

3B yazıcı ile Poli laktik asit (PLA) esaslı numune üretiminde yazıcı parametrelerinin sertlik üzerindeki etkisi

The effect of printing parameters on hardness in the production of Poli lactic acid (PLA)-based samples with a 3D printer

Sermet DEMİR* 

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Doğuş Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
sdemir@dogus.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 24.02.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 26.04.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.49404

Kabul Tarihi/Accepted: 16.05.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan ergiyik yığıma modelleme (FDM) tekniği, yüksek tasarım esnekliği ve karmaşık şekiller oluşturabilme yeteneği nedeniyle son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Çok çeşitli parçalar 3 boyutlu (3B) yazıcılar ile katman katman geleneksel yöntemlere göre kolaylıkla imal edilebilirken, baskı işlem parametrelerinin ürünlerin mekanik özelliklerine etkisi çok yüksektir. Bu çalışmada yazıcı parametrelerinin parçanın sertliği üzerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Nozül çapı, katman yüksekliği, içörgü açısı ve nozül sıcaklığı araştırılacak yazdırma parametreleri olarak seçilmiştir. Her bir parametre için üç seviye belirlenmiştir ve gerekli olan yüksek deney sayısı Taguchi deney tasarım metodu uygulanarak düşürülmüştür. Poli laktik asit (PLA) esaslı numuneler ASTM standartlarına göre imal ve test edilmiştir. Rockwell L metodu uygulanarak her numunenin üzerinde 5 farklı noktadan sertlik ölçümü alınmıştır. En yüksek sertlik değeri 45 HRL olarak ölçülmüştür. Nozül çapının sertliğe katkısı %85 olmasına rağmen nozül sıcaklığının etkisi çok düşük ve belirsizdir. İmal edilen parçanın sertliği katman kalınlığı ile ters nozül çapı ile doğru orantılıdır. Yüksek çaplı nozül ile yapılan imalatlar daha iyi mekanik sonuç vermesinin yanında, üretim süresini de düşürmektedir. 3B yazıcıların performanslarının artması ve maliyetlerinin düşmesi ile son kullanıcı ürünlerin imalatında da tercih edilme oranı git gide artmaktadır. Bu çalışma yazıcı işlem parametrelerinin numunelerin yüzey sertliğini belirlemede daha az belirsizlik ve değişkenlikle hesaplanmasına yardımcı olacaktır.

Anahtar kelimeler: Eriyik yığıma metodu, Sertlik, Boyutsal doğruluk, Taguchi, ANOVA.

Abstract

The fused Deposited Modelling (FDM) technique, one of the additive manufacturing methods, has attracted much attention recently due to its high design flexibility and ability to create complex parts. While a wide variety of parts can be easily manufactured using 3D printers layer by layer according to traditional methods, the printing parameters significantly affect the mechanical properties of the products. This study aims to investigate the effect of printing parameters on the part's hardness. Nozzle diameter, layer height, raster angle, and nozzle temperature were chosen as the printing parameters to be investigated. Three levels were determined for each parameter, and the required high number of experiments was reduced by applying the Taguchi experimental design method. Polylactic acid (PLA) based samples were manufactured and tested according to ASTM standards. Hardness measurements were taken from 5 points on each sample using the Rockwell L method. The highest hardness value was measured as 45 HRL. Although the contribution of nozzle diameter to hardness is 85%, the effect of nozzle temperature is very low and uncertain. The hardness of the manufactured part is directly proportional to the layer thickness and inverse nozzle diameter. Productions made with high-diameter nozzles give better mechanical results and reduce production time. With the increase in the performance of 3D printers and the decrease in costs, the preference rate in manufacturing end-user products is increasing. This study will help to calculate the printing parameters with less uncertainty and variability in determining the surface hardness of the samples.

Keywords: Fused deposited modelling, Hardness, Dimensional quality, Taguchi, ANOVA.

1 Giriş

Teknolojik gelişmelerin sağladığı avantajlar ile 3B yazıcılar hem hızlı prototipleme ürünlerinin hem de son kullanıcı ürünlerinin imalatında tercih edilmeye başlanmıştır [1]. Eklemeli imalat ya da başka deyişle 3B baskı teknolojileri, geleneksel imalat yöntemlerine göre tasarımcılara daha fazla esneklik vermenin yanında, az sayıdaki karmaşık parçaların düşük maliyetli üretimi, imal edilen parçaların daha az montaja ihtiyaç duyması, stokta daha az yedek parça bulundurulması, daha az atık ortaya çıkması ve tasarımda hatalarının düzeltilmesinde avantaj sağlaması gibi birçok faydalara sahiptir [2]-[4].

Birçok farklı 3B baskı yöntemi vardır. Eklemeli imalatla tercih edilen mevcut teknolojilerin bazıları stereolitografi (Stereolithography-SLA), ergiyik yığıma metodu (Fused

Deposition Modeling-FDM), seçici lazer eritme (Selective Laser Sintering-SLM) ve elektron ışınıyla eritme (Electron Beam Melting-EBM) yöntemleridir. Bu teknolojilerin her birinin kendi avantajları dezavantajları olduğu gibi farklı malzeme türleri için de özelleşmişlerdir [5]. Uygulanacak metodun seçimi, imal edilecek parçanın kullanım amacına, malzemesine ve arzu edilen sonlandırmasına bağlıdır [6],[7].

Genel olarak, 3B baskı ile imal edilen parçalar geleneksel yöntemlerle imal edilen aynı parçalara göre daha düşük mukavemete sahiptir [8]-[10]. Bununla birlikte, 3B baskı teknolojisindeki ve malzemelerindeki gelişmeler ürünlerin mekanik özelliklerinin artırılmasına ve daha geniş yelpazede kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır [11],[12]. 3B yöntemiyle imal edilen parçaların mekanik özellikleri 3 ana faktöre bağlıdır. Bunlar; kullanılan malzeme, yazdırma parametreleri ve yöntemi ile sonlandırma işlemleridir.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Mekanik özelliklerden sertlik ise daha çok 3B baskı teknolojilerine ve kullanılan malzemeye bağlıdır [13]. Örneğin, akrilonitril bütadien stiren (ABS) veya PLA gibi malzemeler kullanılarak FDM teknolojisi ile basılan parçalar nispeten yumuşak olma eğilimindedir ve sertlik değerleri düşüktür. Öte yandan, yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip reçineler kullanılarak SLA teknolojisi ile basılan parçalar, daha yüksek sertlik değerlerine sahip olma eğilimindedir [14].

Düşük maliyet, basitlik ve yüksek işlem hızı nedeniyle FDM yöntemi, parçaları geliştirmenin en ucuz ve en kolay yoludur [15]. Bu hızlı prototipleme yöntemi otomobil, havacılık, medikal, yapı ve elektrik gibi birçok alanda tercih edilmektedir. PLA ise doğal kaynaklardan elde edilmesi ve doğada çözünebilir olması sebebiyle son zamanlarda en çok tercih edilen malzemelerden biridir [16]. Bu nedenle, PLA malzeme kullanılarak imal edilmiş numuneler için yazdırma parametrelerinin sertliğe etkisinin ortaya çıkarılması, imal edilecek ürünün mekanik özelliklerinin önceden belirlenebilmesi açısından yüksek önem arz etmektedir. Bu çalışmada FDM metodu ile PLA filament kullanılarak üretilen numunelerin yüzey sertlik değerine yazdırma parametrelerinin etkisi incelenecektir.

Böğrekçi ve diğ. içörgü çeşidi ve yoğunluğunun 3B baskı ile imal edilmiş ürünlere etkisini incelemişlerdir [17]. Doğrusal, ızgara ve pal Peteği yapısında 3 farklı içörgü motif çeşidi için 15, 25, 50, 75 ve %100 doluluk oranı uygulamışlardır. Sertlik ölçümleri Vickers mikro sertlik yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre en yüksek sertlik değeri %100 doluluk oranında görülmüştür. İçörgü çeşitlerinin etkisi ise yüksekten düşüğe doğru şu şekilde sıralanmıştır; bal Peteği, doğrusal ve ızgara. İçörgü tipinin ve yoğunluğunun 3B yöntemi ile imal edilen ürünlere doğrudan etkisinin olduğu belirtilmiştir. Gelecek çalışmalar için ürünlerin sertliğine içörgü motif katkısının ve nozül sıcaklığı gibi çevresel koşulların etkisinin araştırılması önerilmiştir.

Hanon ve diğ. 3B baskı yazdırma parametrelerinin PLA polimerinin mekanik performansına etkisi ve bunun sertlik ile ilişkisini araştırmıştır [18]. FDM baskı yöntemi kullanılarak imalat yönü, içörgü açısı ve katman yüksekliği parametreleri değiştirilerek üretimler gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre Young modülü, nihai gerilme mukavemeti (UTS) ve sertlik en yüksek kenar/dik yönlü üretimde elde edilmiştir. Çalışma, baskı yönü değişken olduğunda sertlik ve çekme mukavemetinin doğru orantılı bir ilişki içinde olduğunu göstermektedir. Shore D sertlik yöntemi ile yapılan ölçümlerde katman kalınlığı etki göstermesine rağmen en yüksek katkının baskı yönü parametresinde olduğu belirtilmiştir.

Mayen ve diğ. FDM teknolojisi kullanarak PLA dan yapılan 3B baskılı plastik parçaların sertliğini, yorulmasını ve çatlak ilerleme performansını değerlendirmek için bir metodoloji geliştirmeye odaklanmıştır [19]. Numuneler farklı geometrilerde üretilmiş ve çeşitli derecelerde ısı işleme tabi tutulmuştur. Doğrusal denklemleri ve yanıt yüzey çizimlerini elde etmek için istatistiksel modelleme yöntemleri uygulayarak içörgü açısı ve ısı işleminin performans etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, en yüksek sertliğin 0°/90° ve 0°/45°/45° içörgü açıları ve 100 °C'de ısı işleme elde edildiğini göstermiştir. Araştırma, içörgü açısının 3B baskılı PLA parçalarının toplu özelliklerini belirlemede anahtar olduğunu ve istatistiksel modelleme kullanımının umut verici bir tasarım alternatifini olduğunu göstermiştir.

Ansair ve diğ. gelişmiş darbe mukavemeti ve sertlik özelliklerine sahip, uygun maliyetli hafif parçalar üretmek için 3B baskı parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir [20]. Karbon fiber ile güçlendirilmiş PLA kompozit filament ile FDM yazıcı kullanılmıştır. Kompozit filament ile üretilen numunelerin shore D sertlik değeri, liflerin varlığından dolayı saf PLA'dan %37.95 daha yüksek bulunmuştur. Optimize edilmiş yanıt için parametrelerin nozül sıcaklığı 240 °C, baskı hızı 120 mm/s ve ızgara tipi içörgü deseniyle %50 içörgü yoğunluğu olduğu gösterilmiştir.

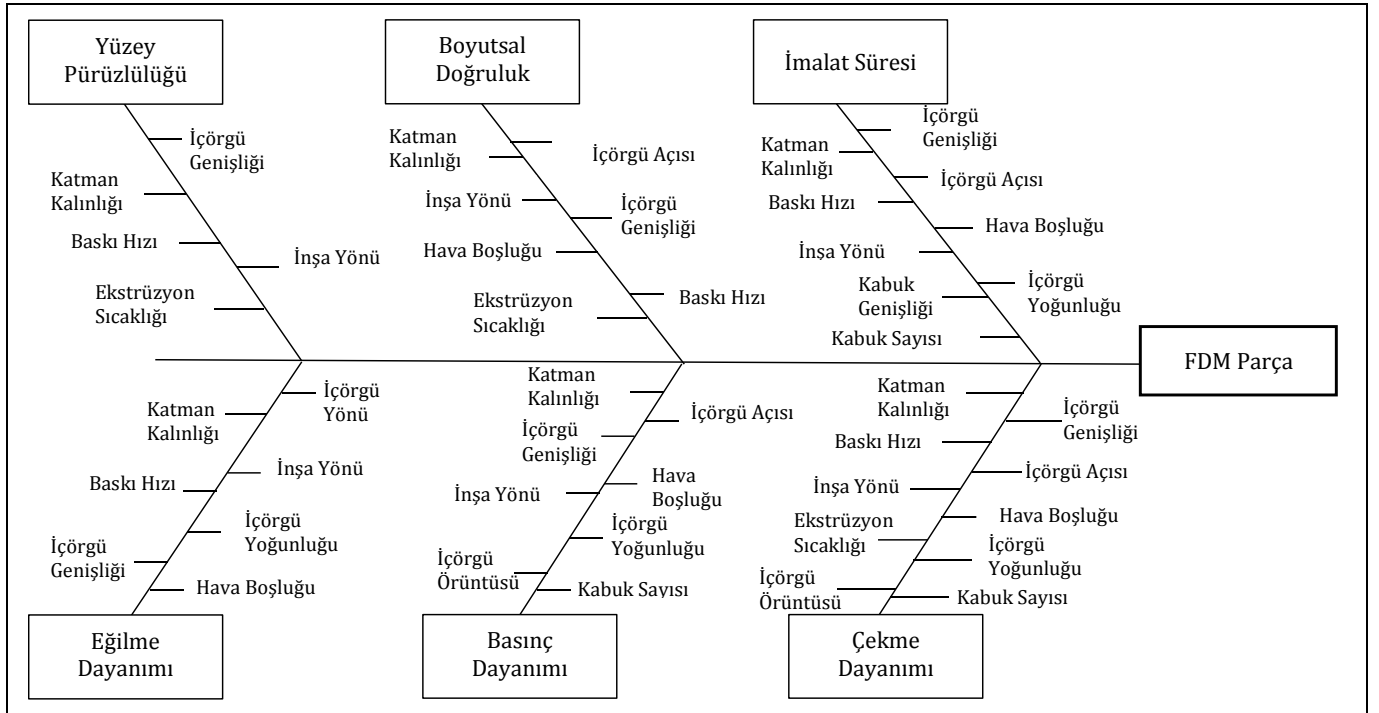
3B baskı yönteminin en büyük dezavantajlarından biri uzun imalat süresidir. Yapılan çalışmalarda FDM yöntemi ve PLA filament kullanılarak farklı yazdırma parametreleri için araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bunların içerisinde imalat süresine en çok etki eden iki faktör katman yüksekliği ve nozül çapıdır. Katman yüksekliğinin etkisi daha önce incelenmiş olsa da nozül çapı ile alakalı yeterli çalışma yoktur. Ayrıca, Böğrekçi'nin tavsiye ettiği üzere nozül sıcaklığı da araştırılması gereken önemli bir parametredir. Bundan dolayı, farklı yazdırma parametrelerinin sertlik üzerine etkisini incelemek önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, dört farklı yazdırma parametresinin 3B FDM yöntemi ile imal edilmiş numunelerin sertliklerine etkileri deneysel tasarım yöntemiyle incelenmiştir. Kullanılan yöntem ve deneysel tasarım bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Yapılan ölçüm ve deneylerin sonuçları ile elde edilen neticelerin yorumlanması ve diğer çalışmalarla karşılaştırması ise üçüncü bölümde verilmiştir. Son olarak da, 3B baskılı malzemelerin sertliği hakkındaki zorluklar ve gelecekteki yönelimler hakkında bir tartışma sunulmaktadır. Bu alanda daha fazla araştırma yapma potansiyelini ve 3B baskılı nesnelerin sertliğinin daha derinden anlaşılmasından kaynaklanabilecek faydalar da ayrıca özetlenmiştir.

2 Malzeme ve yöntem

Literatürde 3B yazıcı ile imal edilmiş numunelerin sertlik değerlerini belirlemek için genellikle tercih edilen iki farklı yöntem vardır [17],[19]. Bunlardan ilki Shore D durometer ölçüm sistemi diğeri ise Rockwell sertlik ölçme sistemidir. Plastikler için Shore yöntemi daha çok tercih edilmesine rağmen, daha geniş bir ölçüm aralığına sahip olduğu ve ASTM standardına uyumluluğu için Rockwell ölçüm metodu bu çalışmada tercih edilmiştir.

ASTM D785 - plastiklerin ve elektrik izolasyon malzemesinin Rockwell sertliği standardında sertlik ölçümü için Rockwell R, L, M, E ve K ölçekleri önerilmektedir [22]. Ayrıca, uygun sertlik ölçeği için mümkün olan en yüksek kuvvete karşılık en düşük çaplı ucun seçilmesi gerektiği belirtilmektedir. Yapılan ön çalışmalarda bu çalışma için seçilen yazdırma parametreleri için L ölçeğinin en uygun yöntem olduğu belirlenmiştir. Seçim kriteri ve etkisi sonuçlar bölümünde sunulmuştur. Numune boyut ölçümleri ASTM D785-03 referans alınarak belirlenmiştir. Test numunesinin şekli daire formundadır. Boyut ölçümleri ise 20 mm yarıçap ve 6 mm kalınlık olarak seçilmiştir. Ölçüm numunesi AutoCAD ortamında 3 boyutlu katı model olarak oluşturulmuş ve dilimleme programında kullanabilmek için stl formatında kaydedilmiştir. Yazdırma parametrelerinin seçilmesi için literatürde 3B yazıcılar ile alakalı olan çalışmalarda en çok tercih edilen parametreler incelenmiştir [18],[23],[24]. Ayrıca, Dey'in FDM yazdırma parametrelerinin optimizasyonu ve parça özellikleri üzerine etkisini inceleyen çalışmasında mekanik özelliklerini ayrı ayrı etkileri bir balık kılçığı diyagramı ile gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Balık Kılıçığı diyagramı, yazdırma parametrelerinin parça mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermektedir [21].

Figure 1. Fishbone diagram shows the effects of printing parameters on part mechanical properties [21].

Ürün sertliğini etkilemesi beklenen basınç dayanımı incelendiğinde katman kalınlığı ve içörgü açısının incelenmesi gereken parametreler arasında olduğu gösterilmektedir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk için ekstrüzyon sıcaklığı da etkili parametrelerdendir. Parametrelerin detaylı seçim kriterleri giriş bölümünde ilgili çalışmaları da kaynak göstererek sunulmuştur. Bunlara ek olarak imalat süresi ve yüzey yapısı üzerinde yüksek etkisi olduğundan dolayı nozül çapı da dördüncü parametre olarak seçilmiştir [25],[26]. Her bir yazdırma parametresi için üç seviye belirlenmiştir. Parametrelerin alt ve üst değerleri önceki yapılmış çalışmalar ya da üreticinin tavsiye ettiği değerler dikkate alınarak belirlenmiştir [8]. Yazdırma parametreleri ve seviyeleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Deney tasarımında kullanılan parametreler ve seviye değerleri.

Table 1. Parameters and level values used in experimental design.

Yazdırma Parametresi	Kod	Seviyeler			Birim
		1	2	3	
Nozül çapı	A	0.25	0.4	0.6	mm
Katman Yüksekliği	B	0.1	0.15	0.2	mm
İç örgü Açısı	C	0	30	45	°
Nozül Sıcaklığı	D	200	210	220	°C

Dört parametre ve üç seviye tam deney tasarımı için gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı 81'dir. Üretim adedini düşürmek ve ölçüm sayısını azaltmak için Taguchi L₉ deney tasarımı uygulanmıştır [27],[28]. Her bir deney için, çevresel faktörlerin ve rastsal hataların etkisini azaltmak amacıyla 4

adet numune üretilmiştir. Deney tasarımı ve deney parametrelerinin değerleri Tablo 2'te verilmiştir.

Tablo 2. L₉ Taguchi ortogonal dizisi ile deney tasarımı.

Table 2. Experiment design with L₉ Taguchi orthogonal array.

Deney Numarası	Nozül Çapı (mm)	Katman Yüksekliği (mm)	İç örgü açısı (°)	Nozül Sıcaklığı (°C)
1	0.25	0.10	0	200
2	0.25	0.15	30	210
3	0.25	0.20	45	220
4	0.4	0.10	30	220
5	0.4	0.15	45	200
6	0.4	0.20	0	210
7	0.6	0.10	45	210
8	0.6	0.15	0	220
9	0.6	0.20	30	200

Diğer tüm değiştirilebilir deney parametreleri sabit tutulmuştur. Üretim sırasında ortam sıcaklığı 26 °C, havadaki nem %60 olarak ölçülmüştür. Tabla sıcaklığı tüm numuneler için sabit 60 °C olarak ayarlanmıştır.

Cura dilimleme programı kullanılarak ilgili yazdırma parametreleri ile imalat için gerekli üretim kodları oluşturulmuştur. Test numunelerinin üretilmesi için Ultimaker 2+ masa üstü 3B yazıcı kullanılmıştır. Yarı kapalı hacmi ve sağlam konstrüksiyon yapısı dış etkenler ve çevresel faktörlerden diğer yazıcılara göre daha az etkilenmesini sağlamaktadır.

LA, 3B baskıda en yaygın kullanılan plastik filament malzemesidir. Düşük erime noktası, nispeten yüksek mukavemeti, düşük termal genişmesi, iyi katman yapışması 3B yazıcılar için ideal bir malzeme seçeneği olmaktadır. En önemli özelliği ise yenilebilir kaynaklardan üretiliyor olmasıdır. PLA malzeme olarak ESUN PLA+ marka 2.85 mm kalınlıkta filament kullanılmıştır. Üretici firma tarafından sağlanan malzeme mekanik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Malzemenin nemlenmemesi için çalışma öncesi filament vakum altında tutulmuştur. Tüm numuneler peş peşe, aynı makaradan üretilerek eşit koşullar sağlanmaya çalışılmıştır.

Tablo 3. PLA filament malzeme özellikleri [11].

Table 3. PLA filament material properties [11].

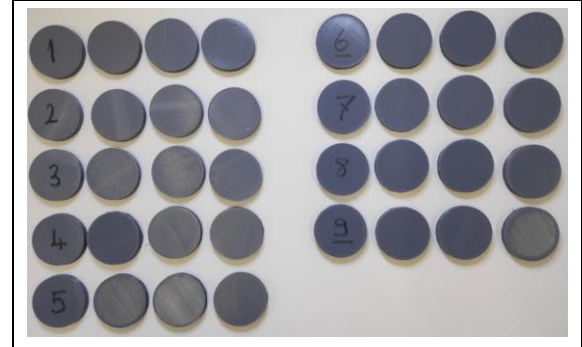
Özellik (Birim)	Değeri
Yoğunluk (g/cm ³)	1.24
Erime sıcaklığı (°C)	130-230
Kırılma anındaki uzama (%)	7.0
Elastik modül (MPa)	3500
Kesme modül (MPa)	1287
Poisson oranı	0.360
Akma dayanımı (MPa)	70
Çentiksiz izod darbe (J/m)	198
Rockwell sertlik (HR)	88
Çekme dayanımı (MPa)	73

İmalatlar bittikten sonra numuneler hemen tabladan alınmamış, herhangi bir çarpılma ve deformasyon oluşmaması için tablanın tamamen soğuması beklenmiştir. Ayrıca numunelerin kenar formlarını koruması ve üretim esnasında tabladan ayrılma oluşmaması için ilk katman seriminde 10 sıra brim çemberi oluşturulmuştur. Silindirik numunenin imalatında 2 sıra duvar örülmüştür. En alt ve en üst katman sayıları sıfır olarak seçilmiştir. Tüm katmanlar ilgili deney tasarımındaki açılara uygun olarak en alttan en üste kadar aynı içörgü açısında olacak şekilde ayarlanmıştır. Üretilen numuneler Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tüm imalatlar bittikten sonra numunelerin boyutsal ölçümleri mikrometre ve kumpas kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler numunenin üç farklı noktasından alınarak ortalama değeri hesaplanmıştır. Ayrıca her bir numunenin ağırlık ölçümü 0.01 gr hassasiyete sahip Mettler Toledo marka tartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sertlik ölçümü için Affri marka 206EX Model elektro mekanik sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. 5 (6.35) küresel uç ve 588 N kuvvet uygulanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Cihaz programından HRL sertlik ölçüm yöntemi seçilerek ölçüm sonucu doğrudan cihaz üzerinden okunmuştur. Her bir numunenin farklı noktalarından 5 adet ölçüm alınmıştır. İlk

ölçüm değeri hesaba katılmamıştır. Numunenin sertlik değeri için ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. İlgili deney dizisinin sertlik değeri, dört numunenin hesaplanan sertlik değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2. 3B yazıcı ile imal edilmiş test numuneleri.

Figure 2. Test specimens fabricated with a 3D printer.

3 Deneyleerin analizleri

Yapılan ölçümler ve deneylerin sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Dilimleme programı ile yapılan hesaplamada ilk 5 deney numunesi için hesaplanan birim ağırlık 9 gram, diğer deney numuneleri için ise 9.25 gramdır. Hesaplanan bu değerler ile imal edilen numunelerin ölçümleri karşılaştırıldığında özellikle 0.25 mm çapa sahip nozül ile yapılan üretimlerde yüksek farkların olduğu gözükmektedir. En yüksek fark 3 No.lu numunede %40 olarak bulunmuştur. Diğer yüksek farklar ise sırasıyla %23 ve %15 oranlar ile 2 ve 1 No.lu numunelerde görülmüştür. İlk üç deneyde nozül çapı eşittir ve iç örgü açısının ağırlığa bir etkisinin olmaması beklenmektedir. Bundan dolayı katman yüksekliği arttıkça ağırlık farkının da arttığı ortaya çıkmaktadır. Katman kalınlığı, imalat sırasında yükselme yönünde ilerlenecek adım sayısını etkilemektedir. Bu nedenle, adım sayısının artması daha doğru sonuçlar elde edilebilmesini sağlamaktadır.

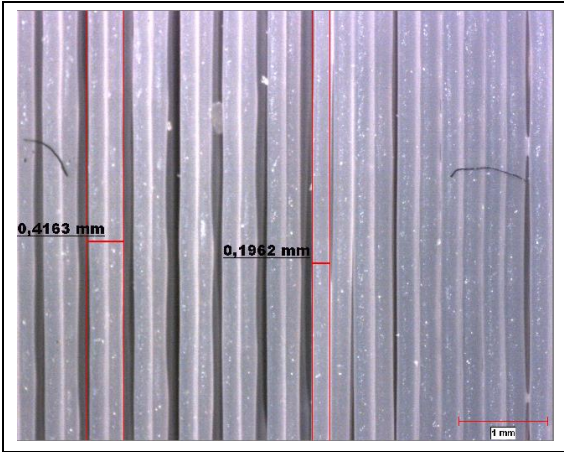
Üretilen numunelerin çapı 40 mm kalınlığı ise 6 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümlere göre her iki boyut değeri için de büyük farkların olmadığı gözükmektedir. 0.25 mm nozül ile yapılan üretimlerde daha doğru kalınlık değerlerinin elde edilmesi, daha hızlı soğumadan kaynaklanmaktadır. Birim zamandaki hacimsel ekstrüzyon miktarı, nozül çapının karesi ile orantılı olduğundan, soğuma hızı da üstel olarak değişim göstermektedir. Böylelikle daha küçük çapa sahip nozüllerden çıkan malzeme diğer nozüllere göre daha hızlı soğumaktadır. Yavaş soğuyan parçalar ise daha fazla büzölmeye maruz kaldığı için boyutsal doğruluğu daha düşük olabilmektedir.

Tablo 4. Ağırlık, çap, kalınlık ve hasar ölçümlerinin sonuçları.

Table 4. Results of weight, diameter, thickness and damage measurements.

Deney	A	B	C	D	İmalat Süresi, dk.	Ağırlık, gr (±SDS)	Çap, mm (±SDS)	Kalınlık, mm (±SDS)	Hasar, mm (±SDS)
1	1	1	1	1	105.8	7.68 ± 0.08	39.49 ± 0.29	6.00 ± 0.05	1.46 ± 0.02
2	1	2	2	2	72.3	6.91 ± 0.10	39.48 ± 0.23	5.99 ± 0.04	1.53 ± 0.02
3	1	3	3	3	54.5	5.40 ± 0.29	39.62 ± 0.12	5.99 ± 0.13	1.67
4	2	1	2	3	69.3	8.80 ± 0.04	39.63 ± 0.26	5.92 ± 0.07	1.08 ± 0.02
5	2	2	3	1	47.8	8.58 ± 0.03	39.73 ± 0.12	5.87 ± 0.04	1.20 ± 0.09
6	2	3	1	2	37.5	8.51 ± 0.04	39.66 ± 0.09	5.95 ± 0.05	1.24 ± 0.08
7	3	1	3	2	49.0	9.05 ± 0.03	39.71 ± 0.22	5.91 ± 0.03	1.00 ± 0.02
8	3	2	1	3	33.5	8.87 ± 0.02	39.84 ± 0.19	5.87 ± 0.04	1.07 ± 0.07
9	3	3	2	1	26.3	8.93 ± 0.03	39.89 ± 0.19	5.91 ± 0.03	1.10 ± 0.05

Plastiklerin sertlik ölçümü için genellikle Durometre ve Mikrovickers sertlik ölçüm yöntemleri tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemlerde numune yüzeyinin çok az bir alanına kuvvet uygulamaktadır. 3B yazıcılar ile imal edilen ürünlerin yüzeyleri dalgalı bir yapıya sahip olduğundan, sertlik ölçümü için kullanılan uçun nispeten büyük çapa sahip olması daha iyi sonuç verecektir. Ancak, ASTM D758 standardında en iyi sonucu elde etmek için kuvvetin artırılması ve uç çapının düşürülmesi önerilmektedir. Eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin sertliği ile alakalı benzer bir çalışmada ise Rokwell R ölçek tercih edilmiştir [29]. Plastiklerin ve elektrik izolasyon malzemelerinin Rockwell sertliği standardında sertlik ölçümü standardında önerilen R ve L ölçekleri arasında sadece uç çapında farklılık vardır, uygulanan kuvvetler eşittir. Standardın önerisine uygun olarak bu iki ölçekten daha küçük çapa sahip olan Rockwell L tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değeri 45 HRL olarak bulunmuştur. Ancak bazı numunelerde sertlik değeri okunamamıştır. Özellikle 3 No.lu deney için yapılan imalatlarda numune üzerinde büyük boşluklar olduğu ve filamentlerin birbirine tam yapışmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumun mikroskop görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir. Bu nedenle varyans (ANOVA) analizi için numunelerin sertlik değeri yerine malzeme üzerinde oluşturduğu hasarın çap bilgileri kullanılmıştır.



Şekil 3. 3 No.lu numune üzerinde oluşan boşluklar.

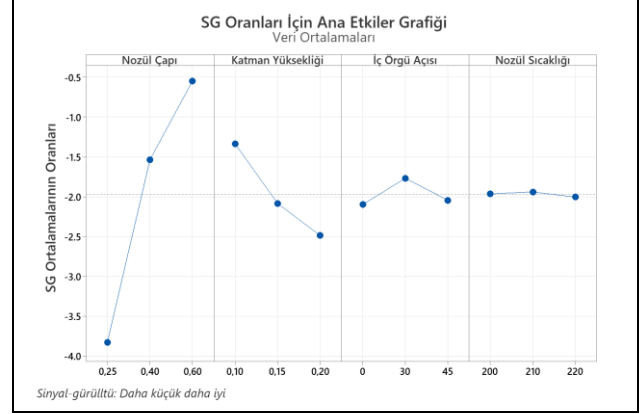
Figure 3. Voids formed on specimen number 3.

Sinyal-gürültü (SG) oranı, farklı koşullar altında herhangi bir sistemin cevabının hedefe veya nominal bir değere göre nasıl değiştiğini gösterir. Mekanik hasar etkisinin SG oranı ana etkiler grafiğini elde etmek için Taguchi ortogonal dizisi uygulanarak Minitab yazılımı kullanılmıştır. Çıktı hedefi olarak programda üç tür SG oranı seçilebilmektedir. Bunlar; daha küçük daha iyi, daha büyük daha iyi ve nominal daha iyi şeklindedir. Bu çalışmada en yüksek yüzey sertlik değerini ortaya çıkaracak yazdırma parametrelerini aradığımız için hasarında en küçük olması gerekmektedir. Bu nedenle aşağıdaki formülü kullanan daha küçük daha iyi seçeneği uygulanmıştır.

$$S/G = -10 * \log \left(\sum (1/Y^2) / n \right)$$

Burada n seviye 1 için yapılan deney sayısı ve Y ise ölçülen değerdir. Yazdırma parametrelerinin SG oranlarının ana etki değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Analizin hedefi olarak malzeme

üzerinde en az hasar oluşturacak parametre birleşimi belirlenmiştir. Bu nedenle, en iyi yazdırma parametreleri en yüksek SG değerine sahip seviyeler olarak belirlenmektedir. Sonuçlara göre 0.60 mm nozül çapı, 0.10 mm katman kalınlığı, 30 derece içörgü açısı ve 210 °C nozül sıcaklığı en uygun kombinasyon olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4. Nozül çapı, katman yüksekliği, içörgü açısı ve nozül sıcaklığı için Minitab yazılımını kullanarak oluşturulmuş SG oranı için ana etki grafiği.

Figure 4. Main effect plot for SG ratio generated using Minitab software for nozzle diameter, layer height, raster angle and nozzle temperature.

En yüksek sinyal gücüne sahip parametre nozül çapıdır. 3B yazıcılar ile imal edilen ürünlerin yüzeyleri, içörgü doldurma işleminin doğasından kaynaklanan yöntem dolayısıyla tırtıklı bir yapıya sahiptir. Sertlik ölçme işlemi sırasında bu içörgü çizgileri tepeli ve boşluklu bir yapı oluşturduğundan Şekil 5(a), uçun daha çok nüfuz etmesine sebep olmaktadır. Böylelikle parçanın sertlik değeri daha düşük çıkmaktadır. Ancak, büyük yarıçaplı nozül ile yapılan üretimlerde tepe sayısı daha az ve yüzey daha düze yakın bir şekle sahip olduğu için hasar oluşumunun daha az olması beklenmekteydi Şekil 5(b). Elde edilen neticeler bu düşünce ile aynı doğrultudadır. İkinci en yüksek sinyal gücüne sahip parametre katman yüksekliğidir. Hasar oluşumu ile katman yüksekliğinin artışının arasında ters bir ilişki vardır. Katman yüksekliği arttıkça katman çizgileri arasındaki boşluk miktarı da artmaktadır. En üst yüzeyde herhangi bir boşluk gözükmemesine rağmen, ürünün kesit alanında dolgu oluşmamış gözenekli bir yapı ve hacimler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, malzemeye kuvvet uygulandığında daha fazla hasar meydana gelmektedir. Diğer bir yazdırma parametresi içörgü açısı için sinyal gücü etkisi grafikten incelendiğinde 30 derecenin en yüksek değere sahip olduğu gözükmektedir. Ancak nozül çapı ve katman yüksekliğinin etkileri ile oranlandığında bu etki çok zayıf kalmaktadır. Nozül sıcaklığının etkisi ise seçilen sıcaklık aralığı için diğer parametrelere göre çok düşüktür.

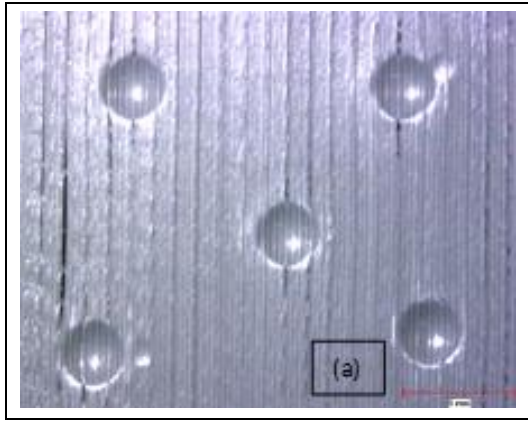
Yazdırma parametrelerinin ilişkilerini ve ölçüm çıktısına katkısını araştırmak için Minitab yazılımı kullanılarak ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 5'te gösterildiği gibi, nozül çapının numune üzerinde hasar oluşumuna karşı gösterilen direnç katkısı %85.51'dir. Nozül sıcaklığı ise %0.20 katkı ile en düşük katkıya sahiptir. Nozül çapı ve katman yüksekliği 0.05'ten daha düşük p değerine sahiptirler. Bu nedenle iki parametre de istatistiksel olarak anlamlıdır. İçörgü açısının belirsizliği güvenilir aralıktan uzaktır. Bu sonuçlar önceki çalışmalar ile tutarlılık göstermektedir [18].

Tablo 5. ANOVA sonuçları.

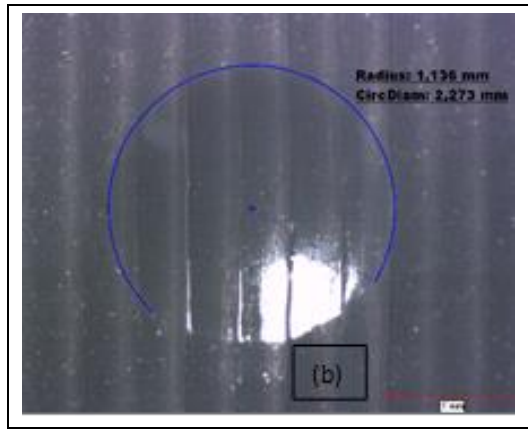
Table 5. ANOVA results.

Kaynak	SD	Ard KT	Katkı	Düz KT	Düz KO	F-Değeri	P-Değeri
Nozül Çapı	2	115.836	%85.51	115.836	0.579181	202.41	< 0.001
Katman Yüksekliği	2	0.12902	%9.52	0.12902	0.064512	22.55	< 0.001
İç Örgü Açısı	2	0.01299	%0.96	0.01299	0.006496	2.27	0.132
Nozül Sıcaklığı	2	0.00273	%0.20	0.00273	0.001365	0.48	0.628
Hata	18	0.05151	%3.80	0.05151	0.002861		
Toplam	26	135.461	%100.00				

*SD: Serbestlik derecesi. Ard KT: Ardışık kareler toplamı, Düz KT: Düzeltilmiş kareler toplamı. Düz KO: Düzeltilmiş kareler ortalaması.



(a)



(b)

Şekil 5(a): Sertlik ölçümün gerçekleştirildiği 1 No.lu numune, (b) 6 No.lu numuneden yapılan ölçüm.

Figure 5. The measurement of hardness performed on (a): Sample number 1 and, (b): Sample number 6.

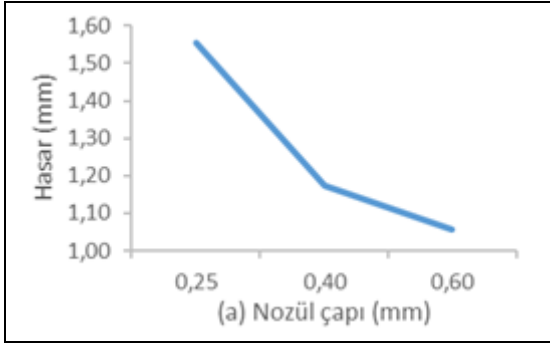
Böğrekçi çalışmasında farklı içörgü desenlerinin aynı yoğunluk değeri için farklı sertlik değeri verdiğini belirtmiştir. Bu durumun sebebi olarak da ara katmanlar arasındaki bağların ve içörgüyü oluşturma esnasındaki farklı yörüngeleri izlenmesinin göstermiştir. İçörgü açısı katkısının düşük etkiye sahip olması, farklı yörünge değerlerinde doldurma işlemi sırasında izlenen yörüngelerin çok az farklılık içermesi olabilir. Ayrıca bu çalışmada yapıldığı gibi tek bir açı değeri uygulandığında serim işlemi ardışık şekilde yapılmaktadır. Böylelikle, bir önceki işlemde dökülen malzeme sıcaklığını tam kaybetmeden diğer filament ile kuvvetli yapışma yapmaktadır. Ancak, farklı desen türleri uygulandığında serim işleminin ardışık olma ihtimali

daha düşük olmaktadır. Serme işlemi, deseni oluşturacak şekilde ilerlemektedir. Bu yüzden bir önceki adımdaki malzeme soğumuş olduğundan birleşme mukavemeti daha düşük olmaktadır.

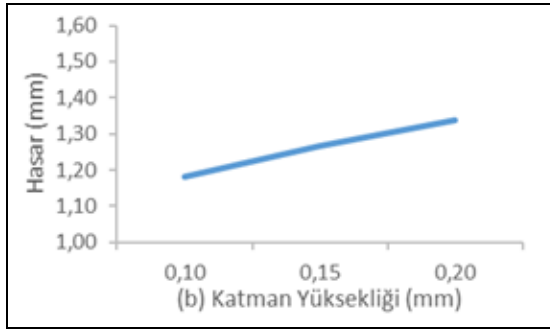
Mayen çalışmasında eklemeli imalat ile üretilmiş numunelerin sertlik değerini saptamak için metodoloji geliştirirken içörgü açısının etkisini de incelemiştir. İçörgü açısının sertlik üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu belirtmiştir. Ancak, çalışmada numunelere üretim sonra ısıtma işlemi uygulanması da yapılmıştır. Herhangi bir sonlandırma muamelesine tabi tutulmamış numunelerin ölçümü incelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin 60° civarında olduğu görülmektedir. Bu çalışmada içörgü açısına göre en yüksek sertlik değeri 30° ve 45° arasında bulunmuştur. 0° ile 90° arasında simetri durumu göz önüne alınırsa, sonuçların tutarlı olduğu söylenebilir.

Seçilen yazdırma parametreleri hariç diğer tüm değiştirilebilir yazdırma seçenekleri sabit tutulmuştur. Ancak çevre koşulları ve cihazdaki belirsizlikler bazı üretim parametrelerini diğerlerinden daha çok etkilemektedir. Nozül yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Ancak, ısıtıcı blok ve nozül çok düşük bir hacme sahip olduğu için dış faktörlerden etkilenme ihtimali daha yüksektir. Nozül sıcaklığı parametresinin en yüksek p değerine sahip olması bu görüşü desteklemektedir. Katman yüksekliği cihaz tarafından mekanik olarak kontrol edildiğinden, çevresel faktörlerden etkilenme oranı çok daha düşüktür. P değerinin çok düşük çıkması ilgili durumun bir ispattır. İç örgü açısının p değeri istatistiksel olarak anlamlı olması için gereken 0.05 değerinden yüksektir. Materyal ve yöntem bölümünde bahsedildiği gibi 3B numuneler tırtıklı bir yüzeye sahiptir. Bu nedenle, sertlik ölçüm anında uçun tüm yüzeyinin numune ile temas etmesi mümkün değildir. Arada küçük boşluklar olmaktadır. Her bir ölçüm işleminde de bu durumun eşit ölçüde tekrar etmesi mümkün değildir. Bu hata kaynağının etkisini azaltmak için her ölçüm dört kere tekrar edilmiş ve ortalaması alınmıştır. Ancak yeterli olmadığı düşünülmektedir. Uç çapının büyütülmesi ya da ölçüm sayısının artırılmasının p değeri üzerine olumlu etki etmesi beklenmektedir.

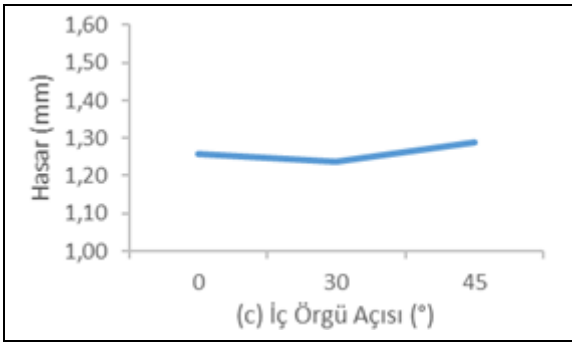
Yazdırma parametrelerinin aynı seviyeleri için elde edilmiş ölçüm neticelerinin karşılaştırılması Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi numunenin sertliği (hasar) ile nozül çapı arasında net bir ilişki vardır. Birçok yazıcı imalatçısı firma ve kullanıcılar 0.4 mm çapa sahip nozül ile üretim yapmayı önermektedir. Ancak 0.6 mm ve 0.8 mm çapa sahip nozüller ile yapılan imalatlarda çekme mukavemeti açısından daha iyi sonuçlar alındığı önceki çalışmalarda gösterilmiştir [10],[23]. Aynı durum malzemenin sertliği için de geçerlidir. Yüksek çapa sahip nozülün bu avantajların yanında en önemli özelliği üretim süresini düşürmesidir.



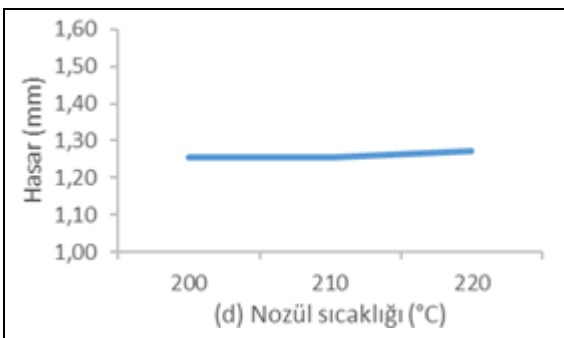
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6. Yazdırma parametrelerinin oluşan hasar miktarına göre ortalama değer grafikleri. (a): Nozül çapı, (b): Katman yüksekliği, (c): İç örgü açısı, (d): Nozül sıcaklığı.

Figure 6. Average value plots of printing parameters according to the amount of damage. (a): Nozzle diameter, (b): Layer height, (c): Raster angle, (d): Nozzle temperature.

0.6 mm çapa sahip bir nozül, 0.4 mm çaplı nozüle göre aynı hızda %125 daha fazla hacimsel debi sağlayabilmektedir. Düşük çapa sahip nozüller hem üretim süresini çok fazla

arttırmakta hem de düşük hacimde ekstrüzyon yaptığı için yapışmadan kurumaya sebep olmaktadır. İlgili koşullar sağlansa bile mekanik özellikleri zayıf olmasının yanında düşük çaplı nozüller üretim süresini de yaklaşık 5 kat arttırdığı için avantajlı görülmemektedir. Yüksek çaplı nozüller ile imalat için gösterilebilecek olumsuz durumlar ise kötü yüzey sonlandırma ve düz olmayan birleşim yerlerini tam dolduramama olarak söylenebilir [23].

Katman yüksekliğinin artışı 3B yazıcı ile imal edilen parçaların sertliğini düşürmektedir. Z yönünde adım miktarı arttıkça ardışık katmanlardaki çizgilerin arasındaki boşluk miktarı da artmaktadır. Katman yüksekliğindeki artışın sertliğe negatif etkisi nozül çapı değişimine göre daha düşüktür. İmalat süresi açısından katman yüksekliğinin de etkisi çok büyük olduğundan, üretim süresini düşürmek için katman yüksekliğini arttırmak avantajlı olacaktır. İç örgü açısı ve nozül sıcaklığının sertlik üzerine kayda değer etkileri gözlemlenmemiştir.

4 Sonuçlar

Eklenebilir imalat yöntemi ilk olarak hızlı prototipleme ve pilot üretim gibi ihtiyaçlara cevap vermeye yönelik olarak ortaya çıkmıştır. Ancak teknolojiye gelişmeler ve yeni malzemelerin bulunmasıyla son kullanıcı ürünleri de bu yöntemler ile imal edilmeye başlamıştır. Bu nedenle, tutarlı ve yüksek kaliteli sonuçlar elde edebilmek için üretim parametrelerini ve bunların nihai ürün üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak önem arz etmektedir. Bu çalışma, ergiyik yağma metodunda standart PLA numunelerinin yüzey sertliği açısından en uygun yazdırma parametrelerini bulmak için yapılmıştır.

Yapılan literatür araştırması sonucuna göre nozül çapı, katman yüksekliği, iç örgü açısı ve nozül sıcaklığı yazdırma parametreleri olarak seçilmiştir. İlgili ASTM standardı temel alınarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen neticelere göre sertliğe en yüksek katkı sağlayan yazdırma parametresi %85.51 etki oranı ile nozül çapı olmuştur. Ölçüm sonuçları ve Taguchi analizine göre artan nozül çapının numunenin sertlik değerini de arttırdığı anlaşılmıştır. 0.25 mm nozül çapı ile yapılan üretimlerde en düşük değerlerin gözlemlenmesinin yanında tam yapışmamanın da olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer etkili parametre ise %9.52 ile katman yüksekliğidir. Her iki parametre de istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu çalışma için belirlenmiş sınır değerleri içerisinde, ANOVA analizinden elde edilen neticelere göre iç örgü açısı ve nozül sıcaklığının etkileri çok düşük olarak görülmüştür. Belirlenen aralıklardaki en yüksek sertlik değeri için yazdırma parametreleri 0.6 mm nozül çapı, 0.1 mm katman yüksekliği, 30° iç örgü açısı ve 210 °C nozül sıcaklığıdır.

Parametrelerin doğru seçimi, tasarımcıların ve üreticilerin imalat süresi ve ürünün sertliği açısından parçalarda daha az farklılık ve belirsizlik ile iyi mekanik özellikler elde etmelerini sağlayacaktır. Bundan sonraki çalışmalarda kompozit iç örgü desenlerinin ve imalat sonrası yapılacak sonlandırma işlemlerinin etkilerinin araştırılması önerilmektedir

5 Conclusions

The additive manufacturing method first emerged to respond to rapid prototyping and pilot production needs. However, with technological developments and the discovery of new materials, end-user products have also started manufacturing with these methods. Therefore, it is essential to investigate the printing parameters and their effects on the final product to

obtain consistent and high-quality results. This study was carried out to find the most suitable printing parameters regarding the surface hardness of standard PLA samples in fused deposition modeling.

According to the results of the literature research, nozzle diameter, layer height, raster angle, and nozzle temperature were selected as printing parameters. Experiments were conducted based on the relevant ASTM standard. According to the results, the nozzle diameter was the highest effective printing parameter contributing to the hardness, with an effect rate of 85.51%. According to the experiment results and Taguchi analysis, it was understood that increasing the nozzle diameter also increased the hardness value of the sample. In addition to the lowest values observed in the productions made with a nozzle diameter of 0.25 mm, it was revealed that there was also incomplete adhesion. The other effective parameter is the layer height, with a 9.52% contribution. Both parameters are statistically significant. The effects of the raster angle and nozzle temperature are so low that they can be ignored. The printing parameters for the highest hardness value in the specified ranges are 0.6 mm nozzle diameter, 0.1 mm layer height, 30° mesh angle, and 210 °C nozzle temperature.

Correct selection of parameters will enable designers and manufacturers to achieve good mechanical properties with less variation and uncertainty in parts regarding manufacturing time and product stiffness. In future studies, it is recommended to investigate the effects of composite inner knitting patterns and post-manufacturing finishing processes.

6 Teşekkür

Bu çalışma Doğuş Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021-22-D1-B02 No.lu proje ile desteklenmiştir. Yardımlarından dolayı Doğuş Üniversitesi MİT laboratuvarına teşekkür ederim.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Sermet DEMİR, fikrin oluşması, literatür araştırması, deney tasarımı ve malzeme temini, verilerin toplanması ve sonuçların değerlendirilmesine katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

- [1] Rouf S, Raina A, Irfan Ul Haq M, Naveed N, Jeganmohan S, Farzana Kichloo A. "3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications". *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(3), 143-158, 2022.
- [2] Stern A, Rosenthal Y, Dresler N, Ashkenazi D. "Additive manufacturing: An education strategy for engineering students". *Additive Manufacturing*, 27, 503-514, 2019.
- [3] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges". *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196, 2018.
- [4] Abdulhameed O, Al-Ahmari A, Ameen W, Mian SH. "Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications". *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 1-27, 2019.
- [5] Shahrubudin N, Lee TC, Ramlan R. "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications". *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296, 2019.
- [6] Tofail SAM, Koumoulos EP, Bandyopadhyay A, Bose S, O'Donoghue L, Charitidis C. "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities". *Materials Today*, 21(1), 22-37, 2018.
- [7] Öncü AÇ, Tekcan Ç, Özden H. "Mekanik parçaların tersine mühendislik ile modellenmesinin değerlendirilmesi ve bir uygulama". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 43-49, 2018.
- [8] Atakok G, Kam M, Koc HB. "Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation". *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1542-1554, 2022.
- [9] Lokesh N, Praveena BA, Sudheer Reddy J, Vasu VK, Vijaykumar S. "Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature". *Materials Today: Proceedings*, 52, 1288-1293, 2022.
- [10] Hikmat M, Rostam S, Ahmed YM. "Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology". *Results in Engineering*, 11, 1-10, 2021.
- [11] Torres J, Cole M, Owji A, DeMastry Z, Gordon AP. "An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments". *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 387-404, 2016.
- [12] Taşar B, Gülten A, Yakut O. "Design and manufacturing of 15 DOF myoelectric controlled prosthetic hand". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(5), 884-892, 2020.
- [13] Gunasekaran KN, Aravindh V, Kumaran CBM, Madhankumar K, Kumar SP. "Investigation of mechanical properties of PLA printed materials under varying infill density". *Materials Today: Proceedings*, 45, 1849-1856, 2021.
- [14] Turan SR, Ulkir O, Kuncan M, Buldu A. "Stereolithografi eklemeli imalat yöntemiyle farklı doluluk oranlarında üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi". *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 399-407, 2022.
- [15] Ergene B, Bolat C. "An experimental investigation on the effect of test speed on the tensile properties of The PETG produced by additive manufacturing". *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(2), 250-260, 2022.
- [16] Khosravani MR, Zolfagharian A, Jennings M, Reinicke T. "Structural performance of 3D-printed composites under various loads and environmental conditions". *Polymer Testing*, 91, 1-9, 2020.

- [17] Böğrekci İ, Demircioğlu P, Sucuoğlu HS, Turhanlar O. "The effect of the infill type and density on the hardness of 3D printed parts". *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3, 212-219, 2019.
- [18] Hanon MM, Dobos J, Zsidai L. "The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness". *Procedia Manufacturing*, 54, 244-249, 2020.
- [19] Mayén J, Del Carmen Gallegos-Melgar A, Pereyra I, Poblano-Salas CA, Hernández-Hernández M, Betancourt-Cantera JA, Mercado-Lemus VH, Del Angel Monroy M. "Descriptive and inferential study of hardness, fatigue life, and crack propagation on PLA 3D-printed parts". *Materials Today Communications*, 32, 1-18, 2022.
- [20] Ansari AA, Kamil M. "Izod impact and hardness properties of 3D printed lightweight CF-reinforced PLA composites using design of experiment". *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(3), 369-383, 2022.
- [21] Dey A, Yodo N. "A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics". *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 1-30, 2019.
- [22] American Society for Testing and Materials International. "Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials". USA, D785-08, 2015.
- [23] Demir S, Yüksel C. "Evaluation of effect and optimizing of process parameters for fused deposition modeling parts on tensile properties via Taguchi method". *Rapid Prototyping Journal*, 29(4), 720-730, 2022.
- [24] Khosravani MR, Reinicke T. "Effects of raster layout and printing speed on strength of 3D-printed structural components". *Procedia Structural Integrity*, 28, 720-725, 2020.
- [25] Bürenhaus F, Moritzer E, Hirsch A. "Adhesive bonding of FDM-manufactured parts made of ULTEM 9085 considering surface treatment, surface structure, and joint design". *Welding in the World*, 63(6), 1819-1832, 2019.
- [26] Vicente CMS, Martins TS, Leite M, Ribeiro A, Reis L. "Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts". *Polymers for Advanced Technologies*, 31(3), 501-507, 2020.
- [27] Roy RK. *Design Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*. 1st ed. India, Wiley, 2013.
- [28] Türkan B, Etemoğlu AB. "Taguchi metodu kullanılarak gıda kurutulmasına etki eden parametrelerin optimizasyonu". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 654-665, 2020.
- [29] Hill N, Haghi M. "Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate". *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 221-227, 2014.