



FARKLI YAZDIRMA PARAMETRELERİNDE PLA FİLAMENTİN İŞLEM PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Mustafa AYDIN^{a*}, Ferhat YILDIRIM^b, Ebubekir ÇANTI^c

^aManisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makina ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

^bDumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Üretim Mühendisliği Bölümü, ^cTUBİTAK, BİLGEM, Turkey

* Sorumlu Yazar: mustafa@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 08.05.2019; Düzeltme/Revised: 26.07.2019; Kabul/Accepted: 16.08.2019)

ÖZET

Bu çalışmada, ticari bir PLA (polilaktik asit) filament kullanılarak farklı sıcaklıklarda 3B yazdırılmış numunelerin özelliklerinin yazdırma hızına bağlı değişimleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında filament malzemesinin 190°C, 200°C, 210°C ve 220°C sıcaklıklarındaki reolojik özellikleri Ergime Akış İndeksi (EAİ) kullanılarak belirlenmiştir. Numuneler 30, 50 ve 70 mm/saniye gibi üç farklı yazdırma hızlarında 3B yazdırılmış ve shore-D sertlik ve çekme testleri ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca yazdırma sıcaklığının malzemenin renginde sıcaklığa bağlı değişimi de renk analizörü ile test edilmiştir. Çalışmada farklı sıcaklıklardaki baskı hızıyla baskı sonuçları arasındaki ilgi incelenerek en uygun parametreler belirlenmiştir. Yazdırma sıcaklığı olarak belirlenen 220°C sıcaklık ve 30mm/s de ön yükleme değeri 2 MPa ve 3 mm/dk çekme hızında yapılan deneylerde en yüksek çekme değerleri olan 50,979 MPa elde edilmiştir. Sertlik değeri olarak da 30 mm/s gibi düşük yazdırma hızlarında en yüksek sertliğin 190 °C de elde edilmiş olduğu tespit edilmiştir. Düşük viskozite nedeniyle yazdırma işlemlerinin 200°C sıcaklıkların üzerinde yapılması gerektiği görülmektedir. Yazdırma hızının artması ile yazdırma süresi azalmıştır. Tüm deneyler dikkate alındığında, düşük hızlarda daha fazla zaman kazanımı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: PLA filament, 3B yazdırma, FDM, Yazdırma Hızı, Renk analizörü.

ABSTRACT

In this study, it was aimed to investigate the changes in the mechanical properties of 3D printed samples using a commercial PLA (polylactic acid) filament depending on the printing temperature. The rheological properties of the filament materials at 190°C, 200°C, 210°C and 220°C were investigated using Melt flow index (MFI). The samples were printed at different print speeds as 30, 50 and 70 mms-1 in 3D printer and examined for mechanical properties with Shore-D hardness, tensile tests and color changes. Also the color temperature change according to the temperature of the print material has been tested with a color Analyzer. By examining the relation between printing speed and print results in the study, the effect of the printing speed selection on the time cost was evaluated too. In the experiments carried out at 220°C temperature and 30mm / s pre-load value of 2 MPa and 3 mm / min, the highest tensile values of 50,979 MPa were obtained. It was found that the highest hardness was obtained at 190 °C at printing speeds as low as 30 mm / s. Due to the low viscosity, it is seen that printing must be performed at temperatures above 200°C. Print speed is reduced with increasing printing speed. Considering all experiments, more time saving was achieved at low speeds.

Keywords: PLA filament, 3D printing, FDM, Printing speed, Printing Temperature, Color Analyzer

1. GİRİŞ

Geleneksel imalat yöntemleri genellikle iş parçasından malzeme eksiltme prensibine dayanır [1, 2]. Son yıllarda daha da yaygın hale gelen eklemeli imalat teknolojilerinde, temel alınan prensip geleneksel imalat yöntemlerinin aksine malzemedan parça eksiltme değildir. Eklemeli imalatta üretim, malzemelerin nihai ürün geometrisine göre birleştirilerek arzu edilen parçanın üretimi söz konusudur [1-5]. Diğer bir geleneksel üretim yöntemi olan döküm veya enjeksiyon yönteminden farkı ise bir kalıba ihtiyaç duyulmaması ve doğal olarak kalıp kullanımının getirdiği dezavantajlar olan ilk yatırım maliyeti ve bakım giderlerinin düşük olmasıdır [6-7].

3 boyutlu imalat dental implant üretiminden motor parçalarının yapımına kadar birçok farklı alanda nihai ürünlerin veya görsel prototiplerin üretiminde özellikle son 10 yıldır büyük bir ivme kazanmıştır. Son yıllarda 3 boyutlu yazıcıların maliyetlerinin düşmesi ve yaygınlaşması ile birlikte bu cihazların kullanımı endüstriyel tesisler ve araştırma enstitülerinin sınırlarını aşarak bireysel kullanıcıya kadar ulaşmış, masa tipi 3 boyutlu yazıcılar evlerde veya hobi atölyelerinde yerini almıştır [8].

Eklemeli imalat, diğer adıyla 3 boyutlu üretim teknolojileri çalışma prensiplerinden kompleks şekilli ürünlerin üretilebilirliklerinin daha kolay olmasının yanında kişiselleştirilebilir ürünlerin üretimine imkan vermesi gibi avantajlara da sahiptir. 3 boyutlu üretimin, Selective Lazer Sintering (SLS), Stereolithography (SLA), Laminated Object Manufacturing (LOM), Fused Deposition Modeling (FDM) gibi farklı prensipleri ve ilkeleri temel alan birçok alt türü vardır. Bununla birlikte eklemeli imalat teknolojilerinin son yıllarda yaygınlaşarak masa üstü kullanıma uygun hale gelmesini sağlayan yöntem FDM'dir [8, 9-12].

FDM prosesinde termoplastik ya da termoplastik türevi malzemeler inşa malzemesi olarak kullanılır. Belirli bir sıcaklığın üzerine çıkıldığında kullanılan malzemeler kauçuğumsu ve akıcı bir forma girerek şekillendirmeye uygun hale gelir. Genellikle kullanılan malzemeler ABS, PLA ve nadiren PC olmakla birlikte, kompozit filamentlerde kullanılmaktadır [5-7]. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) petrol bazlı bir polimerdir. Düşük maliyetli prototipleme için ucuz bir malzemedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda yanmadan sonra toksik zehirli gazlar çıkarmaktadır. Bu nedenle yiyecek maddeleri ile temas halinde kullanılması uygun değildir [8]. PLA (Polylactic Acid) ise yenilenebilir kaynaklardan elde edilmekte olup, Piyasada orta maliyetli bir fiyatı vardır ve mükemmel bir 3D yazıcı malzemesidir. ABS filamentlere göre birçok farklı renklerde bulunabilme, soğuk tabla yüzeyine yazdırılabilme, yüksek hızlarda yazdırılabilme ve düşük çarpılma gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir [8-13]. PLA yenilenebilir, mısır nişastası veya şeker kamışı gibi organik malzemelerden yapılmıştır. Genellikle gıda ambalaj ve biyolojik tıbbi cihazlar ve implantlar yapmak için kullanılır. Çevre dostu olan bu malzeme reçine veya tel olarak kullanılabilir, bu yüzden 3D baskı için mükemmel bir malzemedir [10-14]. ABS filamentlerin yazdırma parametrelerinin etkileri üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır [5-7, 15]. Ancak PLA filamentler üzerinde çalışmalar yeni olup yeterli değildir.

Bu çalışmada PLA filament malzemedan yapılmış 3D parçalar üzerinde farklı yazdırma parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Eklemeli imalatta önemli noktalardan biri de kısa sürede parçaların üretilebilmesidir. Bunu gerçekleştirmek için nozul yazdırma sıcaklıkları 190, 200, 210 ve 220 °C ayarlanmış ve her bir sıcaklık için 30, 50 ve 70 mm/s gibi farklı yazdırma sürelerinde parçalar üretilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme ve Özellikleri

Kullanılan filament 1.75 mm çapında olup, ticari olarak alınmıştır. Filamente ait bazı özellikler ise aşağıda verilmiştir. Bunlar; Hacimsel Ergime Akışı (MVR): 10.3cm³/10 dk. Bu değer polimerin erime akışı kolaylığı için bir ölçüdür. Belirli bir çap ve uzunlukta bir silindirin içinden 10 dakika içinde akan malzeme miktarının ölçüsüdür. Camsı Geçiş Sıcaklığı (TG): 60-65°C. Polimer malzemelerde, maddenin camsı özelliklerini kaybedip viskoz özellikler kazanmaya başladığı sıcaklık sınırıdır. Erime sıcaklığından her zaman daha düşüktür. Erime Sıcaklığı: 160-190°C. Malzemelerin ergimeye başladığı sıcaklık noktasıdır. Baskı Sıcaklığı: 190-220°C. 3D yazıcının baskı ucunun (nozzle) sıcaklığını gösteren değerdir. Bu sıcaklık

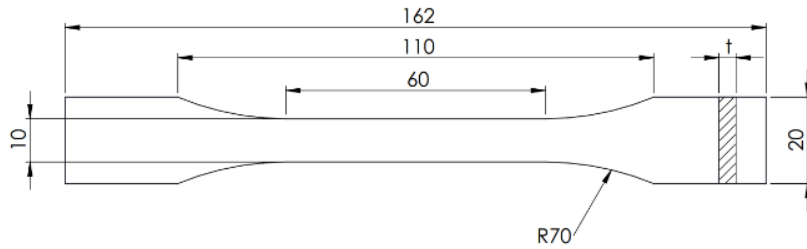
her zaman malzemenin ergime sıcaklığından yüksek olmaktadır. PLA, ABS malzemeye göre daha fazla yüzey sertliğine sahip olup kırılğan bir malzemedir. Bükülme durumunda çabuk kırılır. Zımparalanabilir, boyanabilir, kuvvetli yapıştırıcılar ve klorofor ile yapıştırılabilir [1-5, 11, 17]. PLA baskı sırasında waffle veya şeker gibi tatlı bir koku çıkartır. Sağlık bakımından sorun çıkarmaz ve kapalı alanlarda rahatlıkla kullanılabilir. PLA biyolojik ve parçalanabilir bir filamenttir. İçinde bitkisel malzemeler bulunur ve doğaya az zarar veren bir plastik çeşididir [11, 17-22].

2.2. Yazdırma Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Literatür çalışmaları ve ticari firmaların verdikleri PLA için 3 boyutlu cihazlarda yazdırma sıcaklıkları farklılıklar göstermekte ve yaklaşık 190-220°C sıcaklıklar olarak belirtilmektedir. Ancak en iyi performansın elde edildiği parametrelerin ve nozul sıcaklığının belirlenmesi önemlidir. Bu amaçla öncelikle ticari filamentin MFI testleri yapılarak farklı sıcaklıklardaki özellikleri belirlenmelidir. PLA malzemenin yazdırılabilirliğini belirlemek için farklı sıcaklıklarda reolojik özellikleri test edilmiştir. Literatürde Melt Flow İndeks (MFI) olarak bilinmektedir. Deneyler ticari granül haldeki PLA malzemelere ISO 1133-2 standardına göre yapılmıştır. Testler esnasında 2.16 kg yük kullanılmıştır. Ölçüm esnasında her bir sıcaklık parametresi için ortalama 40 ölçüm değeri elde edilmiştir. Farklı sıcaklıklarındaki reolojik özellikleri Ergime Akış İndeksi (EAI) ile belirlenmiştir. Deneyler CEAST MF20 cihazı ile ISO 1133-2 standartlarına göre NURSAN (Kütahya) şirketinde yapılmıştır [5-7, 12].

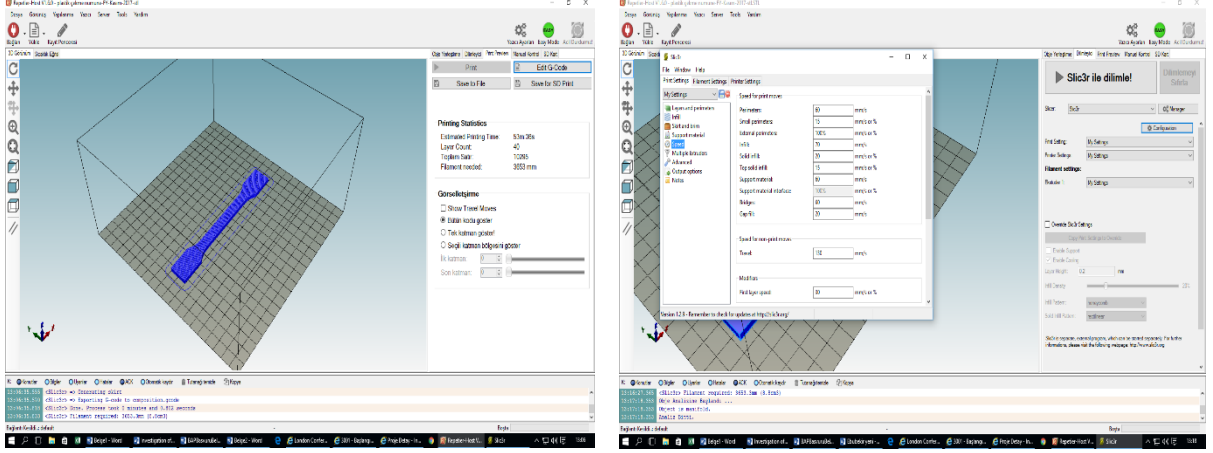
2.3. 3 Boyutlu Yazıcıda Yazdırma parametrelerinin Belirlenmesi ve Numune Üretimi

Numunelerin yazdırılma parametrelerinin yazdırma zamanı üzerine etkisi incelenmiştir. 3 boyutlu yazıcıda yazdırma hızları 30, 50 ve 70 mm/s ve sıcaklıklar ise 190, 200, 210 ve 220°C olarak belirlenmiştir. Numuneler DIN EN 527-2 standardına göre hazırlanmıştır (Şekil 1). Numuneler ilk olarak stl uzantılı olarak SolidWorks 2015 programında tasarlanmıştır [7, 13-15]. Daha sonra Repetier-Host programı kullanılarak G-codes a dönüştürülmüştür (Şekil 2). Bu programla da dilimleme yapılarak katmanlarına ayrılmış ve yazıcıda yazdırılabilir hale dönüştürülmüştür. 3 boyutlu Mendel İ3 Prusa model yazıcıda farklı sıcaklık ve yazdırma hızları ayarlanarak programda dilimleme yaptırılmış ve yazdırma süreleri yazılımdan okunmuştur. Yazdırma esnasında tabla sıcaklığı 65°C ve doluluk oranı da %100 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 1. Çekme numunesinin boyutları, (DIN EN 527-2)

Yazılım programı Repetier-Host kullanılarak belirlenen parametrelerde dilimleme yaptırılmış ve yazdırma süreleri tespit edilmiştir. Bu değerlerde sonuçlar kısmında ayrıntılı olarak verilmiştir.

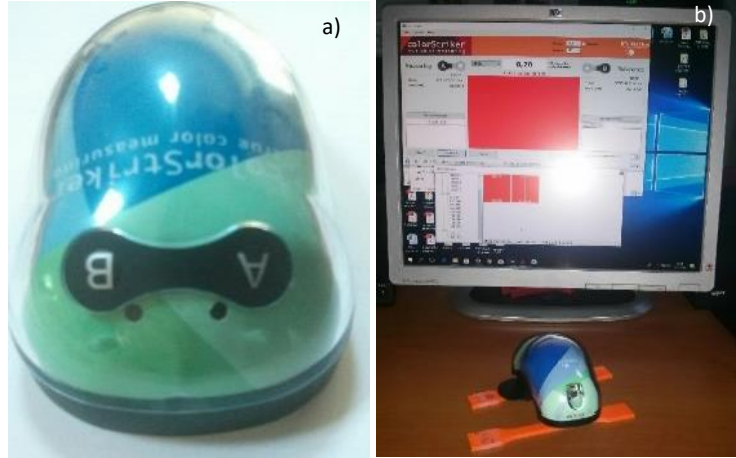


Şekil 2. Repetier-Host programında G-codes a dönüştürülmesi ve yazdırma parametrelerinin değiştirilmesi

2.4. 3 Boyutlu Yazıcıda Üretilmiş Numunelerin Renk Analizi

Polimer malzemelerin sıcaklıkla ergitilip tekrar katılaşığı şekillendirme süreçlerinde ürün renginde farklılıklar oluşabilmektedir. Bu yüzden ısıtma ve soğutma periyotlarının hız ve homojenliği oldukça önemlidir. Hızlı prototipleme cihazları ile üretilen ürünler her ne kadar nihai ürün olmasa da seri üretim polimer mamulün şekli, akış hatları, çeper kalınlıkları gibi referans noktalar açısından önem taşımaktadır. Buna göre Şekil 3'te verilen Mathai Color Striker marka renk ölçüm cihazı ile ASTM D-2244 standardına göre numunelerin farklı bölgelerinden yapılan ölçümler ile üretim sıcaklığı ve yazdırma hızının ürün rengi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Renk analizinin esası, referans ürünün renginin diğer ölçüm noktaları ile kıyaslanarak nihai ΔE renk farkının elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Buna göre ölçülen sonuçlar 0 ile 1 arasında ise renkler eşlenik kabul edilmektedir. 1-2 arası farklar sektörel kabul, 2-4 arası özel kabul gerektirirken, 4'ten yukarı olan farklar ise eşlenik kabul edilemez. Çizelge 1'de verilen parametreler endüstrideki renk ölçümlerinin yorumlanmasına ışık tutmaktadır [16].



Şekil 3. a) Color Striker renk analiz cihazı, b) Numuneler üzerinde yapılan renk analizi.

2.5. Mekanik Testler

Değişen sıcaklık ve yazma hızında üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ilk inceleme numunelerin sertliği üzerine olmuştur. Bu amaçla üretilen numunelerin alt ve üst yüzeylerinden ve üçer noktadan Shore D sertlikleri ölçülmüştür. Çekme deneyleri ise farklı sıcaklık ve hızlarda üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Ön yüklem değeri 2 MPa ve 3 mm/dk çekme hızında deneyler Zwick Roell ZR-100 cihazında DIN EN 527-2 standardına göre yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak sonuçlar verilmiştir.

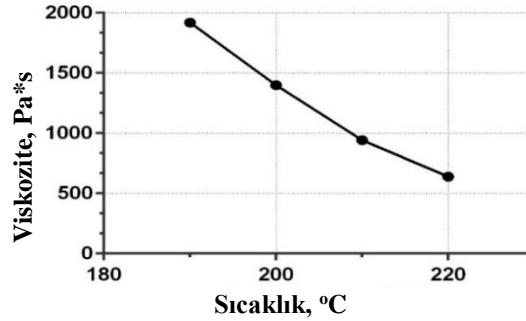
Çizelge 1. Renk değerlerinin okunması ve değerlendirilmesi.

Renk Ölçüm Parametrelerinin Anlamları			
ΔE	Ölçülen Malzemeler Arasındaki Toplam Renk Farkı		
$\Delta L (+)$	Kısmi beyaz	$\Delta L (-)$	Siyah
$\Delta a (+)$	Kısmi kırmızı açılımı	$\Delta a (-)$	Kısmi yeşil açılımı
$\Delta b (+)$	Kısmi sarı açılımı	$\Delta b (-)$	Kısmi mavi açılımı
Renk Karşılaştırma Aralığı		Renk Karşılaştırma Değerlendirmesi	
0-0,25 ΔE		Çok mükemmel eşleme	
0,25-0,5 ΔE		Az farkla eşleme	
0,5-1 ΔE		Orta farkla eşleme	
1-2 ΔE		Bazı sektörlerde kabul edilebilir eşleme	
2-4 ΔE		Özel uygulamalarda kabul edilebilir eşleme	
4 ΔE		Kabul edilemez eşleme	

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Ergime Akış İndeksi (EAI)

Yapılan dört farklı sıcaklıkta ki ergime akış indeksi değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Sonuçlara göre sıcaklık arttıkça viskozite değerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç 3 boyutlu yazıcılarda malzeme biriktirmede neden yüksek sıcaklıklar seçildiğinin de bir sebebini göstermektedir. Malzeme ve özellikleri kısmında belirtildiği gibi, PLA malzemenin ergime sıcaklığı 160-190°C olarak verilmesine rağmen, 3 boyutlu yazıcılarda yazdırma sıcaklıkları 190-220°C olarak verilmektedir. Ölçülen bu değerler üretici firmaların değerleri ile uyum içerisindedir. Şekil 4’te verilen grafikte ise düşük viskozite nedeniyle yazdırma işlemlerinin 200°C sıcaklıkların üzerinde yapılması gerektiği görülmektedir [17, 18].



Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda ergime akış indeksi (EAI) ile viskozitenin değişimi

3.2. 3 Boyutlu Yazıcıda Yazdırma Zamanı

Bugün, üç boyutlu yazıcı diğer bir adıyla hızlı prototipleme tekniğini kullanmanın geleneksel yöntemlere göre üstün taraflarından biri de tekniğin zaman kazandırıcı bir teknik oluşudur. Fakat bu yöntemde yazdırma parametrelerinin üretim zamanı ve üretilecek nesnenin özellikleri üzerinde önemli etkisi vardır. Genellikle yüksek yazdırma hızları düşük üretim zamanları ile sonuçlanmasına rağmen genellikle belirli bir hızdan sonra yazdırma zamanı değişmez ve belirli bir noktaya yakınsar. Ayrıca, yüksek yazdırma hızları üretimde bazı kusurların oluşmasına sebep olabilir. Bununla birlikte düşük yazdırma hızları da mükemmel bir nihai sonucu garanti etmemenin yanında yüksek zaman maliyeti de oluşturmaktadır. Bu şartlar göz önüne alındığında ideal bir hızda ya da hız aralığında çalışmak gerektiği ortadadır.

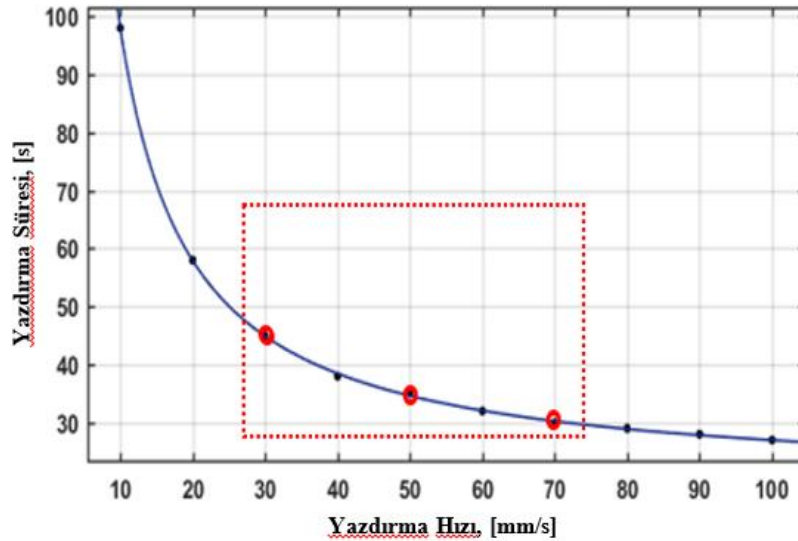
Bu amaçla, yazdırma programı (Repetier Host)'tan yazdırma hızına karşılık gelen yazdırma süreleri alınarak Çizelge 2 oluşturulmuştur. Çizelge 2'deki veriler Matlab programında Eğri Uydurma Uygulamacı kullanılarak analiz edilmiş ve yazdırma hızına karşılık gelen yazdırma zamanı için şu şekilde bir fonksiyon önerilmiştir.

$$f(x) = (a \cdot x + b)/(x + c) \quad (1)$$

Bu fonksiyonda a, b ve c sabitleri sırası ile 19.42, 746.4 ve -0.4036'dır. x yazdırma hızı ile fonksiyon x'i parametre olarak alıp yazdırma hızını hesaplamaktadır. Fonksiyon yazdırma zamanını R-kare 0.9999 ve RMSE 2.2631 gibi oldukça yaklaşık şekilde hesaplamaktadır. Hesaplanan fonksiyonun grafiği Şekil 5'te çizdirilmiştir. Grafikte görüleceği üzere 70 mm/s üzerindeki yazdırma hızının yazdırma süresi üzerindeki etkisi oldukça kısıtlıdır. 30 mm/dak altındaki hızlarda ise yazdırma süresi oldukça artmaktadır. Bu çalışma kapsamında 30-70 mm/s yazdırma hızı aralığı ideal çalışma aralığı olarak kabul edilmiştir. Bu aralıkta çalışırken bile aralığın minimum noktası ile maksimum noktası arasında 33%'lük bir zaman kazancı vardır.

Çizelge 2. Repetier-Host programından elde edilen yazdırma hızlarına karşılık gelen yazdırma süreleri

Yazdırma Hızı, [mm/s]	Yazdırma Süresi, [dak]
10	98
20	58
30	45
40	38
50	35
60	32
70	30
80	29
90	28
100	27

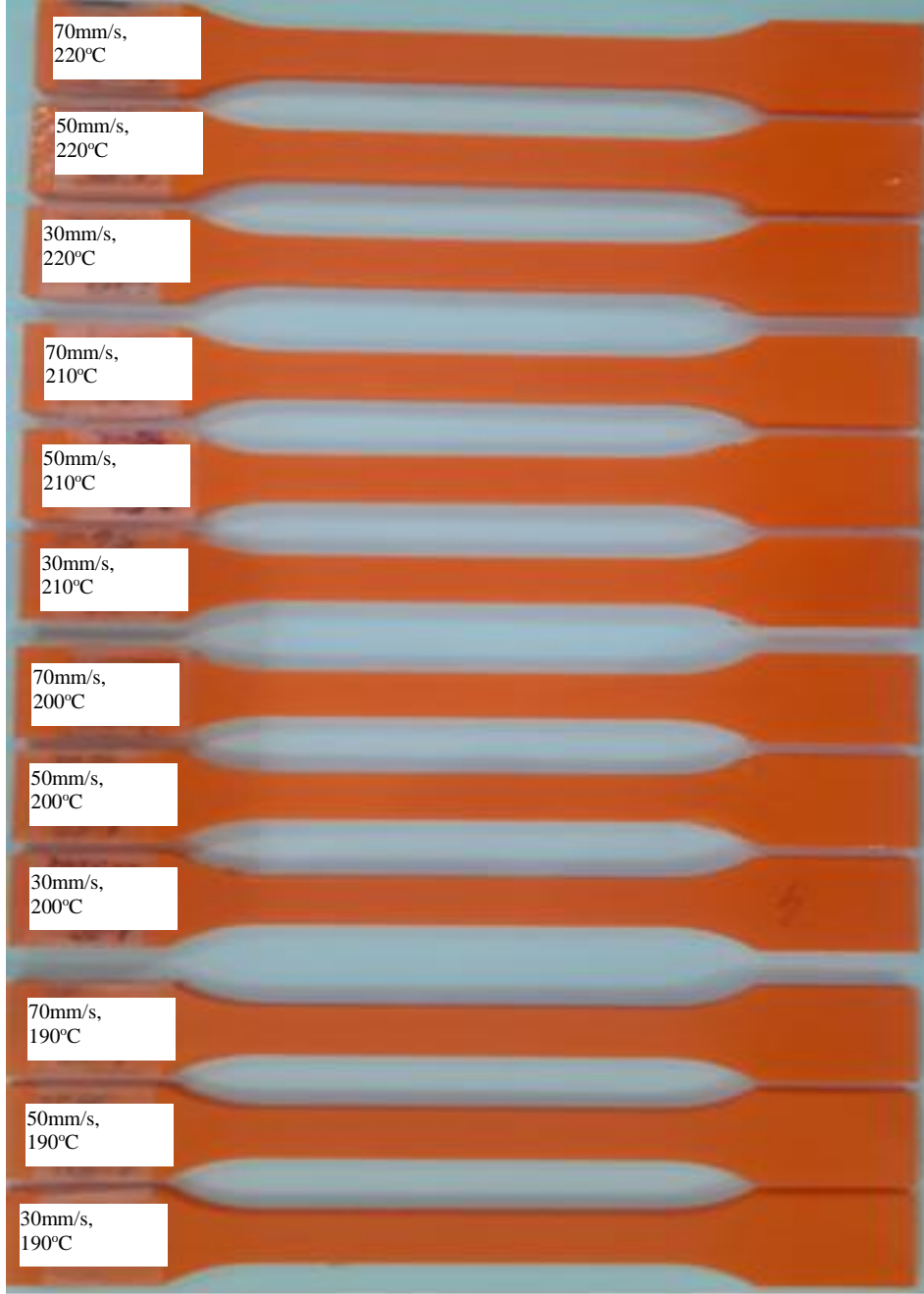


Şekil 5. Matlab Curve Fitting App ile hesaplanan yazdırma hızına karşılık gelen yazdırma süreleri

3.3. Numunelerin Yazdırılması

PLA malzemeye yapılan ergime akış indeksinden elde edilen deney sonuçlarına göre numuneler 3 boyutlu yazıcıda yazdırılmışlardır. Numuneler dört farklı sıcaklık olan 190, 200, 210 ve 220°C de ve üç farklı

yazdırma hızları olan 30, 50 ve 70 mm/s hızlarda her bir parametreden üçer adet olacak şekilde yazdırılmıştır. Üretilen numunelerin fotoğrafları Şekil 6’da görülmektedir



Şekil 6. Farklı sıcaklık ve yazdırma hızlarında yazdırılarak üretilmiş numuneler

Üretilen numunelerde yazdırma esnasında ve sonrasında gözle görülebilen herhangi bir fark oluşmadığı söylenebilir. Ancak yazdırma esnasında özellikle 220°C sıcaklıklarda fazlaca koku yayıldığı dikkati çekmiştir. Sonuç olarak bu sıcaklık değerinin PLA malzemeler için yüksek olduğu kanaati oluşmuştur. Ancak diğer sonuçlar ile teyit edildiğinde en doğru sıcaklık ve yazdırma hızı belirlenmiş olacaktır.

3.4. Shore D Sertlik Değişimleri

Farklı sıcaklık ve yazdırma sürelerinde üretilen numunelerin hem alt ve hem de üst yüzeylerinden sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her bir ölçüm değeri için üç ölçüm yapılmış ve elde edilen sonuçların ortalamaları alındığında hem sıcaklığın hem de yazdırma hızının malzemelerin sertliği üzerinde etkisi olduğu

görülmüştür. En önemli bulgu ise tüm parametreler için malzemenin alt yüzeyinin üst yüzeyinden daha yüksek sertlik değeri vermesidir. Sertlik ölçüm sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir.

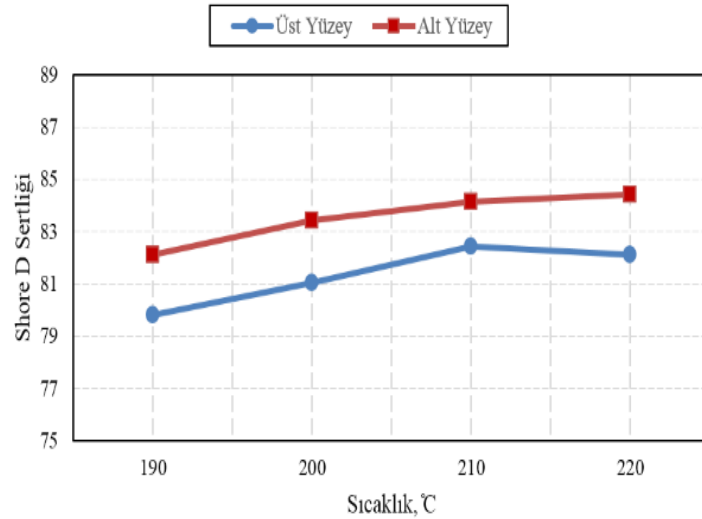
Çizelge 3. Shore-D Sertlik ölçüm sonuçları

Sıcaklıklar	Yazma Hızı	Üst Yüzey	Alt Yüzey
190 °C	30 mm/s	79,5	83,483
	50 mm/s	80,133	81,033
	70 mm/s	79,767	81,856
200 °C	30 mm/s	80,617	82,933
	50 mm/s	81,144	84,267
	70 mm/s	81,333	83,067
210 °C	30 mm/s	81,933	84,45
	50 mm/s	82,833	84,5
	70 mm/s	82,567	83,483
220 °C	30 mm/s	81,717	84,35
	50 mm/s	81,856	84,478
	70 mm/s	82,817	84,8

Çizelge 3’deki veriler incelendiğinde tüm üretim parametrelerinde malzemenin alt yüzeyi, üst yüzeyinden daha yüksek sertlik değeri vermiştir.

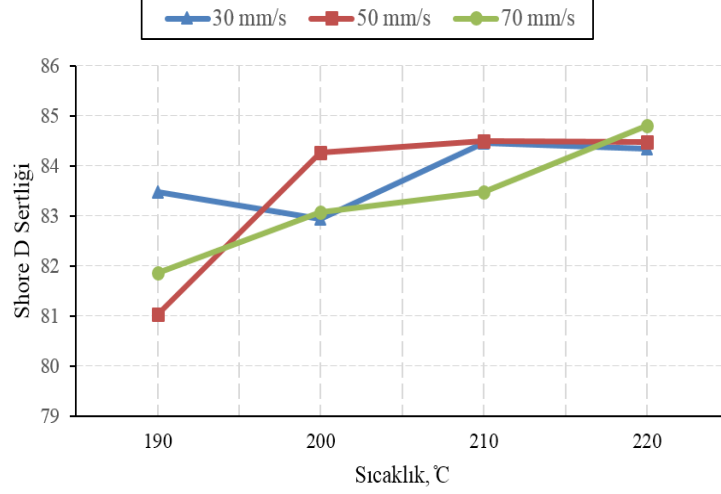
Bunun sebebinin ise malzeme altlığının malzemenin soğuma hızını bir başka deyişle polimer zinciri oluşumunun hızını arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Altlıktan uzaklaşan malzeme üst yüzeyin her katmanında nozuldaki yeni sıcak malzeme ile temas halinde olduğundan sıcaklığı daha uzun süre yapı içinde tutmakta buda malzemenin daha yumuşak kalmasına yol açmaktadır [5, 7]. Şekil 7’de alt ve üst yüzeylerdeki sertlik değişimi verilmiştir.

Malzemenin sertliğine yüzeylerden farklı olarak etki eden diğer önemli parametre ise sıcaklık olmuştur. Hemen her üretim parametresinde artan sıcaklıkla sertlikte artmıştır. En yüksek sertlik değerleri en yüksek sıcaklık parametresi olan 220 °C 'de ve malzemenin alt yüzeyinde 84,8 Shore D ile elde edilmiştir. Malzemelerin sertliğine etki eden diğer önemli parametre ise yazdırma hızı olmuştur [9]. Şekil 8’de malzemenin alt yüzeyinden ölçülen sertliğin yazdırma hızı ve sıcaklık ile olan ilişkisi verilmiştir.



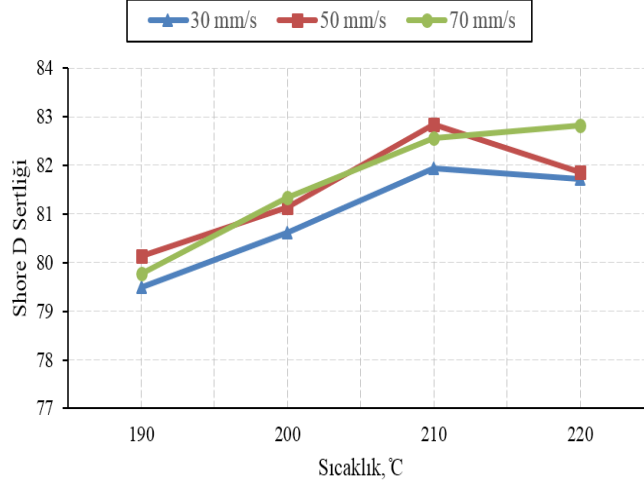
Şekil 7. Malzemenin alt ve üst yüzeyleri arasındaki sertlik değişimi

Şekil 8’de verilen grafik incelendiğinde malzemenin en yüksek sertliği 70 mm/s hızda ve 220 °C verdiği görülmektedir. Yine grafikten çıkarılan bir diğer sonuç ise 30 mm/s gibi düşük hızlarda en yüksek sertliğin 190 °C de elde edilmiş olduğudur. Buradan yazdırma sıcaklığının düşük tutulacağı üretimlerde yazdırma hızının da düşürülmesinin yüksek sertlikte malzeme elde edebilmek için gerekli olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 9’da malzeme üst yüzeyinin sertliğinin yazdırma hızı ve sıcaklıkla olan değişimi birlikte verilmiştir.



Şekil 8. Malzemenin alt yüzeyindeki sertliğin yazdırma hızı ve sıcaklıkla değişimi.

Malzemenin üst yüzeyinde de en yüksek sertlik değeri yüksek yazdırma hızı ve yüksek sıcaklıkta elde edilmiştir. Buna ek olarak orta yazdırma hızı (50 mm/s) ve 210 °C de önemli bir sertlik piki oluşmuştur. Bu durum malzemenin üst yüzeyinde soğuma hızında bir farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzemenin üst yüzeyinde düşük sıcaklıklardaki yüksek sertliğin nispeten düşük yazdırma hızında elde edilmesi genel eğilimle tezat oluşturmamaktadır. Bu malzeme için yüksek hız ve sıcaklık ile yapılan üretimler sertlik açısından en yüksek değerleri verirken parametrelerden birinin düşük seçilmek zorunda kalındığı durumlarda diğer parametrenin de düşük alınması en doğru seçim olacaktır.



Şekil 9. Malzemenin üst yüzeyindeki sertliğin yazdırma hızı ve sıcaklıkla değişimi

3.5. Çekme Deneyleri

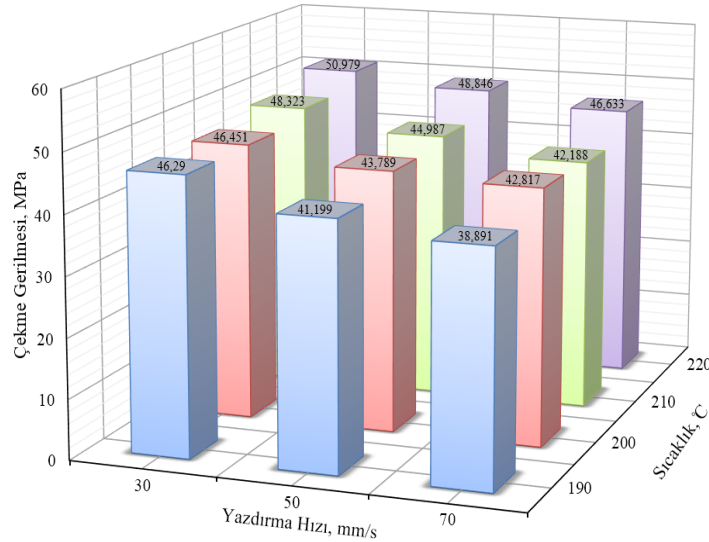
Farklı sıcaklık ve hızlarda üretilen malzemelerin mekanik özelliklerindeki etkileri incelemek için çekme deneyleri yapılmıştır. Ön yüklem değeri 2 MPa ve 3 mm/dak çekme hızında yapılan deneylerde oldukça belirgin karakteristikler elde edilmiştir. Elde edilen çekme gerilmesi ve elastik modülü değerleri Çizelge 4’de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde yazdırma sıcaklığı arttıkça malzemenin çekme gerilmesi artmıştır [19-20]. Aynı yazdırma hızları sıcaklığa göre karşılaştırıldığında 190 °C de 30 mm/s

için çekme gerilmesi 46,29 MPa iken 220 °C de 30 mm/s için çekme gerilmesi %10 civarında artarak 50,979 MPa çıkmıştır. Benzer biçimde 50 mm/s için artış oranı % 18,5 ve 70 mm/s için artış oranı % 19,9 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları toplu olarak Şekil 10'da verilmiştir.

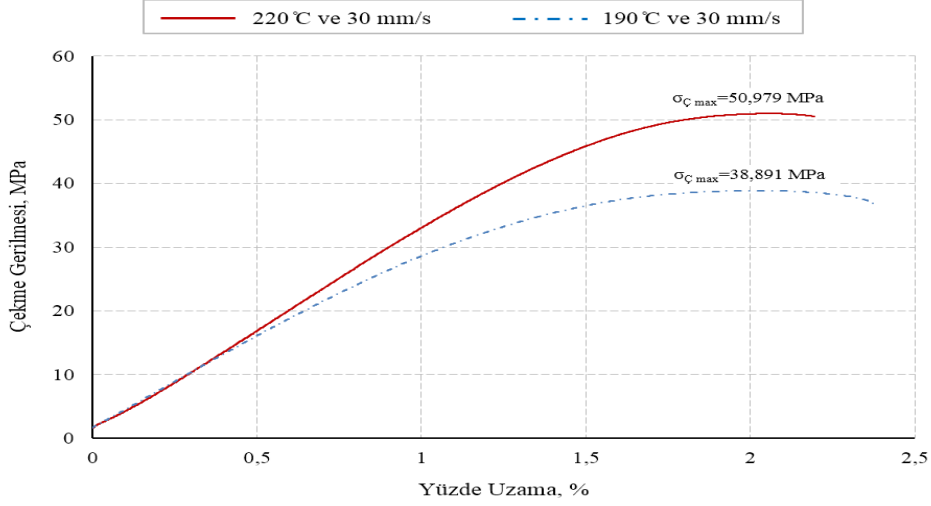
Çizelge 4. Farklı sıcaklık ve hızlarda üretilen numunelerin çekme gerilmesi ve elastikiyet modülleri

Sıcaklık °C	Yazdırma Hızı, mm/s	Çekme Gerilmesi MPa	Çekme Elastiklik Modülü, GPa
190	30	46,29	3,927
	50	41,199	3,668
	70	38,891	2,914
200	30	46,451	4,562
	50	43,789	3,139
	70	42,817	2,985
210	30	48,323	2,693
	50	44,987	4,786
	70	42,188	3,436
220	30	50,979	2,869
	50	48,846	3,395
	70	46,633	3,215

Buna ek olarak aynı sıcaklık referansında yazdırma hızı arttıkça malzemenin çekme gerilmesi yani dayanımı düşmüştür. Düşme oranları incelendiğinde ise 190 °C sıcaklıkta üretilen malzemelerin üretim hızı 30 mm/s den 70 mm/s ye çıktığında çekme gerilmesindeki düşüş % 15,9 olarak hesaplanmıştır. Diğer sıcaklık grupları için ise; 200 °C sıcaklıkta üretilen numuneler % 7,8; 210 °C sıcaklıkta üretilen numuneler % 12,6 ve 220 °C sıcaklıkta üretilen numuneler % 8,5 dayanım kaybına uğramıştır. Elde edilen sonuçların çekme testi grafiği dökümü Şekil 11'de verilmiş olup sıcaklık ve yazdırma hızının numuneler üzerindeki etkileri görülmektedir. Şekil 11'de en yüksek (30 mm/s yazdırma hızı ve 220 °C sıcaklıkta) ve en düşük (70 mm/s yazdırma hızı ve 190 °C sıcaklıkta) dayanımın elde edildiği iki numunenin çekme deneyi eğrileri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde ise hızın artıp sıcaklığın düştüğü durumlarda malzemenin yaşadığı çekme performansı kaybı daha iyi anlaşılmaktadır. Sonuç olarak bu malzemelerin üretimlerinde yüksek mekanik dayanım için tercih edilmesi gereken sıcaklık yüksek, yazdırma hızı ise düşük seçilmelidir [21].



Şekil 10. Sıcaklık ve yazdırma hızının numunelerin çekme özellikleri üzerindeki etkileri.



Şekil 11. 30 mm/s hız ve 220 °C sıcaklık ile 70 mm/s hız ve 190 °C sıcaklıkta yazdırılan numunelerin çekme grafikleri.

3.6. Renk Analizleri

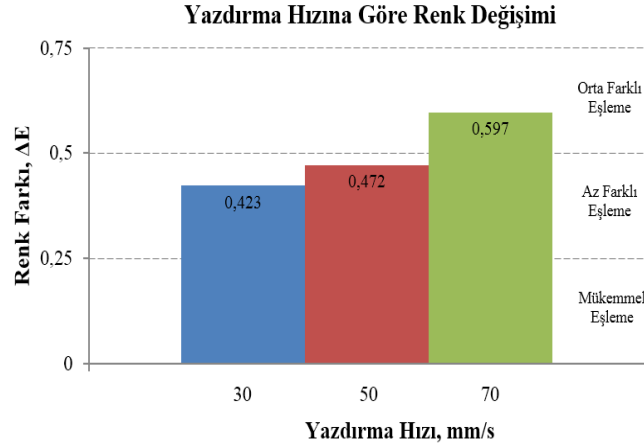
Üretilen numuneler üzerinden yapılan renk analizleri iki değişken altında incelenmiştir. Bunlardan ilki yazdırma hızı olup yığılan fazla sayıda katmanın renk değişimine etkisi incelenmiştir. Diğeri ise sıcaklıktır. Elde edile bulgular Çizelge 5’de verilmiştir.

Yapılan renk ölçümünün sonuçları 30 mm/s yazdırma hızı ve 190 °C sıcaklıkta üretilen numune referans alınarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre yazdırma hızının artması renk üzerinde çok küçük oranda değişiklik oluştursa da referans numuneye göre ΔE farkı maksimum 0,597 olmuştur. En yüksek değer bile eşlenik kabul edilen 0 ile 1 arasında olduğu için numunelerin renkleri az ve orta eşlenik grubunda aynı kabul edilmektedir. Yapılan renk ölçümünün sonuçları 30 mm/s yazdırma hızı ve 190 °C sıcaklıkta üretilen numune referans alınarak karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlara göre üretim sıcaklığının artması ürünün rengi üzerinde çok küçük oranlarda değişikliğe neden olsa da referans numuneye göre nihai ΔE değişimi maksimum 0,596 olmuştur. En yüksek değer bile eşlenik kabul edilen 0 ile 1 arasında yer aldığı için renk analizleri yapılan numunelerin renklerinin orta ve az farklı eşleme grubunda aynı oldukları kabul edilebilir. Elde edilen sonuçlar her iki durum için Şekil 12 ve 13’de verilmiştir.

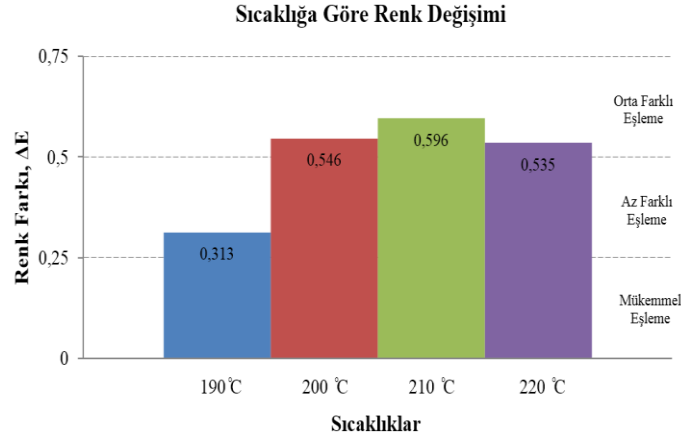
Çizelge 5. Yazdırma hızının ΔE renk değişimi ve Yazdırma sıcaklığının sayısının ΔE renk değişimi farkları

Yazdırma Hızı	ΔE	Yazdırma Sıcaklığı	ΔE
30 mm/s	0,423	190 °C	0,313
50 mm/s	0,472	200 °C	0,546
70 mm/s	0,597	210 °C	0,596
-	-	220 °C	0,535

Diğer değerlendirme kriteri ise sıcaklıktır. Elde edilen sonuçlar 4 farklı sıcaklık parametresine göre değerlendirilmiş yapılan ölçümlerden alınan sonuçların hesaplanan ortalamaları Çizelge 6’da verilmiştir. Yapılan renk analizlerine göre hem yazdırma hızı hem de sıcaklık üretilen numune üzerinde çok küçük oranlarda fark yaratsa da tüm numuneler az ve orta fark grubunda bulunup aynı renk eşleniği olarak kabul edilmektedir



Şekil 12. Yazdırma hızına göre ΔE renk farkı



Şekil 13. Üretim sıcaklığına göre ΔE renk farkı

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcıda üretilen parçaların özellikleri üzerinde yazdırma sıcaklığı ve süresinin etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre;

1-Yazdırma hızının artması ile yazdırma süresi azalmıştır. Tüm deneyler dikkate alındığında, düşük hızlarda daha fazla zaman kazanımı sağlanmıştır.

2-Düşük viskozite nedeniyle yazdırma işlemlerinin 200°C sıcaklıkların üzerinde yapılması gerektiği görülmektedir.

3- Üretilen numunelerde yazdırma esnasında ve sonrasında gözle görülebilen herhangi bir fark oluşmadığı söylenebilir. Ancak yazdırma esnasında özellikle 220°C sıcaklıklarda fazlaca koku yayıldığı dikkati çekmiştir.

4- En yüksek sertlik değerleri en yüksek sıcaklık parametresi olan 220 °C 'de ve malzemenin alt yüzeyinde 84,8 Shore D ile elde edilmiştir.

5- Malzemenin en yüksek sertliği 70 mm/s hızda ve 220 °C verdiği görülmektedir. Yine grafikten çıkarılan bir diğer sonuç ise 30 mm/s gibi düşük hızlarda en yüksek sertliğin 190 °C de elde edilmiş olduğudur.

6- Malzemenin üst yüzeyinde de en yüksek sertlik değeri yüksek yazdırma hızı ve yüksek sıcaklıkta elde edilmiştir.

7- Yazdırma sıcaklığı arttıkça malzemenin çekme gerilmesi artmıştır.

8- Aynı sıcaklık referansında yazdırma hızı arttıkça malzemenin çekme gerilmesi yani dayanımı düşmüştür.

9- Bu malzemelerin üretimlerinde yüksek mekanik dayanım için tercih edilmesi gereken sıcaklık yüksek, yazdırma hızı ise düşük seçilmelidir. Yazdırma hızı 30mm/s ve 220°C yazdırma sıcaklık parametrelerinin en iyi değerler verdiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Ning F, Cong W, Qiu J, Wei J, Wang S. “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 80, Issue 1, Pages 369-378, 2015.
2. Kitson PJ, Rosnes MH, Sans V, Dragone V, Cronin L. “Configurable 3D-Printed millifluidic and microfluidic ‘lab on a chip’ reactionware devices”. *Electronic Supplementary Material (ESI) for Lab on a Chip*. Vol. 12, Issue 32, Pages 67-71, 2012.
3. Kitson PJ, Symes MD, Dragone V, Cronin L. “Combining 3D printing and liquid handling to produce user-friendly reactionware for chemical synthesis and purification”. *Chemical Science*. Vol. 4, Issue 30, Pages 99-103, 2013. 2013; 4(30): 99–103.
4. Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL. “Experimental investigation of time-dependent mechanical properties of PC-ABS prototypes processed by FDM additive manufacturing process”. *Materials Letters*. Vol. 193, Issue 1, Pages 58-62, 2017.
5. Çantı E, Aydın M, Yıldırım F. “Production and Characterization of Composite Filaments for 3D Printing”. *Journal of Polytechnic*. Vol. 21, Issue 2, Pages 397-402, 2018.
6. Nuñez PJ, Rivas A, García-Plaza E, Beamud E, Sanz-Lobera A. “Dimensional and surface texture characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS plus”. *Procedia Engineering*. Vol. 132, Issue 1, Pages 856-863, 2015.
7. Çantı E, Aydın M.” Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts”. *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 24, Issue 1, Pages 171-176 , 2018.
8. “3D Printing Materials”, [article in English]. <https://3dprinting.com/materials/>. Accessed December 12, 2017.
9. Gültaş A, Çankaya A, Güllü A, Gürü M. “Çinko Borat Katkılı Polipropilen’in Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi”. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. Cilt 29, Sayı 2, Sayfa 227-234, 2014.
10. Polymer Solutions Incorporated, Materials Science Research & Innovations, [article in English]. <https://www.polymersolutions.com/blog/plastic-in-3d-printing.html> Accessed February 12, 2018.
11. 3Bfab, [article in English]. <https://www.3bfab.com/bilgi - merkezi/konu/abs-ile-pla-filamentleri-karsilastirmasi/> Accessed February 13, 2018.
12. Symes MD, Kitson PJ, Yan J, Richmond CJ, Cooper GJ, Bowman RW, Vilbrandt T, Cronin L. “Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis”. *Nat Chem*. Vol. 4, Issue 5, Pages 349-354. 2012.
13. Matthew RS, Jake ME, Zeeshan A, Abigail EM, Matthew RH. “ The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO₂-ABS nanocomposites”. *Science and Technology of Advanced Materials*. Vol. 17, Issue 1, Pages 89-97, 2016.

14. Hill N, Haghi M. “Deposition Direction-Dependent Failure Criteria For Fused Deposition Modeling Polycarbonate”. *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 20, Issue 3, Pages 221-227,2014.
15. Chatterjee A, Deopura BL. “High modulus and high strength PP nanocomposite filament”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 37, Issue 5, Pages 813-817, 2006.
16. Mepteknik, Renk Ölçüm Cihazı Kullanım Kılavuzu, [article in Turkish]. <http://mepteknik.com/bg/assets/images/kkilavuz/RENK%20OLCUM%20CIHAZI%20KULLANMA%20KILAVUZU.pdf/>. Accessed February 24, 2018.
17. Weng Z, Wang J, Senthil T, Wu L. “Mechanical and Thermal Properties of ABS/Montmorillonite Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing”. *Materials & Design*. Vol. 102, Issue 1, Pages 276-283, 2016.
18. Dawoud M, Taha I, Ebeid SJ. “Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques”. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 21, Issue 1, Pages 39-45, 2016.
19. Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P. “Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of FDM Polymer Filaments”. *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 14, Issue 2, Pages 72-80 , 2008 2008; 14(2): 72-80.
20. Faes M, Ferraris E, Moens D. “Influence of Inter-Layer Cooling Time on the Quasi-Static Properties of ABS Components Produced via Fused Deposition Modelling”. *Procedia CIRP*. Vol. 42, Issue 1, Pages 748-753, 2016.
21. Dul S, Fambri L, Pegoretti A. “Fused Deposition Modelling with ABS–Graphene Nanocomposites”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 85, Issue 1, Pages 81-191, 2016 .