azalttığını belirlemişlerdir. Çakan vd. [31], öksetik bal peteği yapısının darbe yüklemesi altında farklı yönlerdeki mekanik davranışını incelemişlerdir. Düzlem-içi ile düzlem-dışı yönler için ABS filamentini kullanılarak malzeme ekstrüzyonuyla öksetik bal peteği yapısına sahip kutular üretmişler ve düşürme test cihazı ile dinamik testler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca düzlem-içi ile düzlem-dışı yönler için sonlu elemanlar modelleri oluşturarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak deneysel ve sayısal çalışmalar neticesinde, düzlem-dışı yüklenme durumunda öksetik bal peteği geometrisinin enerji sönmeme özelliğinin daha üstün olduğunu belirlemişlerdir. Keçagias vd. [32], düşük enerjili CO₂ lazerle kesilmiş PLA 3B baskılı plakaların yüzey kalitesi özelliklerini araştırmışlardır. Kesimin ortalama yüzey pürüzlülüğünü (Ra) ve yüzey kalitesi özelliklerinden elde edilen Kerf açısını (KA) araştırmışlardır. Lazer hızının hem X hem de Y yönlerinde Kerf açısı ve Ra için baskın parametre olduğunu

belirlemişlerdir. Quarto vd. [33], metal numunelerin boyutsal büzülme ve yığın yoğunluğu üzerindeki bazı ilgili EYM baskı parametrelerinin olası etkisini araştırmışlardır. Metal numunelerin boyutsal küçülmesi ve yığın yoğunluğu için en iyi kombinasyonun Line dolgu deseni, 0,1 mm katman kalınlığı ve 20mm/s baskı hızı olduğunu belirlemişlerdir.

Literatürdeki birçok çalışma, 3B yazıcılarda üretilen parçalarda mekanik özellikler üzerinde baskı hızı parametresinin etkisinin incelenmesi gerektiğini ön plana çıkarmaktadır. Bunun nedeni olarak, günümüzde hem kullanılan polimer malzemelerin çeşitliliği hem de 3B yazıcıların birçok model ve marka olması, ayrıca açık kaynak yazılımların günden güne gelişmesi gösterilmektedir [2]. 3B yazıcı ile üretilen parçaların mekanik özelliklerine, yazdırma hızının etkisini inceleyen çalışmaların bazıları aşağıda sıralanmıştır.

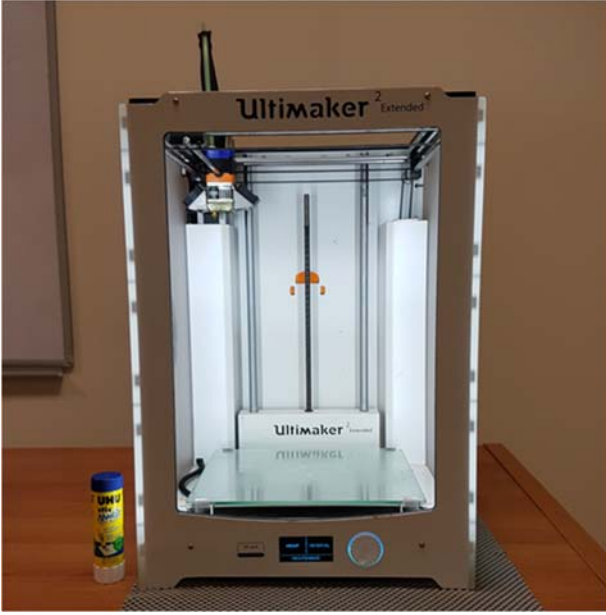
Aydın vd. [34], PLA filament kullanarak farklı sıcaklıklarda 3B yazdırılmış numunelerin özelliklerinin yazdırma hızı ile değişimini incelemişlerdir. Yazdırma nozul sıcaklığının artmasıyla malzemelerin üst yüzey sertlik değerlerinin genel olarak arttığını, malzemelerin alt yüzey sertlik değerlerinin üst yüzey sertlik değerlerinden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Yazdırma nozul sıcaklığının artmasıyla çekme dayanımının arttığını, yazdırma hızının artmasıyla da çekme dayanımının azaldığını belirlemişlerdir. Günay [35], EYM yöntemiyle PLA malzeme kullanılarak üretilen parçaların bazı mekanik özelliklerinin tahmin edilebilmesi için matematiksel modeller geliştirmiştir. Bu amaçla 3B yazıcı ile 3 farklı yazdırma hızında, 3 farklı doluluk oranında ve 2 farklı raster açısında çekme ve eğme test numuneleri üretmiştir. Belirlenen parametrelerin çekme ve eğilme mukavemetleri üzerindeki etkilerini deneysel ve istatistiksel olarak analiz etmiştir. Yazdırma hızındaki artışın çekme ve eğilme mukavemetini azalttığını belirlemiştir. Tao vd. [36], PLA malzeme kullanılarak 3B yazıcı (EYM) ile farklı baskı parametrelerinde (katman yüksekliği, parçanın yönelim açısı ve yazdırma hızı) üretilen parçaların mekanik özelliklerini (elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma uzaması) incelemişlerdir. Sonuç olarak, katman kalınlığının artması ve yazdırma hızının azalması ile çekme mukavemetinin arttığını belirlemişlerdir. En uygun baskı parametrelerin; katman yüksekliği 0,2mm ve yazdırma hızı 20-30mm/s olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada; 3B yazıcıda yazdırma hızının değişimi ile üretilen ürünün mekanik özelliklerinin değişimi detaylı bir şekilde, çok yönlü olarak incelenmiştir. Ultimaker 2 Extended 3B yazıcı ile farklı yazdırma hızlarında (20-40-60-80-100-120-140mm/s), ABS ve PLA malzeme kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Yazdırma hızının, mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üretilen numunelerin kütleleri, sertlikleri ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, porozite değerleri hesaplanmış ve üretilen numunelere çekme testi yapılmıştır. Belirtilen değişkenlerin birbiri arasındaki ilişkiler detaylı bir biçimde ele alınmıştır. Çekme testi sonrasında kopmuş numunelerin kopma bölgelerinden TEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca üretimde

kullanılan ABS ve PLA filamentlere de çekme testi uygulanmıştır. Yazdırma işlemi sonrasında filament malzemesinin mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

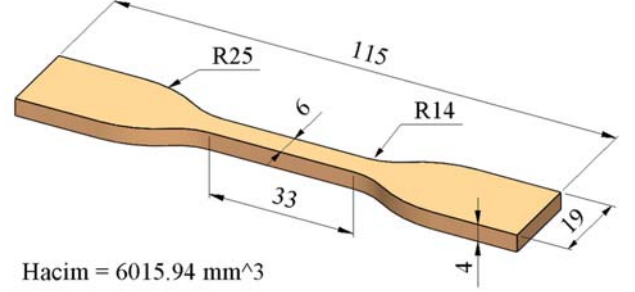
Çalışma kapsamında kullanılan 3 boyutlu yazıcı ve üretilen test numunelerinin mekanik özelliklerini belirlemede Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ve Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi ÜSKİM imkânları kullanılmıştır. Test numunelerinin üretiminde “Ultimaker 2 Extended” [37, 38] 3 boyutlu yazıcı kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Test numunelerinin üretiminde kullanılan Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcı
(Ultimaker 2 Extended 3D printer used in the production of test samples)

Çekme numunelerinin boyutlandırılmasında ASTM D638-14 standardı [39] kullanılmıştır. Bu standart içerisinde Tip IV^B (Şekil 2) ölçülerinde numuneler üretilmiştir. Belirtilen

standart ölçülerindeki çekme numunesi 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında SolidWorks CAD (Computer Aided Design) yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır.



Şekil 2. ASTM D638-14 standardı tip IV^B
(ASTM D638-14 standard type IV^B)

SolidWorks CAD yazılımı ile 3 boyutlu olarak tasarımı yapılan çekme numunesinin G-kodlarının oluşturulmasında Ultimaker markasının kendi yazılımı olan Cura CAM yazılımı kullanılmıştır. Tasarımın yazıcı tablası üzerindeki konumu, açısı vb. ayarlar yapıldıktan sonra Tablo 1’de belirtilen parametreler seçilerek tasarımın G-kodları oluşturulmuştur. Oluşturulan G-kodları SD kart yardımıyla 3 boyutlu yazıcıya aktarılmıştır.

Tablo 1’de belirlenen parametrelerle üretilen test numunelerinin bir kesiti SolidWorks CAD yazılımı ile 3 boyutlu olarak tasarlanmış ve Şekil 3a’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi üretilen numunelerin dış duvarlarında 2 sıra örgü bulunmaktadır. Ayrıca yine şekilde görüldüğü gibi Cura CAM yazılımında Lines dolgu deseninin seçilmesi ile dış duvarlar hariç olacak şekilde, tasarımın ilk katmanında dolgu deseni örgüleri dış duvarlara 45° açı yapacak şekilde, kalan diğer katmanlarda da her katmanda bir önceki katmanın 90° tersi yönünde olacak şekilde dolgu deseni örgüleri oluşturulmuştur.

ABS malzeme ile çekme test numunesi üretiminde öncelikle 3 boyutlu yazıcıda yazdırma tablasının manuel olarak kalibrasyonu yapılmıştır. 3 boyutlu yazıcıya Ultimaker marka ABS turuncu malzeme [40, 41] takılmıştır. 3 boyutlu

Tablo 1. Cura CAM yazılımında seçilen parametreler (Parameters selected in Cura CAM software)

Yazıcı	Ultimaker 2 Extended with Olsson Block	
Malzeme	Ultimaker ABS turuncu veya Ultimaker PLA turuncu	
Nozul Sıcaklığı	260°C - ABS malzeme	230°C - PLA malzeme
Tabla Sıcaklığı	80°C - ABS malzeme	60°C - PLA malzeme
Nozul çapı	0,4mm	
Katman kalınlığı	0,2mm	
Duvar kalınlığı	0,8mm	
Üst/Alt kalınlığı	0,8mm	
Dolgu yoğunluğu	%100	
Dolgu deseni	Lines	
Yazdırma yönü	Düz (XY) (Şekil 3b)	
Yazdırma hızı	20-40-60-80-100-120-140mm/s (7 farklı yazdırma hızında test numuneleri üretilmiştir)	
Boşta gezme hızı	120mm/s	

yazıcının yazdırma tabla sıcaklığı 80°C'ye (Ultimaker ABS malzeme ürün etiketinde belirtilen değere) ayarlanmıştır. 3 boyutlu yazıcının nozul sıcaklığı 260°C'ye (225-260°C Ultimaker ABS malzeme ürün etiketinde belirtilen sıcaklık aralığı) ayarlanmıştır.

PLA malzeme ile çekme test numunesi üretiminde öncelikle 3 boyutlu yazıcıda yazdırma tablasının manuel olarak kalibrasyonu yapılmıştır. 3 boyutlu yazıcıya Ultimaker marka PLA turuncu malzeme [42, 43] takılmıştır. 3 boyutlu yazıcının yazdırma tabla sıcaklığı 60°C'ye (Ultimaker PLA malzeme ürün etiketinde belirtilen değere) ayarlanmıştır. 3 boyutlu yazıcının nozul sıcaklığı 230°C'ye (195-240°C Ultimaker PLA malzeme ürün etiketinde belirtilen sıcaklık aralığı) ayarlanmıştır.

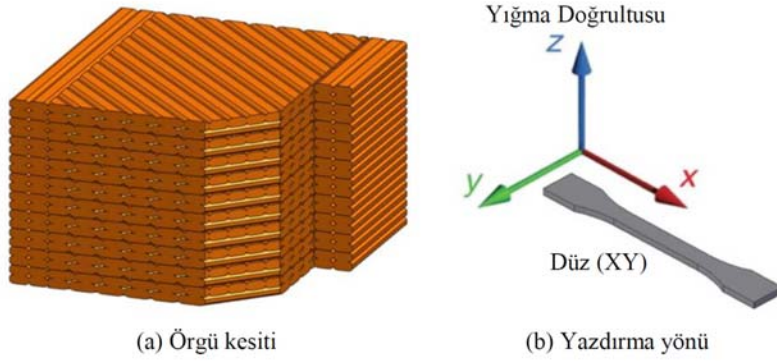
Üretim işlemini başlatmadan önce, üretim sırasında numunenin ilk katmanının cam yazdırma tablasına daha iyi yapışmasını sağlamak için yazdırma tablası üzerine ince bir film tabakası kalınlığında stick yapıştırıcı (Uhu Stic Magic Blue) sürülmüştür.

7 farklı yazdırma hızında (20-40-60-80-100-120-140mm/s) çekme numuneleri üretilmiştir. Her yazdırma hızı için 3'er adet olmak üzere her malzemeden 21 adet olacak şekilde toplam 42 adet çekme numunesi üretilmiştir. Üretim sırasında filamentten kaynaklanabilecek düzensizlikleri en aza indirebilmek için aynı markanın aynı renkteki ABS ve

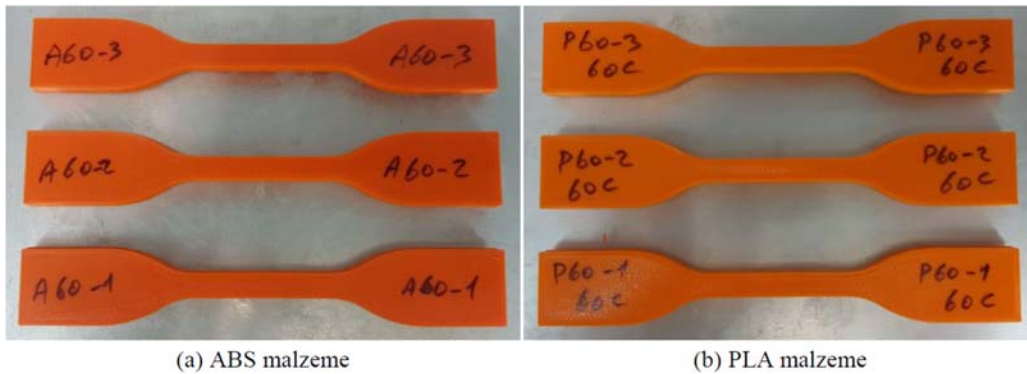
PLA filamentleri (Ultimaker ABS Turuncu 2,85mm filament ve Ultimaker PLA Turuncu 2,85mm filament) kullanılmıştır. Üretilen numunelerin bir kısmının görüntüleri Şekil 4'de verilmiştir.

Üretilen çekme numunelerinin kütleleri, sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve numunelere çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonrasında kopmuş numunelerin kopma bölgelerinin TEM görüntüleri alınmıştır. Kütle ölçümleri KERN PLS 6200-2A (kapasite: 6200g, hassasiyet: 0,01g) hassas terazi ile yapılmıştır. Sertlik ölçümleri MITECH MH210 portatif sertlik ölçüm cihazıyla Shore D cinsinden yapılmıştır. Her numunenin üst yüzeyinde ve alt yüzeyinde 5 farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, JENOPTIK Hommel-Etamic W5 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla Tablo 2'de verilen parametrelerde yapılmıştır. Numunelerin alt yüzeyleri cam yazdırma tablasına temas halinde olduğundan ve ayrıca bu cam tabla üzerine yazdırılan malzemenin tutunabilmesini sağlamak amacıyla stick yapıştırıcı sürüldüğünden, numunelerin alt yüzeyindeki pürüzlülüğün yazdırma hızları arasındaki farkı net bir şekilde yansıtamayacağı tarafımızdan değerlendirilmiştir. Bu nedenle her numunenin üst yüzeyinden ölçümler alınmıştır.

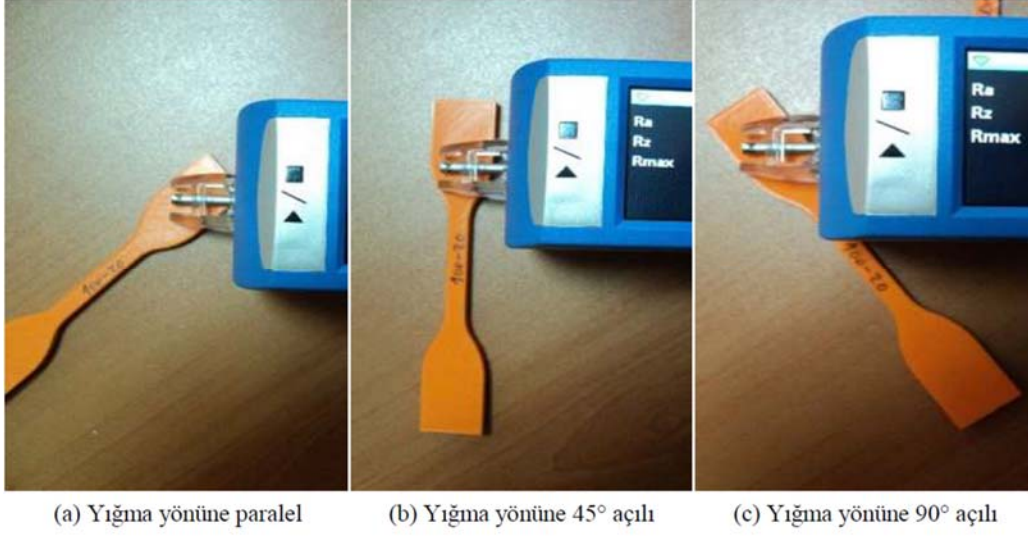
Pürüzlülük cihazı üst yüzeyde yığıma yönüne paralel (Şekil 5a), yığıma yönüne 45° açılı (Şekil 5b) ve yığıma yönüne 90°



Şekil 3. Duvar kalınlığı 0,8mm ve Dolgu deseni Lines olarak seçilen test numunesinin örgü kesiti tasarımı (Mesh cross-section design of the selected test sample with a wall thickness of 0.8mm and infill pattern Lines)



Şekil 4. Çekme testi numuneleri (Tensile test specimens)



Şekil 5. Pürüzlülük ölçüm açıları (Roughness measuring angles)

açılı (Şekil 5c) olacak şekilde konumlandırılmış olup, her durum için 3 farklı noktadan ölçümler yapılarak ortalama değerler belirlenmiştir. Çekme testleri 100kN kapasiteli Zwick/Roell Z100 çekme test cihazıyla, 5mm/dk hızda ve ASTM D638-14 standardı kullanılarak yapılmıştır. Çekme test cihazının minimum ekstansometre aralığı, seçilen çekme numunesinin (ASTM D638-14 standardı tip IV^B) ölçüm uzunluğundan (Gage Length=25mm) daha fazla olduğundan, çekme testleri ekstansometre kullanılmadan yapılmıştır. Çekme testlerinde kopmuş numunelerin kopma bölgelerinin görüntüleri ZEISS EVO LS 10 Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) ile alınmıştır. Ayrıca her iki malzeme ile üretilen numunelerin yazdırılmasında kullanılan Ultimaker ABS Turuncu 2,85mm ve Ultimaker PLA Turuncu 2,85mm filamentlere çekme testi uygulanmış olup, bu filamentlerin çekme testleri de aynı çekme test cihazıyla 5mm/dk hızda ve ASTM D638-14 standardı kullanılarak yapılmıştır. Ultimaker ABS Turuncu 2,85mm filamentten 3 adet ve Ultimaker PLA Turuncu 2,85mm filamentten 3 adet olacak şekilde toplam 6 adet filament çekme testi yapılmıştır. Filament çekme numuneleri 175mm boyunda kesilmiş olup, 25mm her iki uçta çekme çenelerinin içerisine yerleştirilmiştir. Böylece çekme çenelerinin arasında kalan 125mm'lik kısma çekme testi uygulanmıştır. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen çekme test numuneleri ile benzer şartlarda test edilmesi amacıyla filament çekme testleri de ekstansometre kullanılmadan gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcı ile ABS ve PLA malzeme kullanılarak, 7 farklı yazdırma hızında (20-40-60-80-100-120-140mm/s) çekme test numuneleri üretilmiştir.

Farklı yazdırma hızlarında üretilen test numunelerinin kütle değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde Cura CAM programından alınan filament boyu verilerinin

tüm numuneler için aynı olduğu görülmektedir. Bu da programda hesaplanan yazdırma için gerekli olan malzeme miktarının her malzeme için tüm yazdırma hızlarında aynı olması gerektiği anlamına gelmektedir.

Tablo 2. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm parametreleri
(Parameters of surface roughness measurement)

Ölçüm uzunluğu (lt)	4,8mm
Ölçüm hızı (vt)	0,5mm/s
Dalga boyu (lc)	0,8mm

Cura programında belirtilen 0,97m'lik filamentin, ABS malzeme yoğunluğu (1,10 g/cm³) [40, 41] kullanılarak teorik kütlesi 6,80g olarak hesaplanmıştır. Programdan alınan filament boyu verileri tüm yazdırma hızlarında eşit olduğundan, tüm yazdırma hızlarında kullanılan ABS filament kütlesinin de aynı (6,80g) olması gerekmektedir. Tablo 3 incelendiğinde yazdırma hızının artmasıyla üretilen numunelerin ve buna bağlı olarak kullanılan filamentin kütlesinde neredeyse hiç değişiklik olmadığı görülmektedir. Tablo 3'de görülen küçük kütle farklılıklarının numuneler üzerindeki yapıştırıcı kalıntıları, üretim sırasındaki buharlaşma miktarı gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Cura programında belirtilen 0,97m'lik filamentin, PLA malzeme yoğunluğu (1,24 g/cm³) [42, 43] kullanılarak teorik kütlesi 7,67g olarak hesaplanmıştır. Programdan alınan filament boyu verileri tüm yazdırma hızlarında eşit olduğundan, kullanılan PLA filament kütlesinin de aynı (7,67g) olması gerekmektedir. Fakat Tablo 3 incelendiğinde yazdırma hızı arttıkça üretilen numunelerin ve buna bağlı olarak kullanılan PLA filamentin kütlesinin azaldığı görülmektedir. Bu farkın, 3 boyutlu yazıcının filament besleme motorunun PLA malzemeyi yüksek hızlarda beslemekte yetersiz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. PLA malzeme, ABS malzemeye göre bir miktar daha sert olduğundan, filament besleme motorunun

filamenti beslemekte kullandığı desenli silindirik iticinin desen tırnaklarının yüksek hızlarda PLA malzemenin içerisine yeterince giremediği düşünülmektedir. Bu nedenle yüksek hızlarda filament besleme motorunun beslediği hızda PLA filament 3 boyutlu yazıcıya aktarılamamakta ve bir miktar patinaj ile aktarılmaktadır. Bu durum da yüksek hızlarda PLA malzeme kullanılarak üretilen çekme numunelerinin kütlelerinde azalma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun sonucu olarak üretilen test numunelerinin bazı bölgelerinde boşluklar oluşmaktadır.

Tablo 3’de verilen değerler yardımıyla bir grafik (Şekil 6) oluşturulduğunda, yazdırma hızının artmasıyla Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcı ile PLA malzeme kullanılarak üretilen ürünlerin kütlelerinin lineer bir değişim göstererek azaldığı söylenebilir. Fakat grafik incelendiğinde yazdırma hızının artmasıyla ABS malzeme kullanılarak üretilen ürünlerin kütlelerinin neredeyse değişmediği görülmektedir.

3 boyutlu yazıcı ile üretilen ürünler ile ilgili bir diğer parametre ise porozitedir. Porozite, üretilen ürün içerisindeki boşluk hacminin, tasarımın toplam hacmine oranı olarak ifade edilebilir (Eş. 1). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen bir ürünün içerisindeki boşluk hacmi; tasarımın toplam hacminden, üretilen ürünün kütlesine karşılık gelen yazdırma hacmi çıkartılarak hesaplanabilir (Eş. 2). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ürünün kütlesine karşılık gelen yazdırma hacmi ise

3 boyutlu yazıcı ile üretilen ürünün kütlesinin, üretimde kullanılan filament malzemesinin yoğunluğuna bölünmesiyle hesaplanabilir (Eş. 3).

$$\phi = \frac{V_b}{V_T} \cdot 100 \quad (1)$$

$$V_b = V_T - V_p \quad (2)$$

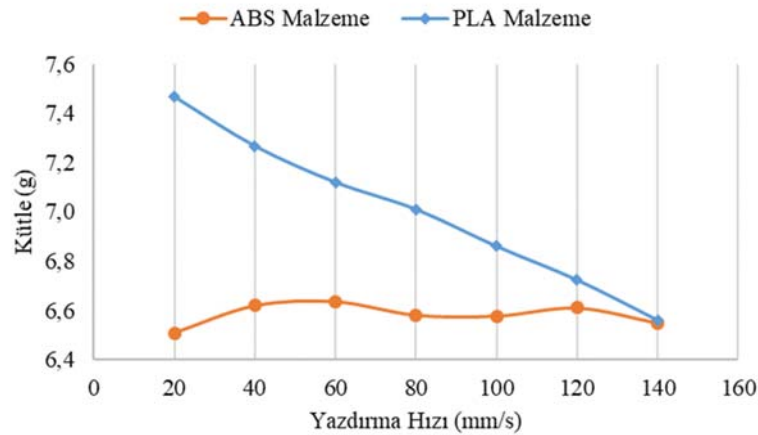
$$m = \rho \cdot V_p \Rightarrow V_p = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

Burada;

- ϕ : poroziteyi,
- V_b : 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ürünün içerisindeki boşluk hacmini,
- V_T : tasarımın toplam hacmini,
- V_p : 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ürünün kütlesine karşılık gelen yazdırma hacmini,
- m : 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ürünün kütlesini,
- ρ : üretimde kullanılan filament malzemesinin yoğunluğunu ifade etmektedir.

Tablo 3. Test numunelerinin kütleleri (Masses of test samples)

Yazdırma Hızı (mm/s)	Cura’dan alınan değerler		Ölçülen değerler	
	Yazdırma süresi (min)	Filament boyu (m)	Ortalama kütle (g)	Ortalama kütle (g)
20	124	0,97	6,51	7,47
40	63	0,97	6,62	7,27
60	43	0,97	6,64	7,12
80	33	0,97	6,58	7,01
100	27	0,97	6,58	6,86
120	23	0,97	6,61	6,72
140	20	0,97	6,55	6,56



Şekil 6. ABS ve PLA malzemeler ile üretilen test numunelerinin kütlelerinin yazdırma hızı ile değişimi (Variation of mass of test samples produced with ABS and PLA materials with printing speed)

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak her iki malzeme ile farklı yazdırma hızlarında üretilen ürünlerin porozite değerleri hesaplanmış olup, Tablo 4 ve Tablo 5’de verilmiştir. Üretilen test numunelerinin toplam yazdırma hacmi, tüm test numunelerinin ayrı ayrı dijital kumpasla (çözünürlük 0,01mm) ölçülmesiyle hesaplanmış olup, her parametre için ortalama değerler Tablo 4 ve Tablo 5’de verilmiştir. Ayrıca üretimde kullanılan Ultimaker ABS ve PLA Turuncu filament malzemelerinin yoğunlukları da Ultimaker markasının ABS [40, 41] ve PLA [42, 43] filament kataloglarından alınmıştır. Yazdırma sırasında ABS ve PLA malzemelerde yoğunluk değişiminin olmadığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. ABS malzeme kullanılarak üretilen numuneler arasında sadece 20mm/s yazdırma hızı ile üretilen ürünlerin porozite değerlerinin diğer yazdırma hızları ile üretilen ürünlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak; yazdırma hızının çok düşük olması, ABS filamentin sıcak nozul içerisinde çok fazla beklemesi ve nozulun bir önceki katmanda yazdırılmış olan ürüne daha düşük bir hızda temas ederek uzun süre ürünün tekrar ısınmasına sebep olması nedenleriyle, üretilen ürünün kimyasal özelliklerinin ve yoğunluğunun değişmiş olması gösterilebilir. Bu yazdırma hızıyla üretilen ürünlerin toplam yazdırma hacmi değerleri de diğerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Buna rağmen ürün kütlelerinde çok fazla değişimin olmaması, üretilen ürün içerisinde hava boşluklarının oluştuğunu göstermektedir. Bu nedenlerle ABS malzeme kullanılarak 20mm/s yazdırma hızı ile

üretilen ürünlerden elde edilen veriler değerlendirmeye alınmamıştır.

Her iki malzeme için Tablo 4 ve Tablo 5’de verilen değerler kullanılarak, üretilen test numunelerinin porozite değerlerinin yazdırma hızı ile değişimini gösteren bir grafik çizilmiştir (Şekil 7). Şekil 7 incelendiğinde, yazdırma hızının artmasıyla Ultimaker 2 Extended 3 boyutlu yazıcı ile PLA malzeme kullanılarak üretilen ürünlerin porozite değerlerinin de arttığı ve bu artışın lineer bir değişim gösterdiği söylenebilir. Yazdırma hızının artmasıyla PLA malzeme ile üretilen ürünlerin porozite değerlerinin artması literatürdeki benzer çalışmalarla uyum sağlamaktadır [36]. Fakat grafik incelendiğinde yazdırma hızının artmasıyla ABS malzeme kullanılarak üretilen ürünlerin porozite değerlerinin neredeyse değişmediği görülmektedir. Yine grafik incelendiğinde, aynı yazdırma hızlarına karşılık gelen porozite değerleri arasında ABS malzeme kullanılarak üretilen ürünlerin porozite değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Test numunelerinin Shore D sertlik değerleri Tablo 6’da verilmiştir. Her numunenin alt ve üst yüzeylerinin sertlikleri ölçülmüştür. Tablo 6 incelendiğinde yazdırma hızının artmasıyla PLA malzeme kullanılarak üretilen numunelerin üst yüzeylerindeki sertlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Fakat yazdırma hızının artmasıyla ABS malzeme kullanılarak üretilen numunelerin üst yüzeylerindeki sertlik

Tablo 4. ABS malzeme kullanılarak 3B yazıcı ile farklı yazdırma hızlarında üretilen test numunelerinin hesaplamalarla tespit edilen hacim ve porozite değerleri

(The volume and porosity values, determined by calculations, of the test samples produced by 3D printer at different printing speeds using ABS material)

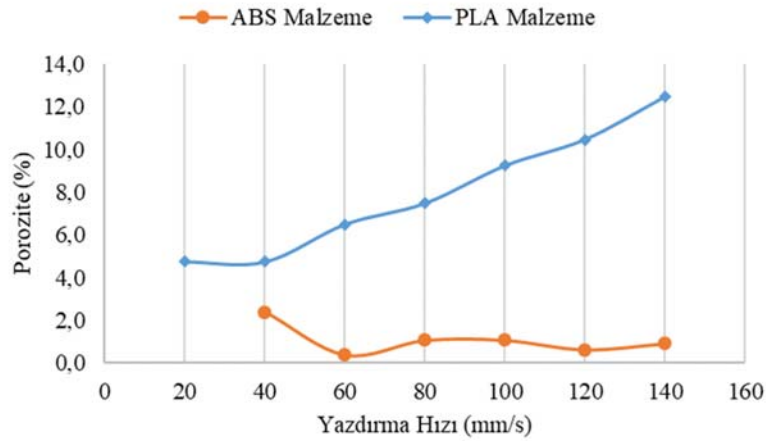
Yazdırma Hızı (mm/s)	Kütle m (g)	Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Örgü Hacmi V_p (mm ³)	Toplam Yazdırma Hacmi V_T (mm ³)	Boşluk Hacmi V_b (mm ³)	Porozite ϕ (%)
20	6,51	1,10	5915,15	6828,39	913,24	13,37*
40	6,62	1,10	6018,18	6165,27	147,09	2,39
60	6,64	1,10	6033,33	6057,01	23,68	0,39
80	6,58	1,10	5981,82	6046,02	64,20	1,06
100	6,58	1,10	5978,79	6043,01	64,22	1,06
120	6,61	1,10	6009,09	6046,92	37,83	0,63
140	6,55	1,10	5951,52	6006,07	54,55	0,91

* İtalic olarak belirtilen veriler değerlendirmeye alınmamıştır.

Tablo 5. PLA malzeme kullanılarak 3B yazıcı ile farklı yazdırma hızlarında üretilen test numunelerinin hesaplamalarla tespit edilen hacim ve porozite değerleri

(The volume and porosity values, determined by calculations, of the test samples produced by 3D printer at different printing speeds using PLA material)

Yazdırma Hızı (mm/s)	Kütle m (g)	Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Örgü Hacmi V_p (mm ³)	Topla Yazdırma Hacmi V_T (mm ³)	Boşluk Hacmi V_b (mm ³)	Porozite ϕ (%)
20	7,47	1,24	6021,51	6321,02	299,51	4,74
40	7,27	1,24	5860,22	6151,30	291,08	4,73
60	7,12	1,24	5741,94	6140,13	398,19	6,49
80	7,01	1,24	5653,23	6109,49	456,26	7,47
100	6,86	1,24	5532,26	6094,65	562,39	9,23
120	6,72	1,24	5422,04	6054,80	632,76	10,45
140	6,56	1,24	5290,32	6042,58	752,26	12,45



Şekil 7. ABS ve PLA malzemeler ile üretilen test numunelerinin porozitelerinin yazdırma hızı ile değişimi
(The variation of the porosity of the test samples produced with ABS and PLA materials with the printing speed)

Tablo 6. Test numunelerinin sertlikleri (Hardness of test samples)

Yazdırma Hızı (mm/s)	Shore D Sertlik Değerleri			
	ABS Malzeme		PLA Malzeme	
	Üst Yüzey	Alt Yüzey	Üst Yüzey	Alt Yüzey
20	42,80*	56,90*	72,30	62,53
40	61,73	67,57	69,27	75,53
60	65,27	66,77	64,17	77,47
80	64,47	70,30	62,30	75,53
100	62,27	72,53	59,57	72,40
120	65,97	68,27	54,53	69,23
140	60,50	69,93	54,90	65,30

* İtalik olarak belirtilen veriler değerlendirmeye alınmamıştır.

değerlerinin neredeyse değişmediği belirlenmiştir. Yazdırma hızının artmasıyla PLA malzeme kullanılarak üretilen ürünlerde filament besleme motorunun yazdırma için gerekli filamenti beslemekte yetersiz kaldığı, bu nedenle de test numuneleri içerisinde katman içi düzensiz boşlukların oluştuğu görülmüştür. ABS malzeme kullanılarak üretilen ürünlerde böyle bir durum söz konusu değildir. PLA filament, ABS filamente göre daha sert ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğundan, yazdırma hızının artmasıyla filament besleme motorunun PLA malzemedeki bir miktar kaydırma (patınaj) yaptığı söylenebilir. Tabloda görülen bazı değerlerin düzensiz olmasının, test numunelerindeki bölgesel boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yine Tablo 6 incelendiğinde numunelerin alt yüzey sertliklerinin genel olarak üst yüzey sertliklerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlara literatürde de rastlanmıştır [34]. Numunelerin alt yüzeyleri cam yazdırma tablası ile temas halinde olup, üretim sonrasında numunelerin alt yüzeylerinde bir miktar yapıştırıcı kalıntısı kalmaktadır. Numunenin ilk katmanının cam yazdırma tablasına daha iyi yapışmasını sağlamak için yazdırma tablası üzerine ince bir film tabakası kalınlığında sürülen yapıştırıcının, numunelerin alt yüzeylerindeki sertliğin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Yazdırma hızlarına göre ölçülen test numunesi üst yüzey sertlikleri her iki malzeme için kıyaslandığında, PLA malzeme ile üretilen

numunelerin ABS malzeme ile üretilen numunelerden genel olarak daha sert olduğu görülmektedir. Sadece yüksek yazdırma hızlarında (120-140 mm/s) PLA malzeme ile üretilen ürünlerin poroziteleri daha yüksek olduğundan, bu yazdırma hızlarındaki üst yüzey sertlik değerleri ABS malzeme ile üretilen ürünlerde daha yüksek çıkmıştır.

Test numunelerinin üst yüzeylerinin aritmetik ortalama pürüzlülük değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Yazdırma hızının artmasıyla PLA malzeme ile üretilen numunelerin aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin de genel olarak arttığı görülmektedir. Yazdırma hızının artmasıyla ABS malzeme ile üretilen numunelerin aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin neredeyse değişmediği söylenebilir. Tabloda görülen bazı değerlerin farklılıklarının, test numunelerinin bazı bölgelerindeki boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü yığıma yönüne göre incelendiğinde tüm yazdırma hızlarında en düşük pürüzlülük değerlerinin yığıma yönüne paralel olarak yapılan ölçümlerde olduğu görülmektedir. Tüm yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzemeler ile üretilen numuneler kendi aralarında incelendiğinde, yığıma yönüne 45° açılı ve yığıma yönüne 90° açılı olarak yapılan ölçümlerin birbirine çok yakın olduğu ve bu ölçümlerin yığıma yönüne paralel olarak yapılan ölçümlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yazdırma hızlarına göre ölçülen test numunesi

yüzey pürüzlülükleri her iki malzeme için kıyaslandığında, 40 ve 60 mm/s yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzemeler ile üretilen ürünlerin pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Fakat daha yüksek yazdırma hızlarında ABS malzeme ile üretilen numunelerin pürüzlülük değerleri değişmezken, PLA malzeme ile üretilen numunelerin pürüzlülük değerlerinin yazdırma hızı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir.

Her iki malzeme için üretilen test numunelerinin çekme mukavemeti değerlerinin yazdırma hızı ile değişimini gösteren bir grafik çizilmiştir (Şekil 8). Şekil 8 incelendiğinde, yazdırma hızının artmasıyla ABS malzeme ile üretilen ürünlerin çekme mukavemet değerleri değişmezken, PLA malzeme ile üretilen ürünlerin çekme mukavemet değerlerinin azaldığı görülmektedir. Literatürde yazdırma hızının artmasıyla PLA malzeme ile üretilen ürünlerin çekme mukavemetlerinin azaldığını gösteren benzer çalışmalar yer almaktadır [34-36]. Grafik incelendiğinde aynı yazdırma hızlarına karşılık gelen çekme mukavemeti değerlerinin PLA malzeme ile üretilen ürünlerde daha yüksek olduğu ve yazdırma hızının artmasıyla her iki malzeme ile üretilen ürünlerin çekme mukavemet değerleri aralığının giderek kapandığı görülmektedir.

Şekil 9'da her iki malzeme ile farklı yazdırma hızlarında üretilen numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 9a incelendiğinde ABS malzeme ile farklı yazdırma hızlarında üretilen numuneler arasında en yüksek çekme dayanımının ve en yüksek kopma uzamasının 60mm/s yazdırma hızında üretilen numunelerde olduğu tespit edilmiştir. 20mm/s yazdırma hızına ait eğri sadece bilgilendirme amaçlı verilmiş olup, bu değerlendirmeye dahil edilmemiştir.

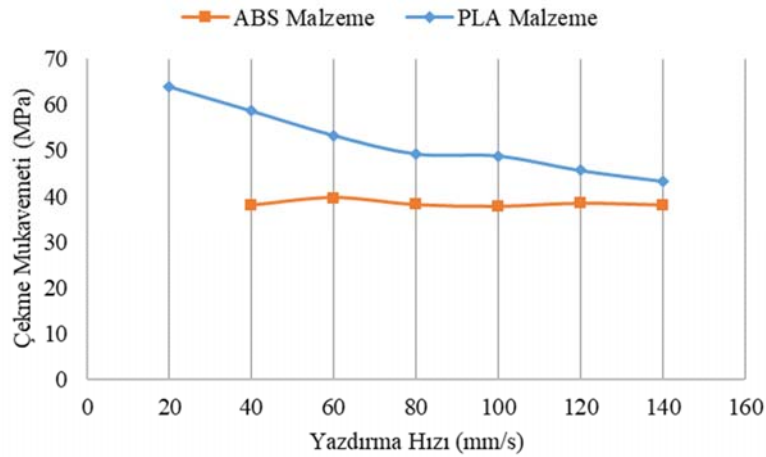
Şekil 9b incelendiğinde PLA malzeme ile farklı yazdırma hızlarında üretilen numuneler arasında en yüksek çekme dayanımının 20mm/s yazdırma hızında ve en yüksek kopma uzamasının da 100mm/s yazdırma hızında üretilen numunelerde olduğu görülmektedir. Ayrıca hem çekme dayanımı hem de kopma uzaması açısından optimum şartların 60mm/s yazdırma hızında üretilen numunelerde olduğu tespit edilmiştir.

Her iki malzeme ile farklı yazdırma hızlarında üretilen numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri kıyaslandığında, en yüksek çekme mukavemeti değerlerinin PLA malzeme ile üretilen numunelerde olduğu görülürken, en yüksek kopma uzaması değerlerinin de ABS malzeme ile üretilen numunelerde olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Test numunelerinin pürüzlülük değerleri (Roughness values of test samples)

Yazdırma Hızı (mm/s)	Aritmetik Ortalama Pürüzlülük, Ra (μm)					
	ABS Malzeme			PLA Malzeme		
	Paralel	45° Açılı	90° Açılı	Paralel	45° Açılı	90° Açılı
20	2,925*	19,025*	20,886*	0,730	3,192	3,869
40	1,338	5,545	6,846	1,311	3,934	4,467
60	1,309	4,460	5,515	1,040	5,096	5,328
80	1,484	4,343	5,254	1,559	7,454	7,618
100	1,335	3,337	3,751	1,387	8,417	9,671
120	0,936	3,444	4,032	1,466	8,721	10,796
140	1,219	4,313	5,549	1,472	7,783	9,152

* İtalic olarak belirtilen veriler değerlendirmeye alınmamıştır.

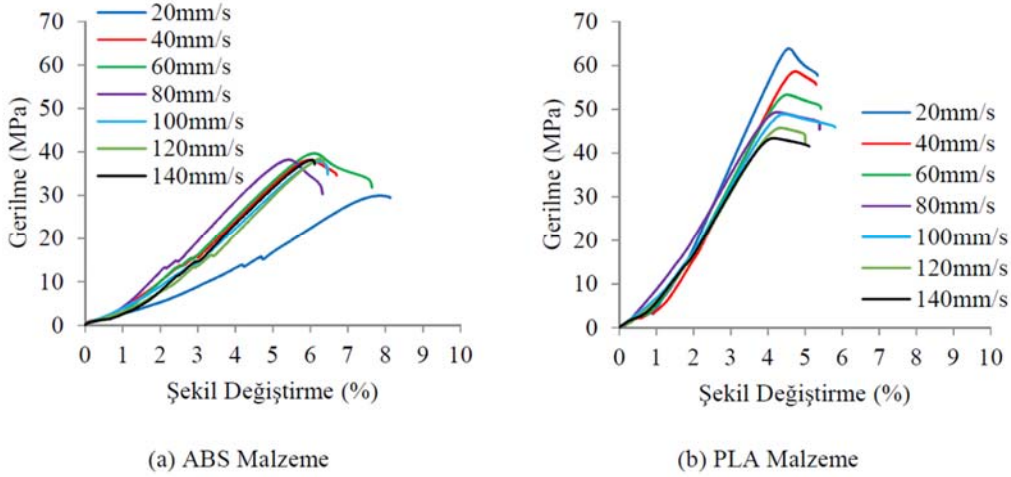


Şekil 8. ABS ve PLA malzemeler ile üretilen test numunelerinin çekme mukavemeti değerlerinin yazdırma hızı ile değişimi (The variation of tensile strength values of test samples produced with ABS and PLA materials with printing speed)

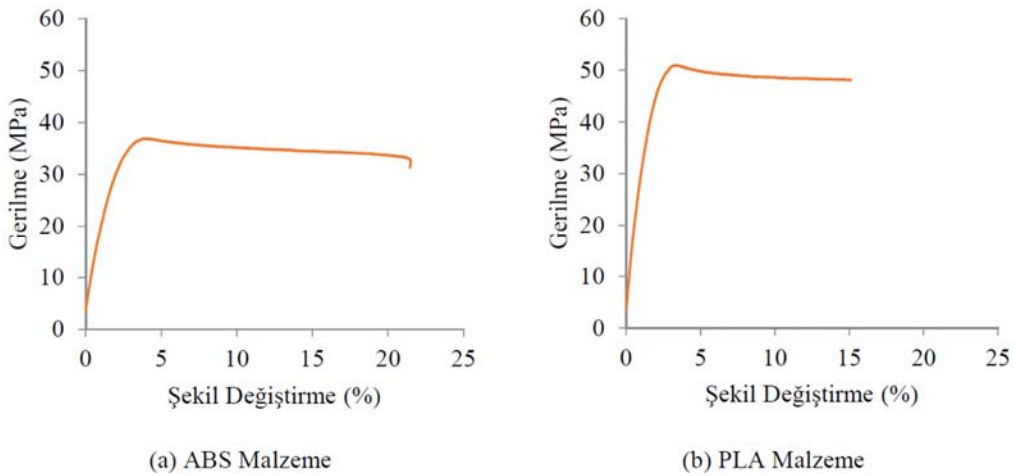
Her iki malzeme ile üretilen numunelerin yazdırılmasında kullanılan Ultimaker ABS Turuncu 2,85mm ve Ultimaker PLA Turuncu 2,85mm filamentlere çekme testi uygulanmış olup, bu filamentlerin çekme testlerine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde, ABS filamentin kopma uzamasının, PLA filamentin de çekme dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, yazdırma işleminde kullanılan Ultimaker ABS Turuncu 2,85mm filament malzemesinin yazdırma işlemi sonucunda çekme dayanımında çok fazla değişiklik olmazken, kopma uzaması bir hayli azalmıştır. Aynı şekilde yazdırma işleminde kullanılan Ultimaker PLA Turuncu 2,85mm filament malzemesinin yazdırma işlemi sonucunda çekme dayanımında bir miktar artış görülürken, kopma uzamasında gözle görülür derecede düşüş gözlenmiştir. ABS malzeme sünek, PLA malzemeye ise gevrek bir yapıya sahip olduğundan, filament testlerinde ABS malzemenin kopma uzamasının belirgin bir şekilde PLA malzemenin yüksek

olduğu görülmektedir. ABS ve PLA filament çekme testlerinde, filament malzemeleri herhangi bir ısıl işleme maruz kalmadan kendi eksenleri doğrultusunda çekme yüküne maruz kalmaktadırlar. Bu sayede filament malzemeleri kendi polimer yapılarının gerektirdiği mekanik özellikleri (çekme dayanımı, kopma uzaması vb.) sergilemektedirler. Fakat yazdırma işleminden sonra üretilen çekme test numunelerinde durum aynı değildir. Yazdırma işleminden sonra ABS ve PLA test numunelerine çekme testi uygulanması sonucunda, malzemelerin tokluğunun azaldığı ve malzemelerin gevrekleştiği görülmektedir. Yazdırma işleminin ABS ve PLA malzemelerin şekil değiştirme kabiliyetini düşürdüğü belirlenmiştir.

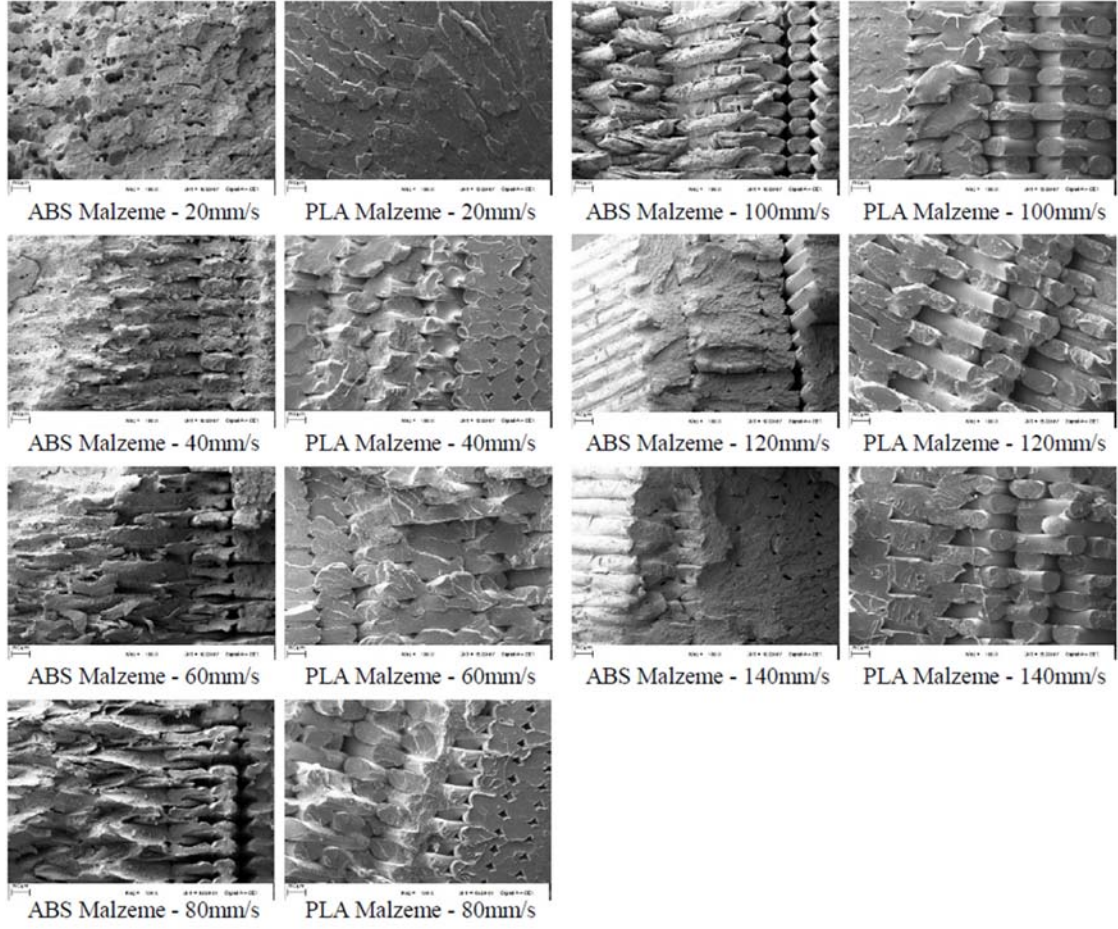
Çekme testi sonucunda kopan test numunelerinin kopma bölgelerinin Taramalı Elektron Mikroskopunda (TEM) 100 kat büyütülmüş görüntüleri alınmış olup, Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde, PLA malzeme ile 20mm/s yazdırma hızında üretilen numunelerin her katmanında neredeyse hiç boşluk olmadığı görülürken, ABS



Şekil 9. Farklı yazdırma hızlarında üretilen numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri
(Stress-strain curves of samples produced at different printing speeds)



Şekil 10. Ultimaker ABS ve PLA Turuncu 2,85mm filamentin gerilme-şekil değiştirme eğrileri
(Stress-strain curves of Ultimaker ABS and PLA Orange 2.85mm filament)



Şekil 11. Farklı yazdırma hızlarında üretilen numunelerinin kopma bölgelerinin taramalı elektron mikroskopundan (TEM) alınan 100 kat büyütülmüş görüntüleri
(100 times magnified images taken from scanning electron microscope (SEM) of the breaking regions of samples produced at different printing speeds)

malzeme ile 20mm/s yazdırma hızında üretilen numunelerin görüntüsünde hava boşluklarının olduğu belirlenmiştir.

ABS malzeme ile üretilen numunelerde yazdırma hızının artmasıyla üretilen numunelerin her katmanındaki örgü lifleri arasındaki boşlukların neredeyse hiç değişmediği görülmektedir. ABS malzeme ile 20mm/s yazdırma hızında üretilen numuneler bu değerlendirmenin dışında tutulmuştur. PLA malzeme ile üretilen numunelerde yazdırma hızının artmasıyla üretilen numunelerin her katmanındaki örgü lifleri arasındaki boşlukların arttığı görülmektedir. PLA malzeme ile üretilen numuneler incelendiğinde, 100 ve 120mm/s yazdırma hızlarındaki numunelerde her katmandaki örgü liflerinin birbirleri ile sadece bir çizgisel temas halinde oldukları görülmektedir. Aynı malzemede 140mm/s yazdırma hızındaki numunelerde, katman içi boşlukların daha da arttığı ve her katmandaki örgü liflerinin birbirlerine temas etmedikleri görülmektedir.

Her iki malzeme ile farklı yazdırma hızlarında üretilen numunelerin kopma bölgelerinin Taramalı Elektron Mikroskopunda (TEM) 100 kat büyütülmüş görüntüleri kıyaslandığında, aynı yazdırma hızında PLA malzeme ile

üretilen numunelerde katman içi boşlukların daha fazla olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; Ultimaker 2 Extended 3B yazıcı ile farklı yazdırma hızlarında (20-40-60-80-100-120-140mm/s), ABS ve PLA malzeme kullanılarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin kütleleri, sertlikleri ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, porozite değerleri hesaplanmış ve üretilen numunelere çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonrasında kopmuş numunelerin kopma bölgelerinden TEM görüntüleri alınmıştır. Her iki malzeme ile aynı parametrelerde üretilen numunelerin mekanik özellikleri kıyaslanmıştır.

- Yazdırma hızının artmasıyla ABS malzeme ile üretilen numunelerin kütle, porozite, sertlik, aritmetik ortalama pürüzlülük ve çekme dayanımı değerleri çok fazla değişmezken, PLA malzeme ile üretilen numunelerin kütle, sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin azaldığı, porozite ve aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

- Her iki malzeme ile farklı yazdırma hızlarında üretilen numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri kıyaslandığında, en yüksek çekme mukavemeti değerlerinin PLA malzeme ile üretilen numunelerde olduğu, en yüksek kopma uzaması değerlerinin de ABS malzeme ile üretilen numunelerde olduğu tespit edilmiştir.
- Yazdırma işleminden sonra ABS ve PLA test numunelerine çekme testi uygulanması sonucunda, malzemelerin tokluğunun azaldığı, gevrekleştiği ve şekil değiştirme kabiliyetlerinin azaldığı belirlenmiştir.
- Çekme testi sonucunda kopan test numunelerinin kopma bölgelerinin TEM görüntüleri incelendiğinde, ABS malzeme ile üretilen numunelerde yazdırma hızının artmasıyla üretilen numunelerin her katmanındaki örgü lifleri arasındaki boşlukların neredeyse hiç değişmediği, PLA malzeme ile üretilen numunelerde yazdırma hızının artmasıyla üretilen numunelerin her katmanındaki örgü lifleri arasındaki boşlukların arttığı belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma; İnönü Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2020-2351 nolu proje ile desteklenmiştir. Değerli katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Shunmugam M.S., Kanthababu M., *Advances in Additive Manufacturing and Joining: Proceedings of AIMTDR 2018*, Springer, 2020.
2. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D., *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*, *Composites, Part B*, 143, 172-196, 2018.
3. Minetola P., Calignano F., Galati M., *Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers*, *Addit. Manuf.*, 32 (101103), 1-10, 2020.
4. Akhoundi B., Behraves A.H., *Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of fdm 3d printed products*, *Exp. Mech.*, 59, 883-897, 2019.
5. Duda T., Raghavan L.V., *3D metal printing technology*, *IFAC-PapersOnLine*, 49 (29), 103-110, 2016.
6. Rajpurohit S.R., Dave H.K., *Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 101, 1525-1536, 2019.
7. Yaragatti N., Patnaik A., *A review on additive manufacturing of polymers composites*, *Mater. Today: Proc.*, 44 (6), 4150-4157, 2021.
8. Szymczyk-Ziółkowska P., Łabowska M.B., Detyna J., Michalak I., Gruber P., *A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques*, *Biocybern. Biomed. Eng.*, 40 (2), 624-638, 2020.
9. Cailleaux S., Sanchez-Ballester N.M., Gueche Y.A., Bataille B., Soulairol I., *Fused Deposition Modeling (FDM), the new asset for the production of tailored medicines*, *J. Controlled Release*, 30, 821-841, 2021.
10. Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho A.M., *The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis*, *Materials*, 11 (8), 1333, 2018.
11. Tanikella N.G., Wittbrodt B., Pearce J.M., *Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing*, *Addit. Manuf.*, 15, 40-47, 2017.
12. Jayanth N., Senthil P., Prakash C., *Effect of chemical treatment on tensile strength and surface roughness of 3D-printed ABS using the FDM process*, *Virtual Phys. Prototyping*, 13 (3), 155-163, 2018.
13. Weng Z., Wang J., Senthil T., Wu L., *Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing*, *Mater. Des.*, 102, 276-283, 2016.
14. Samykano M., Selvamani S.K., Kadingama K., Ngui W.K., Kanagaraj G., Sudhakar K., *Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 102, 2779-2796, 2019.
15. Baran E., Erbil H., *Surface modification of 3D printed PLA objects by Fused Deposition Modeling: A Review*, *Colloids and Interfaces*, 3 (2), 43, 2019.
16. Fernandez-Vicente M., Calle W., Ferrandiz S., Conejero A., *Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing*, *3D Print. Addit. Manuf.*, 3 (3), 183-192, 2016.
17. Uribe-Lam E., Treviño-Quintanilla C.D., Cuan-Urquizo E., Olvera-Silva O., *Use of additive manufacturing for the fabrication of cellular and lattice materials: a review*, *Mater. Manuf. Processes*, 36 (3), 257-280, 2021.
18. Wittbrodt B., Pearce J.M., *The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components*, *Addit. Manuf.*, 8, 110-116, 2015.
19. Yaman U., Butt N., Sacks E., Hoffmann C., *Slice coherence in a query-based architecture for 3D heterogeneous printing*, *Comput.-Aided Des.*, 75-76, 27-38, 2016.
20. Yilmaz O., Uglu A.A., *Development of a cold wire-feed additive layer manufacturing system using shaped metal deposition method*, *J. Mech. Sci. Technol.*, 31, 1611-1620, 2017.
21. Solmaz M.Y., Çelik E., *Investigation of compression test performances of honeycomb sandwich composites produced by 3d printing method*, *Firat University Journal of Engineering Sciences*, 30 (1), 277-286, 2018.
22. Uzun M., Gür Y., Usca Ü., *Manufacturing of new type curvilinear tooth profiled involute gears using 3D printing*, *Balıkesir University Journal of the Institute of Science and Technology*, 20 (1), 278-286, 2018.
23. Yaman U., *Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 94, 2187-2197, 2018.
24. Dilberoglu U.M., Simsek S., Yaman U., *Shrinkage compensation approach proposed for ABS material in FDM process*, *Mater. Manuf. Processes*, 34 (9), 993-998, 2019.

25. Schirmeister C.G., Hees T., Licht E.H., Mühlaupt R., 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication, *Addit. Manuf.*, 28, 152-159, 2019.
26. Sezer H., Eren O., Börklü H., Özdemir V., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 663-674, 2019.
27. Yaman U., Fabrication of topologically optimized parts via direct 3d printing, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7 (1), 236-244, 2019.
28. Yaman U., Dolen M., Hoffmann C., Generation of patterned indentations for additive manufacturing technologies, *IISE Trans.*, 51 (2), 209-217, 2019.
29. Harris M., Potgieter J., Ray S., Archer R., Arif K.M., Preparation and characterization of thermally stable ABS/HDPE blend for fused filament fabrication, *Mater. Manuf. Processes*, 35 (2), 230-240, 2020.
30. Uzun M., Erdoğan Y.E., Investigation of the effect of using unreinforced and reinforced PLA in production by fused deposition modeling on mechanical properties, *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*, 10 (4), 2800-2808, 2020.
31. Gulcimen Cakan B., Ensarioğlu C., Küçükakarsu V., Tekin İ., Çakır M., Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1657-1668, 2021.
32. Kechagias J.D., Ninikas K., Petousis M., Vidakis N., Vaxevanidis N., An investigation of surface quality characteristics of 3D printed PLA plates cut by CO2 laser using experimental design, *Mater. Manuf. Processes*, 36 (13), 1544-1553, 2021.
33. Quarto M., Carminati M., D'Urso G., Density and shrinkage evaluation of AISI 316L parts printed via FDM process, *Mater. Manuf. Processes*, 36 (13), 1535-1543, 2021.
34. Aydın M., Yildirim F., Canti E., Investigation of the processing performance of PLA filament in different printing parameters, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (2), 102-115, 2019.
35. Gunay M., Modeling of tensile and bending strength for PLA parts produced by FDM, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (3), 204-211, 2019.
36. Tao Y., Li P., Pan L., Improving tensile properties of polylactic acid parts by adjusting printing parameters of open source 3D printers, *Materials Science (Medžiagotyra)*, 26 (1), 83-87, 2020.
37. Ultimaker. The Ultimaker 2 Extended specifications. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011987939-The-Ultimaker-2-Extended-specifications>. Yayın tarihi Şubat 25, 2020. Erişim tarihi Şubat 06, 2021.
38. Ultimaker. The Ultimaker 2 Extended user manual. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011987819-The-Ultimaker-2-Extended-user-manual>. Yayın tarihi Şubat 25, 2020. Erişim tarihi Şubat 06, 2021.
39. ASTM D638-14: Standard test method for tensile properties of plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, <https://doi.org/10.1520/D0638-14>, 2014.
40. Ultimaker. Ultimaker ABS SDS. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962900-Ultimaker-ABS-SDS>. Yayın tarihi Nisan 09, 2020. Erişim tarihi Şubat 15, 2021.
41. Ultimaker. Ultimaker ABS TDS. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS>. Yayın tarihi Nisan 09, 2020. Erişim tarihi Şubat 15, 2021.
42. Ultimaker. Ultimaker PLA SDS. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759359-Ultimaker-PLA-SDS>. Yayın tarihi Nisan 09, 2020. Erişim tarihi Şubat 15, 2021.
43. Ultimaker. Ultimaker PLA TDS. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720-Ultimaker-PLA-TDS>. Yayın tarihi Nisan 09, 2020. Erişim tarihi Şubat 15, 2021.

