



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

MALZEME EKSTRÜZYONU İLE ÇALIŞAN 3B YAZICILARDA ÜRETİM SORUNLARI

PRODUCTION PROBLEMS ON MATERIAL EXTRUSION BASED 3D PRINTERS

Yazarlar (Authors): Ahmet Fatih Yuran^{ID*}, İbrahim Yavuz^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yuran A.F., Yavuz İ., "Malzeme Ekstrüzyonu ile Çalışan 3B Yazıcılarda Üretim Sorunları" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(2): 261-272, (2022).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.972834

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

MALZEME EKSTRÜZYONU İLE ÇALIŞAN 3B YAZICILARDA ÜRETİM SORUNLARI

Ahmet Fatih Yuran^a , İbrahim Yavuz^b 

^aAfyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

^bAfyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: fatihyuran@aku.edu.tr

(Geliş/Received: 17.07.2021; Düzeltme/Revised: 19.07.2021; Kabul/Accepted: 07.08.2022)

ÖZ

Malzeme ekstrüzyonu; tel halindeki termoplastik hammaddenin hareketli bir nozul yardımıyla baskı tablası üzerinde istenen bölgeye dökülerek üretim yapılan bir yöntemdir. Düşük maliyeti ile malzeme ekstrüzyonu en çok kullanılan eklemeli imalat yöntemi olmakla birlikte, üretim esnasında çok fazla sorunla karşılaşmaktadır. Malzeme ekstrüzyonunda karşılaşılan üretim sorunları üç boyutlu (3B) yazıcının sahip olduğu donanımları ile ilgilidir. Bunun yanı sıra, üretim sırasında kullanılan yazılımlar, üretim parametreleri ve kullanıcının uzmanlığı gibi nedenlerden kaynaklanan üretim sorunları da bulunmaktadır. Bu çalışmada malzeme ekstrüzyonu yöntemini kullanan 3B yazıcılarda karşılaşılan ekstrüzyon sorunları değerlendirilmiştir. Üretim problemleri düşük maliyetli yazıcılarda daha sık karşılaşılmakla birlikte yüksek maliyetli profesyonel yazıcılarda da önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmada tespit edilen üretim sorunları, malzeme ekstrüzyonu yöntemini kullanan yazıcıların tümü için geçerlidir. 3B yazıcılarda üretim sırasında sık karşılaşılan yirmi bir temel üretim sorunu tespit edilmiştir. Bu sorunlar 3B yazıcılarla yapılan üretim sırasında ürünü fonksiyonel olarak kullanılamaz hale getiren veya üretimi engelleyen sorunlardır. Çalışmada tespit edilen her bir üretim sorunu detaylı görseller ile sunulmuş, sorunun sebeplerine dair bilgiler verilmiş ve çözüm önerileri tavsiye edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Malzeme Ekstrüzyonu, 3B Yazıcılar, Üretim Sorunları.

PRODUCTION PROBLEMS ON MATERIAL EXTRUSION BASED 3D PRINTERS

ABSTRACT

Material extrusion is an additive manufacturing method by melting the wire form thermoplastic material to the desired area on the printing table with the help of a moving nozzle. With its low cost, material extrusion is the most commonly used additive manufacturing method. However, it is one of the most problematic technology due to the faults encountered during production. The slicer software, hardware of the 3D printer, and the production parameters used during production can lead to production problems. In this study, the problems experienced in 3D printers using the material extrusion method were evaluated. The identified problems were classified. Although such production problems are more common in low-cost printers, they are also an important problem in high-cost professional printers. Classified problems in this study can be applied to all 3D printers using the material extrusion method. Twenty-one fundamental production difficulties have been classified. These production problems are the problems that make the product unusable or interrupt production process. Each production problem identified in the study was presented with detailed visuals, comprehensive information given about the causes of the problem, and solution advices suggested.

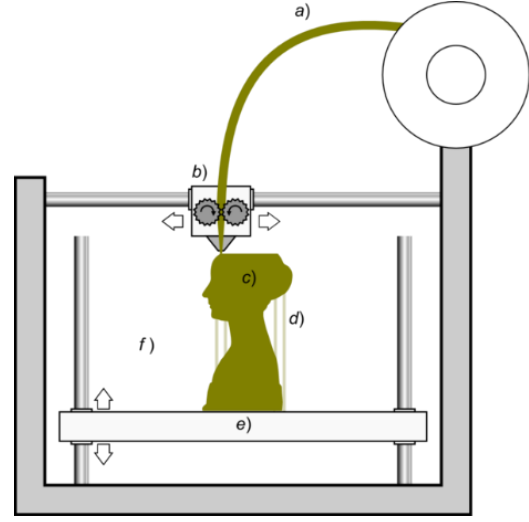
Keywords: Additive Manufacturing, Material Extrusion, 3D Printing, Production Problems.

1. GİRİŞ

3B yazıcılar sahip oldukları potansiyel nedeniyle endüstri 4.0 için hayati öneme sahiptir [1]. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmeyecek parçaların 3B yazıcılar ile üretilmesi mümkündür. Aynı zamanda klasik üretim tezgahlarının sahip olamayacağı kadar dijital üretime yatkın, Endüstri 4.0 ruhuna uygun, cihazlardır. En sık kullanılan yazıcılar düşük yatırım maliyetleri nedeniyle malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretim yapan 3B yazıcılardır [2]. Malzeme ekstrüzyonu tel halindeki termoplastik hammaddenin hareketli bir nozul yardımıyla baskı tablası üzerinde istenen bölgeye dökülerek üretim yapılan yöntemdir (Şekil 1). Malzeme ekstrüzyon tekniği (Fused Filament Fabrication) (FFF) olarak da anılmaktadır.

Malzeme ekstrüzyonu ile üretim yapan 3B yazıcılarda üretilen parçaların kalitesi mekanik dayanımı, ölçüsel doğruluğu ve yüzey toleranslarıyla ilgilidir. Şekil 1’de malzeme ekstrüzyonu ile çalışan bir 3B yazıcının kısımları görülmektedir. Üretilen parçanın kalitesi dilimleyici yazılımda belirlenen parametrelere ve yazıcıda kullanılan donanımların performansına bağlıdır. 3B FFF yazıcılarda üretilen ürünlerin kalitesinin artırılabilmesi için optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi ve kullanılması önem arz etmektedir [3]. Üretim parametreleri üretilen ürünün kalitesine doğrudan etki etmektedir [4]. 3B FFF yazıcıda üretilen ürünlerin yüzey pürüzlülüğü ürünün kalitesini ortaya koyan önemli bir veridir [5]. ABS filament kullanılarak yapılan bir çalışmada üretim sırasında seçilen dolgu tipinin ürünün sertliğine doğrudan etki ettiği ortaya koyulmuştur [6]. 3B FFF yazıcılar ile yapılan üretimlerde filamentin ısıtılma sıcaklığı yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. ABS 400 filament ile 265-285 °C sıcaklıkta yapılan üretimlerde yüzey pürüzlülüğünün 5.83 µm olduğu bulunmuştur [7]. Filament çapı, ekstrüzyon hızı ve üretim hızı FFF ile üretilen parçaların ölçüsel hassasiyetine ve toleranslarına doğrudan etkilemektedir. Ekstrüzyon hızı ve üretim hızının ürün toleranslarına etkisinin olduğu bilinmektedir [8]. 3B FFF yazıcı ile yapılan üretim süreci çeşitli ısı transferi problemlerini de beraberinde getirmektedir. Nozul–filament arasında, katmanların kendi arasında, alt tabla–ürün arasında ve ortam ile ürün arasında sürekli bir

ısı transferi söz konusudur. Üretim sürecindeki ısı transferi mekanizmalarının üretilen parçanın kalitesine önemli etkileri olabileceği bilinmektedir [9].



Şekil 1. Malzeme ekstrüzyonu ile çalışan 3B yazıcı kısımları; filament(a), ekstrüder(b), katmanlar(c), destek malzeme(d), baskı tablası(e) [10].

Literatürde yapılan çalışmalar çoğunlukla üretilen ürünlerin yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özellikleri ile ilgilidir. Bununla birlikte yazıcı parametrelerinin ürüne olan etkisi üzerine yapılan çalışmalar da oldukça fazladır. [11]. Ürünlerin mekanik özellikleri ve yüzey kaliteleri önem arz etmekle beraber ürünlerin fonksiyonel özellikleri de önemlidir. 3B FFF yazıcılar ile üretim yapılırken ürünün fonksiyonel özelliklerini etkileyecek sorunlarla sık sık karşılaşmaktadır. Üretim sırasında termal etkiler nedeniyle üründe çarpılmalar ve geometrik doğruluktan sapmalar meydana gelmektedir. Benzer şekilde 3B yazıcının ekstrüder’i ile ilgili sorunlar nedeniyle 3B dijital model ile üretilen ürün arasında makro düzeyde farklılıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu tür üretim problemleri düşük maliyetli yazıcılarda daha sık karşılaşılmakla beraber yüksek maliyetli profesyonel yazıcılarda da önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

3B yazıcılar ile üretilen parçaların kalitesi literatürde ağırlıklı olarak; yüzey hassasiyeti ve mekanik özellikleri açısından değerlendirilmiştir [3–11]. Ancak üretim sırasında parçanın fonksiyonel olarak kullanılamamasına sebebiyet veren sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu çalışmanın amacı üretim sorunlarına yeni bir yaklaşım sunarak; 3B FFF yazıcılarla üretim sırasında, ürünü fonksiyonel

olarak kullanılamaz hale getiren sorunları ortaya koymaktır. 3B FFF yazıcılarda üretim sırasında karşılaşılan hataların üç temel mekanizma ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bunlar termal, mekanik ve yazılım olarak kategorize edilebilir. Aynı zamanda bu hataların giderilmesine yönelik yapılabilecek çalışmalara dair öneriler sunulmuştur. Karşılaşılan hataların önemli bir kısmı ekstruder'in performansı ile ilgili olduğu sonuçlarına varılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışmada Kullanılan 3B Yazıcılar

3B FFF yazıcılar maliyetlerine göre değerlendirildiğinde iki farklı sınıfta değerlendirilebilir. Bir grup 3B yazıcı düşük maliyetleri daha çok hobi amaçlı kullanıma yöneliktir. Diğer grup ise maliyeti daha yüksek olmakla beraber daha profesyonel yazıcılardır. Her iki yazıcı türü de benzer karakteristiklere sahip ve aynı alt sistemleri kullanarak üretim yapar. Düşük maliyetli yazıcılar ile profesyonel yazıcılar arasındaki en önemli fark profesyonel yazıcıların daha çok son kullanıcıya hitap etmesidir. Düşük maliyetli yazıcılarda üretim sürecinde, profesyonel yazıcılara oranla daha çok hata ile karşılaşılır. Aynı zamanda üretim kaliteleri de nispeten daha yüksek seviyededir [12].

Profesyonel yazıcıları üreten firmalar genellikle müşterilerine satış sonrası hizmetler sunar ve üretim sorunların azaltılması veya giderilmesi için destek sağlarlar. Profesyonel yazıcılar tak ve kullan mantığı ile tasarlanmışlardır. Profesyonel yazıcılarda kullanıcı, üretim öncesinde temel bazı parametreleri ayarladıktan sonra üretim sürecine müdahale edemez. Düşük maliyetli yazıcılar çoğunlukla kit halde satılır. Bu yazıcılarda genellikle satış sonrası hizmet sunulmaz. Kullanıcılar bir sorunla karşılaştığında ya kendi deneyimleriyle ya da internet üzerindeki topluluklardan bilgi alarak

çözüm üretmeye çalışırlar. Özellikle RepRap projesinin internet üzerinde organize olan topluluğu ile birlikte düşük maliyetli 3B yazıcılar büyük bir hızla yaygınlaşmıştır [13]. Düşük maliyetli ve profesyonel yazıcılar aynı alt sistemleri kullanırlar. Örneğin her iki yazıcı türünde kullanılan ekstruder'lar genel yapı olarak benzerdir. Ancak profesyonel yazıcılarda bulunan ekstruderlar daha iyi performans sunmaktadır. Üretim sorunları açısından değerlendirildiğinde profesyonel yazıcılarda daha az üretim sorunuyla karşılaşılrsa da çalışmada tespit edilen hatalarla karşılaşmaktadır. Çalışmalar sırasında Mendel, Tevo, Anet olmak üzere üç farklı düşük maliyetli ve Ender 3 Pro ve Zortrax M200 olmak üzere iki, toplamda beş farklı 3B FFF yazıcı kullanılmıştır. Bu yazıcıların özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Düşük maliyetli yazıcılarda açık kaynaklı dilimleyici yazılımlar kullanılabilir. Buna karşılık profesyonel yazıcılarda ise kendilerine özgü dilimleyici yazılımlar kullanılmaktadır. Ürün kalitesi açısından bakıldığında teorik olarak düşük maliyetli yazıcılar ile, profesyonel yazıcılara yakın kalitede üretim yapılabilir. Her iki yazıcı türünde de benzer donanımlar benzer görevleri yerine getirmektedir. Ancak bu durum kullanıcının deneyim ve yeteneklerine bağlıdır. Benzer şekilde her iki yazıcı türünde de birbirine yakın üretim sorunlarıyla karşılaşmaktadır.

2.2. Çalışmada Kullanılan Dilimleyici Yazılımlar

Dilimleyici yazılımlar, 3B dijital modelin yazıcı donanımının kontrol edilebileceği belirli talimatlara dönüştürülmesi için kullanılan yazılımlardır. Bilgisayar destekli tasarım programı ile elde edilen STL formatındaki dijital bir model, dilimleyici yazılım ile G-Kod'a dönüştürülür.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan düşük maliyetli 3B yazıcılar.

Parametre	Mendel	Tevo	Anet	Ender 3 Pro	Zortrax
Baskı Alanı (mm)	200x200x150	200x200x150	200x200x200	200x220x220	200x200x180
Baskı Hızı (mm/s)	50	130	100	150	100
Nozul Sıcaklığı (°C)	240	250	240	260	290
Nozul Çapı (mm)	0,2-1,0	0,4 / 0,6 / 0,8	0,4 / 0,6	0,4	0,4
Katman Kalınlığı (µ)	150 – 400	150 – 400	120 – 300	100 – 400	90 – 400
Tabla Sıcaklığı (°C)	Isıtma yok	100	105	110	105
Filament Çapı (mm)	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75

Hatalı STL dosyalarından imal edilecek bir parçada geometrik tutarsızlık ve düşük hassasiyet gibi hataların olması kaçınılmazdır [14]. STL dosyalarından kaynaklanan üretim hataları bu çalışmada yazılım hataları kategorisine dahil edilmiştir.

Dilimleyici yazılım önce nesneyi bir düz katman yığını olarak kesitlere ayırır. Her bir kesit bir katmanı ifade eder. Daha sonra bu katmanların 3B yazıcı üzerinde hareketli olan tabla veya ekstruder'ın doğrusal hareketlerini sağlayacak G-Kod'unu üretir. Hareket kodlarının yanı sıra 3B yazıcının üzerinde bulunan fan, ısıtıcı ve diğer sensörlerin bir arada uyumlu şekilde çalışacağı kodlar da bu dosyaya eklenir.

“Cura”, “Slic3r” ve “Repetier” gibi açık kaynak kodlu dilimleyici yazılımların yanı sıra “Simplify3D” ve “Z-Suite” gibi profesyonel dilimleyici yazılımları bulunmaktadır. Bütün dilimleyici yazılımlar benzer özellikleri barındırırlar ve hepsi yazıcılar için G-Kod'u üretirler. Fakat aynı modele ait farklı dilimleyici yazılımlarla üretilmiş G-Kod'unda tabla veya ekstruder hareketleri dilimleyici yazılımlara göre farklılık gösterebilir. Buna rağmen bütün dilimleyici yazılımlarda ortak nokta olarak üretim sürecine etkisi olan; doluluk oranı,

katman kalınlığı, üretim hızı ve dolgu tipi gibi parametrelerin ayarlanmasına olanak verir. Çalışmada profesyonel bir yazılım olan “Simplify3D” ve açık kaynak kodlu “Repetier” dilimleyici yazılımları kullanılmıştır. Her iki dilimleyici yazılımda da belirlenmesi gereken temel parametreler benzeşmektedir.

3. BULGULAR

3B FFF yazıcılarda üretim sırasında sık karşılaşılan yirmi bir temel üretim sorunu tespit edilmiştir. Bu sorunlar yazıcının ekstruder, mekanik donanım ve yazılım olmak üzere üç temel yapısı ile ilişkilidir (Çizelge 2).

Ekstruder yazıcıdaki ekstrüzyonun gerçekleştiği bölgedir ve termal etkilerin en önemli olduğu kısımdır. Yazıcının mekanik donanımları; motorlar ve hareketi ileten sistemleri içerir. Çizelgede bu yapılar ile ilgili sorunlar mekanik sütunu altında sunulmuştur.

Yazılım sütununda ise üretim parametrelerinin belirlendiği dilimleyici yazılımlar ile ilgili sorunlar görülmektedir. Çalışmada tespit edilen üretim sorunları incelendiğinde ekstruder ile ilgili on dört sorun tespit edilmiştir. Yazıcının hareket mekanizmaları ve motorları gibi mekanik donanımıyla ilgili olabilecek dokuz sorun tespit edilmiştir.

Çizelge 2. 3B Yazıcılarda karşılaşılan sorunların sınıflandırılması.

Üretim Sorunu	Ekstruder	Mekanik	Yazılım
S1: İlk katman ekstrüzyon sorunları	X	X	
S2: Fazla ekstrüzyon	X		X
S3: Yetersiz ekstrüzyon	X		X
S4: Tutarsız ekstrüzyon	X		X
S5: Ekstrüzyonun yarıda kesilmesi	X	X	
S6: Yüksek sıcaklıkta ekstrüzyon	X		X
S7: Ürün yüzeyinde taşmalar	X	X	
S8: Lif oluşumu	X		X
S9: İlk katmanda adezyon sorunu		X	
S10: Katman kaymaları		X	
S11: Katmanlar arasında ayrılmalar		X	
S12: Termal çarpılmalar		X	
S13: Ölçü hassasiyeti ve tolerans sorunları	X	X	X
S14: Küçük detayların üretim sorunları	X		
S15: Destek yapısı sorunları			X
S16: Filament aşınmaları	X		X
S17: Nozul tıkanması	X		
S18: İç yapı ve dış yüzeyde boşluklar	X		X
S19: Yüzeyde kıvrılma ve pürüzlü köşeler	X		
S20: Yüzeylerde iz oluşumu		X	
S21: Zayıf İç Yapılar			X
TOPLAM	14	9	10

Dilimleyici yazılım ve bu yazılımda kullanılan parametrelerle ilgili olabilecek on sorun tespit edilmiştir. Tespit edilen bu sorunların bazıları yazıcının sadece tek başına ekstruder kaynaklı veya tek başına yazılım gibi alt sistemi ile ilgilidir. Ancak bazı sorunlar birden fazla alt sistemle ilgili olabilmektedir. Tespit edilen yirmi bir sorun; ekstrüzyon sürecinde karşılaşılan sorunlar, katman üretiminde karşılaşılan sorunlar, ekstruder ve tolerans sorunları, yüzey sorunları olmak üzere dört kategoride incelenebilir.

3.1. Ekstrüzyon Sürecinde Karşılaşılan Sorunlar

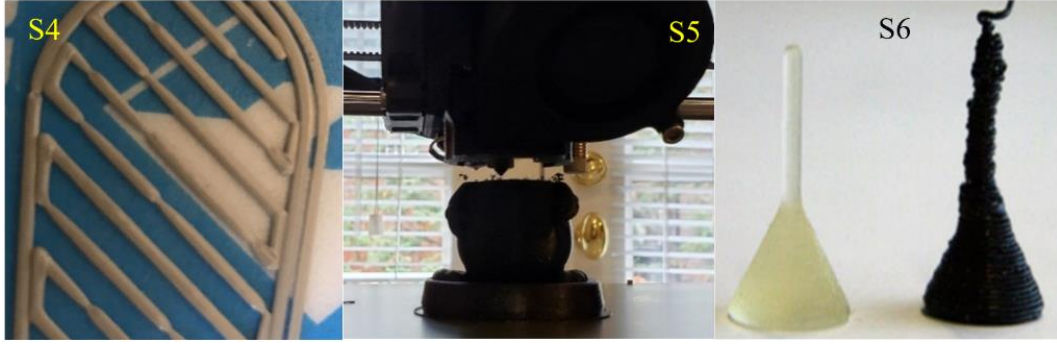
FFF 3B yazıcılar ile üretim yapılırken ekstrüzyonun üretimin her anında çok iyi bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Ekstrüzyon kontrolü yetersiz olduğunda ürünlerde hatalar kaçınılmaz hale gelir [15]. Ekstrüzyon ile ilgili üretim sorunları çoğunlukla ekstruder performansı ile ilgilidir. Ancak ekstruder'in yanı sıra yazıcının diğer donanımları ve dilimleyici yazılım parametreleri de ekstrüzyon hatalarına sebebiyet verebilir. Ekstrüzyon ile ilgili en sık karşılaşılan sekiz hata örneği numaralandırılarak sunulmuştur. Ekstrüzyon ile ilgili karşılaşılan sorunlara dair örnek görseller Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2 S1'de görülen üretim sorunu; yazdırma işleminin başlangıcında ilk katmanların üretimi sırasında yeterli ekstrüzyon olmamasıdır. Şekilde görüldüğü gibi baskı tablasının bir kısmı için yeterli ekstrüzyon gerçekleşirken diğer kısımlarda üretim gerçekleşmemiştir. Bu sorun birkaç nedeni olabilir. Bunlardan biri filamentin nozul bölgesinde bulunmamasıdır. Nozul sıcak durumda boşta bekletilirken içinde bulunan sıcak filament ergiyerek uçtan akma eğilimindedir. Akan filament nozul içinde bir miktar boşluk oluşmasına sebep olur. Baskı almaya başlamadan eğer ön ısıtma yapıyorsa yine benzer durumla karşılaşılabilir.

Bu durum nedeniyle nozul da bulunması gereken miktardan daha az filament kalırsa baskı başlatıldığında bu boşluk giderilene kadar ilk katmanlar oluşturulamayacaktır. Bir diğer neden nozul ve baskı tablası arasındaki mesafenin çok kısa olmasıyla ilgilidir. Eğer nozul baskı tablasının yüzeyine çok yakın ise ekstruder ile sürülen filament burada oluşan basınç nedeniyle nozul'dan çıkamayacaktır. Sorunun bir diğer sebebi ise ekstruder'in tıkalı olmasıdır.

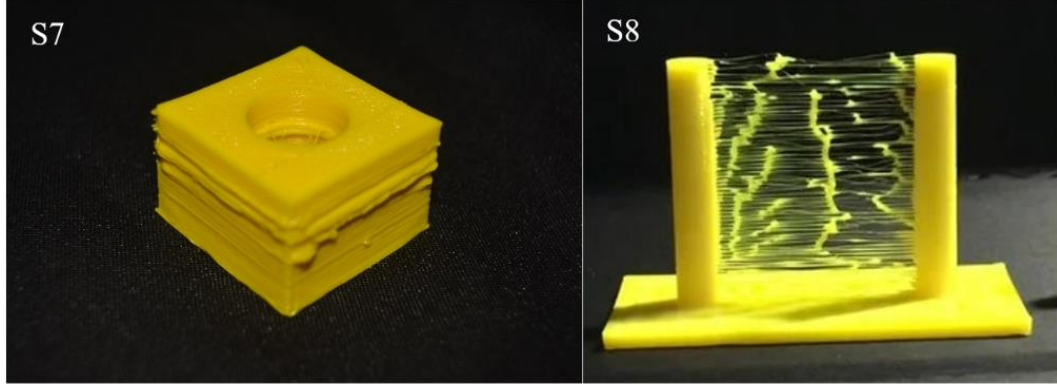
Şekil 2 S2'de ekstruder'in yetersiz, Şekil 2 S3'te ise gereğinden fazla ekstrüzyon yaptığı durumlarda karşılaşılan hata örnekleri görülmektedir. 3B FFF yazıcılar ile yapılan üretimlerde katmanları oluşturacak malzemenin ekstrüzyon miktarı önemlidir. Dilimleme yazılımları filamentin hangi bölgeye ve hangi katmana ne kadar ekstrüzyon yapılacağına dair hesaplamaları yapar ve yazıcının donanımlarını bu parametrelere uygun olarak kontrol eder. 3B FFF yazıcılarda nozul içerisinde gerçekleşen ekstrüzyon sürecinin gerçek durumunun kontrolü yapılamamaktadır [16]. Nozul'un hareketli olması ve nozul'dan çıkan filament miktarının oldukça az olması nedeniyle, üretim sırasında ekstrüzyonu gerçekleştirilen Filament miktarı herhangi bir donanım ile ölçülememektedir. Dilimleyici yazılım filamentin ne kadar gönderileceğine dair teorik bir hesaplama yapar ve buna göre ekstrüzyon işlemi donanımlar tarafından gerçekleştirilir. Ancak yazılımın hesapladığı miktar ile gerçek hayattaki durum her zaman örtüşmeyebilir. Bu nedenle her ne kadar yazılımın yaptığı hesaplamalara uygun miktarda ekstrüzyon yapıldığı öngörülse de bazı durumlarda ekstruder ile alakalı sebeplerden dolayı nozul'dan istenen miktarda ekstrüzyon elde edilemeyebilir. Aynı şekilde bazı durumlarda ise gerektiğinden fazla ekstrüzyon olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 2. Ekstrüzyon ile ilgili karşılaşılan sorunlar: S1: İlk katman ekstrüzyon sorunları, S2: Fazla ekstrüzyon, S3: Yetersiz ekstrüzyon.



Şekil 3. S4: Tutarsız ekstrüzyon, S5: Ekstrüzyonun yarıda kesilmesi, S6: Yüksek ekstrüzyon sıcaklığı.



Şekil 4. Ekstrüzyonun durdurulup tekrar başlatılması sırasında karşılaşılan hatalar: S7: Ürün yüzeyinde taşmalar, S8: Lif oluşumu.

3B FFF yazıcı ile istenen hassasiyette parçalar üretilebilmesi ideal ekstrüzyonun sağlanmasıyla mümkündür. Nozul'dan çıkan plastik miktarının mutlaka tutarlı olması gerekir. Eğer katmanların üretimi sırasında ekstrüzyon farklı miktarlarda oluyorsa ekstrüzyon tutarsızlıkları nedeniyle ürünün kalitesi bu durumdan mutlaka etkilenecektir.

Şekil 3 S4'te tutarsız ekstrüzyonun gerçekleştiği bir örnek görülmektedir. Bu sorunun öncelikli nedeni ekstruder'in filament besleyici adı verilen yapısı ile ilgilidir. Filament besleyicilerde filamentin nozul'a iletilmesi için gerekli sürtünmeyi sağlayan bir mekanizma bulunur. Eğer filamentin sürülmesini sağlayacak yeterli sürtünme oluşmuyorsa nozul'a yeterli miktarda filament iletilmeyecektir. Dolayısıyla tutarlı bir ekstrüzyon sağlanamayacaktır. 3B yazıcı ile üretim yaparken ilk katmanların ekstrüzyonu sorunsuz gerçekleşmesine rağmen, ilerleyen aşamalarda ekstrüzyon aniden durabilir (Şekil 3, S5). Üretim devam ederken hammadde olarak sürülen filament bitmediyse ekstruder'in filament besleyici yapısı kontrol edilmelidir. Nozul sıcaklığı ve filamentin katılma hızı arasında ideal bir dengenin olması ürün

hatalarını azaltacaktır. Eğer bu denge sağlanamazsa ürün hassasiyeti, toleransları ve şekli ile ilgili hatalarla karşılaşmak mümkündür (Şekil 3).

Şekil 4, S7'de ürün yüzeyinde taşmalar ve Şekil 4, S8'de lif oluşumları görülmektedir. 3B baskı sırasında ekstruder baskı tablası üzerinde farklı konumlara hareket ederken boşta gezdiği anda ekstrüzyon işlemi durdurulur. Filamentin eritilmesi ve üretime devam edileceği anda tekrar başlatılır. Filamentin sürekli olarak dökülmesi gerektiği durumlarda birçok ekstruder daha kararlı çalışır ve istenen ekstrüzyonu sağlar. Ancak nozul'un boşta gezdiği ve ekstrüzyonun sürekli durdurulup tekrar çalıştırıldığı durumlarda sapmalar oluşabilir. Özellikle ekstrüzyonun tekrar başladığı anda gerektiğinden fazla malzemenin döküldüğü görülebilir. Bu durumda üretilen parçanın dış yüzeyinde ekstrüzyonun tekrar başladığı anda çıkıntı ve taşmalar oluşabilir. Sık karşılaşılan sorunlardan bir diğeri de istenmeyen liflerin oluşmasıdır. İstenmeyen lifler genellikle ekstruder bir konumdan başka bir konuma hareket ederken nozuldan eriyik haldeki filamentin sızması ile oluşur.

3.2. Katmanların Üretiminde Karşılaşılan Sorunlar

3B FFF yazıcılar katmanların üst üste eklenmesi ile üretim yaparlar. Dolayısıyla her bir katman üretim için oldukça önemlidir. Katmanların oluşumu yazıcının Z ekseninde hareketi ve ekstruder'in uyumlu bir şekilde çalışmasıyla mümkündür. Katmanların üretimi sırasında sık karşılaşılan dört temel sorun tespit edilmiştir. Bu sorunlar ile ilgili örnekler Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

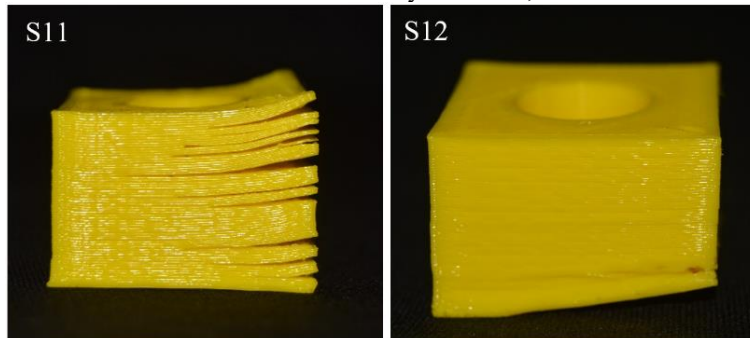
Baskı başlangıcındaki ilk katmanın yazıcının tablasına yeterli güçte yapışması oldukça önemlidir. 3B yazıcılarda ilk katman adezyon sorunu halen üzerinde çalışılan bir konudur [17, 18]. Üretimin ilk katmanların tablaya düzgün bir şekilde yapışması gerekir. Eğer ilk katmanlar tablaya yapışmıyorsa üretimin ilerleyen aşamalarında sorunlara yol açacaktır (Şekil 5, S9). 3B FFF yazıcılar açık döngü kontrol sistemi ile çalışmaktadır. Bu çeşit kontrol sistemlerinde, sistemin mevcut durumuyla alakalı herhangi bir bilgi denetleyiciye geri dönüş olarak gelmemektedir. Elektronik kontrol kartı ekstruder'ı belirli bir konuma göndermek için komutu verir ancak o konuma gidip gitmediğine dair bir kontrol birimi bulunmaz. Ekstruder'ı istediği konuma gitmesini engelleyecek bir engel ya da karşı bir kuvvet olmadığı sürece herhangi bir sorun oluşmaz. Ancak üretim sırasında ekstruder istenen konuma gidemediğinde yazıcının bunu tespit edemez. Dış etkenler veya donanım

sorunları nedeniyle ekstruder konumu istenmeyen bir şekilde değiştiğinde üretilen parçanın katmanlarında kaymalar meydana gelir (Şekil 5, S10).

Her bir katmanın kalitesi bir altındaki katmanın başarılı üretimine dayanır. Tüm katmanların üretimi başarıyla tamamlandığında istenen parça üretilmiş olur. Ancak ürünün dayanıklı ve hatasız olması için her katmanın diğer katmanlarla güçlü bir şekilde adezyonu gereklidir. Eğer katmanların adezyonu yeterli değilse ürünün bazı bölgelerinde ayrılmalar meydana gelir (Şekil 6, S11). Burada görülen üretim sorunu katman dilimleyici yazılımda belirlenen katman yüksekliği ile ilgili olabilir. Katman yüksekliği gereğinden fazla ise parçada ayrılmalar oluşabilir. 3B FFF yazıcılar üretimlerde ilk katmanlar baskı tablasına yeterli bir şekilde yapışmasına rağmen ilerleyen zamanlarda parçanın kıvrılmaya ve deforme olmaya başlaması görülebilir. Bu deformasyonlar bazen aşırı fazla olabilir ve hatta parçanın bir kısmı baskı tablasından ayrılabilir (Şekil 6, S12). Parçadaki bu deformasyonlar üretilen malzemedeki termal gerilmeler sonucunda meydana gelmektedir. Termal gerilmeler eklemeli imalatta kullanılan plastiklerin sıcaklık değişimine göre büzülme veya genleşme durumları ortaya çıkarmaktadır. Özellikle ABS gibi yüksek sıcaklıklarda işlem gören termoplastiklerde bu sorunla daha sık karşılaşılır [19].



Şekil 5. Katman hataları: S9: İlk katman adezyon sorunu, S10: Katmanlarda kaymalar.



Şekil 6. Katmanları arası problemler S11: Katmanlar arası ayrılmalar, S12: Termal çarpılmalar.

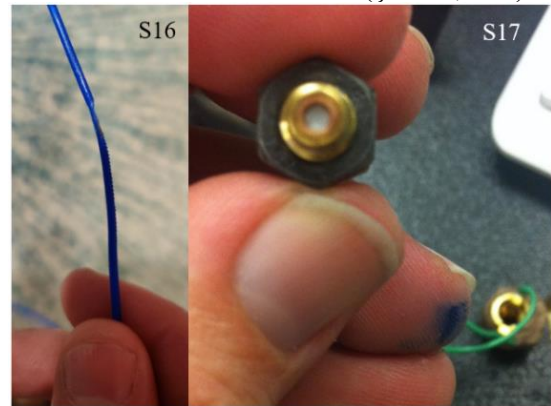


Şekil 7. Ekstruder ve tolerans sorunlarıyla ilgili parça örnekleri: S13: Ölçü tolerans hataları, S14: Küçük detayların üretim sorunları, S15: Destek yapılarla ilgili sorunlar.

3.3. Ekstruder ve Tolerans Sorunları

Parça boyutu ile ilgili üretim sorunları yazıcının hassasiyeti, donanım özellikleri, ekstruder tasarımı ve destek yapılar ile ilgilidir. Şekil 7’de ölçü toleransları, küçük detayların üretim sorunları ve destek yapıların sebep olduğu üretim sorunlarına dair örnekler görülmektedir. Şekil 7 S3’te üretilen parçaların toleranslarının yeterli olmadığı bir durum görülmektedir. Üretilecek olan parçanın kalınlığı dijital modelde 20 mm olarak belirlenmesine rağmen üretilen parça 19.37 mm kalınlıktadır. Örneği sunulan bu durum yetersiz ekstrüzyon sonucunda meydana gelmektedir. Ekstruder, 3B dijital modele uygun şekilde parçanın gerekli yerlerinde, belirtilen miktarda ekstrüzyon yapmak zorundadır. Ekstruder olması gerekenden az veya çok filamenti dökerse parça ölçüleri 3B dijital modelden farklı olacaktır. Yazıcının motor ve hareket mekanizmalarının sahip olduğu hassasiyetler de parça toleranslarına etki eder. Örneğin yazıcının eksen hareketlerini gerçekleştiren motorun adım sayısı 400 ise, motor bir tam tur dönüşünü 400 adımda tamamlar. Bu durumda bir adımın açısı $360/400 = 0.9$ derecedir. Bir devirdeki adım sayısı yükseldikçe step motor hassasiyeti ve dolayısıyla maliyeti artar. Dolayısıyla 3B yazıcılarda üretilen ürünün geometrik doğruluğu yazıcıda kullanılan step motorların hassasiyetiyle de ilgilidir. Üzerinde boşluklar bulunan parçaların 3B FFF yazıcılar ile üretimi nispeten zordur (Şekil 7, S14). Katmanlar 45° kadar olan açılarda altında boşluk olacak kadar üretilir. Ancak 45° açı arttığında katmanın altında kalan boşluk nedeniyle üretilmez. Bu durumda destek yapılardan faydalanmak gerekir. Destek yapıların üretimi ve temizlenmesi sonrasında parçanın toleranslarında sapmalar oluşabilir (Şekil 7, S15). Üretim öncesinde baskı yönünün optimize edilmesi ile parçanın yüzey kalitesini

artırmak mümkündür [20]. 3B FFF yazıcılarda filament, besleyici yardımıyla sürülerek nozul’a iletilir. Filamentin sürülebilmesi için ekstruder dişlilerinde gerekli sürtünmenin sağlanması gerekir. Bu sürtünme filamenti bir tahrik dişlisi ve karşısındaki bir yatak arasına sıkıştırarak elde edilir. Filamentin ileri veya geri hareketi tahrik dişlisinin dişlerinin filamenti kavramasıyla sağlanır. Filamentin hareketini kontrol eden bir sensör yoktur. Dolayısıyla filament ilerlese de ilerlemese de tahrik dişlisi dönmeye devam eder. Filamentin ilerleyemediği durumlarda dişli filamenti aşındırmaya başlar (Şekil 8, S16). Filament eğer aşırıya ekstrüzyon için olması gerekenden daha az filament iletilmesine neden olabilir. Bununla birlikte eğer filament çok fazla aşırıya besleyici filamenti süremez hale gelebilir. Böyle bir durumda ise üretim yarıda kesilecek ve parça üretilmez hale gelecektir. 3B FFF yazıcılar ömrü boyunca binlerce metre filament üretir. Bu yazıcılarda 0.2, 0.4 mm gibi küçük çaplı nozul’ları ile üretim yapılır. Üretim sırasında nozul’ların sıcaklıkları sürekli değişir. Kaçınılmaz olarak sıcaklık değişimleri ve küçük çaplar ile çalışılması nozul’larda sık sık problemlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Yazıcılarda en sık karşılaşılan problemlerden biri nozul’larının tıkanmasıdır (Şekil 8, S17).



Şekil 8. S16: Filament aşınmaları, S17: Nozul tıkanması.

Nozul tıkanmaları filamentin serbest bir şekilde akmasını engeller ve üretimin yapılamamasına neden olur. Literatürde, üretim sırasında yüksek hızlı kameralar, çeşitli yazılımlar ve geliştirilen algoritmalar yardımıyla nozul tıkanmalarının gerçek zamanlı olarak tespit edilebileceği gösterilmiştir [21]. Ancak bu çalışmalar henüz laboratuvar ortamında deneysel olarak gerçekleştirilmektedir. Henüz verimli olarak üretim esnasında nozul durumunu gerçek zamanlı olarak görüntüleyen ve gerektiğinde üretime müdahale edebilecek bir sistem geliştirilememiştir.

3.4. Ekstruder ve Tolerans Sorunları

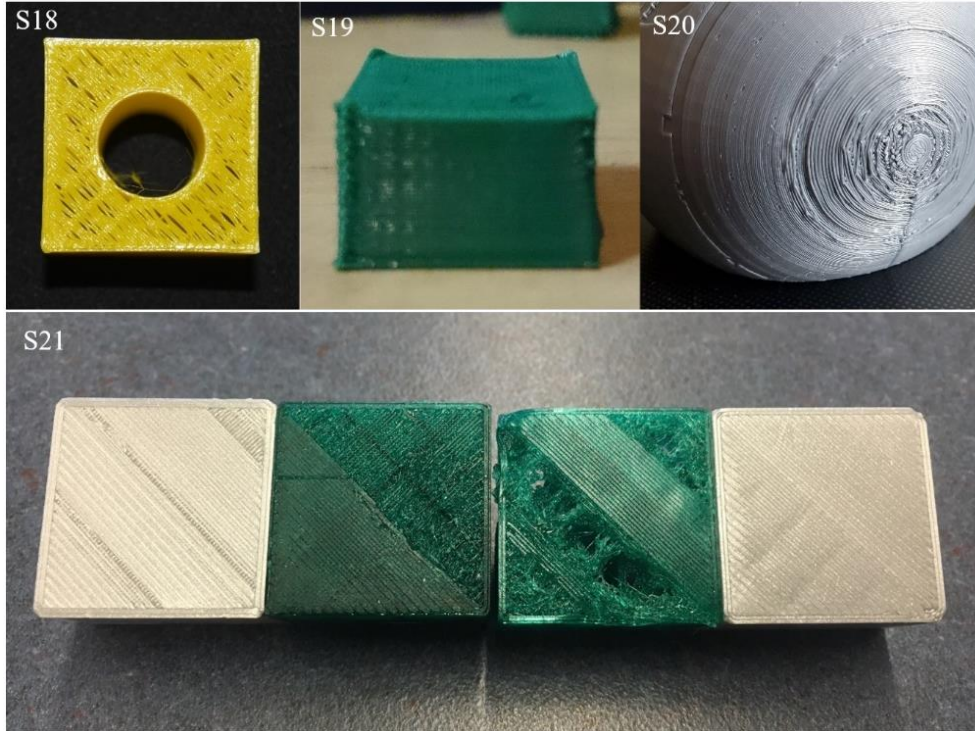
3B yazıcılar ile üretilen parçanın her bir katmanı dış kabuk ve boşluklu olan iç yapı dolgusunun bileşimi olarak üretilir. Dış kabuğu oluşturan katman parçanın dış yüzeyinin dayanıklı ve hassas ölçülerde olmasını sağlar. Dış kabuğun içinde kalan dolgu yapısı ise sadece dış kabuğu destekleyecek yoğunlukta üretilir. Dolayısıyla iç yapı dolgusu esasen üretim hızını artıracak şekilde tasarlanır.

Dış kabuk ve iç dolgunun üretimi sırasında farklı geometrik desenler kullanılarak üretilir. Farklı geometrik desende üretilen bu iki yapının birbirine iyi bir şekilde yapışması önemlidir (Şekil 9, S18).

İç dolgu yapıları bal peteği, ızgaralar, çizgiler veya altıgenler gibi karmaşık geometrilerden oluşabilir. Ürün kalitesi için dolgu deseni ve benzeri parametreler ürün kalitesine doğrudan etki eder ve parçanın durumuna göre iç dolgu deseninin optimize edilmesi gerekir [22].

3B yazıcılar ile üretilen parçaların özellikle üst katmanlarında kıvrılmalar ve çarpılmalar gözleniyorsa bu problem genellikle filamentin yüksek sıcaklıkta ekstrüzyonu ile ilgilidir. Yüksek sıcaklıkta eritilen filament yeterli hızda soğutulmuyorsa şeklini koruyamaz ve termal gerilmeler karşısında çarpılır (Şekil 9, S19). Bu sorun daha çok keskin köşeleri olan parçaların üst köşelerinde görülür.

3B FFF yazıcılar ile üretilen parçaların yüzeylerinde bazen dalgalara benzer desenlere sahip çeşitli yüzey hataları oluşabilmektedir (Şekil 9, S20 ve S21). Bu tip yüzey hataları genellikle yazıcıda oluşan titreşimlerle ilgilidir [23]. Özellikle ekstruder'ın köşelerin üretimi sırasında olduğu gibi ani konum değişimi gerçekleştirdiği durumlarda titreşimler artabilir. Titreşimlere paralel olarak dalgalanma şeklinde görülen yüzey hatalarının daha sık görülmesi mümkündür.



Şekil 9. S18: Yapıda boşluklar, S19: Köşelerde kıvrılmalar, S20: Yüzeyde izler, S21: Zayıf iç yapı.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada malzeme ekstrüzyonu yöntemini kullanan 3B yazıcılarda karşılaşılan sorunlar değerlendirilmiştir. Tespit edilen sorunlar malzeme ekstrüzyonu yöntemini kullanan yazıcıların tümü için geçerlidir. Bu tür üretim problemleri düşük maliyetli yazıcılarda daha sık karşılaşılmakla beraber yüksek maliyetli profesyonel yazıcılarda da önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. 3B yazıcılarda üretim sırasında sık karşılaşılan yirmi bir temel üretim sorunu tespit edilmiştir. Bu sorunlar 3B yazıcılarla yapılan üretim sırasında ürünü fonksiyonel olarak kullanılamaz hale getiren veya üretimi engelleyen sorunlardır. Çalışmada tespit edilen her bir üretim sorunu detaylı görseller ile sunulmuş, sorunun sebeplerine dair bilgiler verilmiş ve bazı çözüm önerileri tavsiye edilmiştir. Çalışmada tespit edilen sorunlar yeni 3B yazıcı tasarımları için temel oluşturma potansiyeline sahiptir.

Tespit edilen önemli üretim sorunlarından biri 3B FFF yazıcıların ekstruder'ı ile ilgilidir. Çalışmada ekstruder kaynaklı on dört sorun tespit edilmiştir. Ekstruder kaynaklı üretim sorunlarının azaltılabilmesi için ekstruder içinde filamentin sıcaklığının iyi kontrol edilmesi gerekir. Literatürde nozul içerisindeki akışın modellendiği çalışmalar bulunmaktadır [24, 25]. Aynı zamanda ekstruder üzerinde bulunan bazı parçaların ekstruder'ın genel termal davranışı üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır [8, 24]. Yapılan çalışmada tespit edilen sorunların azaltılabilmesi için mevcut ekstruder'lar iyileştirilebilir veya yeni ekstruder tasarımları geliştirilebilir [27]. Ekstruder'ın genel tasarımının iyileştirilmesiyle ekstruder kaynaklı üretim sorunları azaltılabilir.

Çalışmada 3B FFF yazıcıların mekanik donanımlarıyla ilgili olabilecek dokuz sorun tespit edilmiştir. Yazıcıda daha kaliteli ve konumlama hassasiyeti yüksek step motorların kullanılmasıyla bu çalışmada örnekleri sunulan yazıcı donanımlarıyla ilgili üretim sorunları azaltılabilir. Yazıcıda daha kaliteli ve hassas motorların kullanılması yazıcının toplam maliyetini artıracaktır. Bununla birlikte yüksek hassasiyet ve kalitedeki motorların kullanımı 3B FFF yazıcıların en önemli sorunlarından biri olan üretim hızını artırma imkânı da sunacaktır [28].

3B FFF yazıcılarda karşılaşılan üretim sorunlarının önemli bir kısmı yazıcının donanımlarıyla ilgili olmasına rağmen yazıcılarda kullanılan yazılımlar da bazı önemli üretim sorunlarına neden olabilmektedir. Üretimi yapılacak parçanın dijital modellerinin hatasız olması üretim sırasında karşılaşılabilecek hataların da azaltılmasına yardımcı olacaktır [14]. Literatürde 3B FFF yazıcıların üretim hızının artırılması amacıyla takım yolu optimizasyonuna yönelik bazı çalışmalar bulunmaktadır [29]. Nozul hareket yollarının üretim sorunları açısından değerlendirilerek optimize edilmesi üretim sorunlarının azaltılmasına yardımcı olacaktır. Bu anlamda üretim sorunlarının azaltılabilmesi için çok disiplinli çalışmalar önem kazanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından 17.FEN.BİL.75 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Dilberoglu, U.M., Gharehpapagh B., Yaman U., and Dolen M., "The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, Vol. 11, Pages 545–554, 2017.
2. Yuran, A. F., Yavuz, İ. "Endüstri 4.0 ve 3 Boyutlu Yazıcıların Karşılaştırılması", *Mühendis ve Makina*, Cilt 62, Sayı 704, Sayfa 580-606, 2021.
3. Kartal, F., "Taguchi Metodolojisi ile Eriyik Yiğma Modelleme Süreci Parametrelerinin Optimizasyonu", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 1, Issue 1, Pages 49–56, 2017.
4. Evlen, H., Özdemir M. A., Çalışkan A., "Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri" *Journal of Polytechnic*, Vol. 22, Issue 4, Pages 1031–1037, 2019.
5. Wang, P., Zou, B., Ding, S., "Modeling of surface roughness based on heat transfer considering diffusion among deposition filaments for FDM 3D printing heat-resistant resin" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 161, 2019.
6. Bögrekci, İ., Demircioğlu P., Sucuoğlu H.S., 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*, Vol. 3, Issue 3, Pages 212–219, 2019.

7. Horvath, J., "A Brief History of 3D Printing, Master 3D Printing", Pages 3–10, Apress, California, 2014.
8. Geng, P., Wu, W., Ye, W., Wang, Y., Wang, S., Zhang, S., "Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament", *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 37, Pages 266–273, 2019.
9. Yuran, A. F., Yavuz I., "Effect of Heat Break Geometry on the Thermal Performance of A 3D Printer Extruder", *International Journal of Scientific and Technological Research*, Vol. 6, Issue 12, Pages 41–50, 2020.
10. Scopigno, R., Cignoni, P., Pietroni, N., Callieri, M., Dellepiane, M., "Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey", *Computer Graphics Forum*, Vol. 36, Issue 1, Pages 6–21, 2017.
11. Aydin, M., Yildirim, F., Çantı, E., Ferdi, H., "Farklı Yazdırma Parametrelerinde PLA Filamentin İşlem Performansının İncelenmesi", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 3, Issue 2, Pages 102–115, 2019.
12. Sljivic, M., Pavlovic, A., Ilic, J., Stanojevic, M., Todorovic, S., "Comparing the accuracy of professional and consumer grade 3D printers in complex models production," *FME Transactions*, Vol. 45, Issue 3, Pages 348–353, 2017.
13. Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Irvani, P., Olliver, P., Palmer, C., Bowyer, A., "Reprap - The replicating rapid prototyper", *Robotica*, Vol. 29, Issue 1, Pages 177–191, 2011.
14. Duman, B., Kayacan, M. C., "The defects of STL files which are used in additive manufacturing and their fixing methods", *International Symposium on 3D Printing Technologies (3D-PTS)*, Pages 156–162, Istanbul, Mayıs, 2016.
15. Yardimci, A., Hattori, T., Gucer, S.I., Danforth, S.C., "Thermal analysis of fused deposition", *International Solid FFF Symposium*, Pages 689–697, Texas, 1997.
16. Tlegenov, Y., Hong, G. S., Lu, W. F., "Nozzle condition monitoring in 3D printing", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 54, Pages 45–55, 2018.
17. Bhavsar, P., Sharma, B., Moscoso, K.W., Madhavan, V., "Detecting first layer bond quality during FDM 3D printing using discrete wavelet energy approach", *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, Pages 718-724, 2020.
18. Roper, D.M., Kwon, K.A., Best, S.M., Cameron, R.E., "The 3D Printing of Freestanding PLA Thin Layers and Improving First Layer Consistency through Introduction Sacrificial PVA", *Applied Sciences*, Vol. 11, Issue 14, Pages 6320, 2021.
19. Yu, N., Sun, X., Wang, Z., Zhang, D., Li, J., "Effects of auxiliary heat on warpage and mechanical properties in carbon fiber/ABS composite manufactured by FDM", *Materials & Design*, Vol. 195, Pages 108978, 2020.
20. Wang, W.M., Zanni, C., Kobbelt, L., "Improved surface quality in 3D printing by optimizing the printing direction", *Computer Graphics Forum*, Vol. 35, Issue 2, Pages 59–70, 2016.
21. Nuchitprasitchai, S., Roggemann, M., Pearce, J.M., "Factors effecting real-time optical monitoring of fused filament 3D printing", *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 2, Issue 3, Pages 133–149, 2017.
22. Fernandez, M., Calle, W., Ferrandiz, S., Conejero, A., "Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing", *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 3, Pages 183–192, 2016.
23. Nienhaus, V., Smith, K., Spiehl, D., Dörsam, E., "Investigations on nozzle geometry in fused filament fabrication", *Additive Manufacturing*, Vol. 28, Pages 711 – 718, 2019.
24. Kam, M., Saruhan, H., İpekçi, A., "Investigation The Effects Of 3D Printer System Vibrations On Mechanical Properties Of The Printed Products", *Düzce Universites Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Vol. 7, Issue 2, Pages 109–119, 2019.
25. Serdeczny, M.P., Comminal, R., Mollah, M.T., Pedersen, B., Spangenberg, J., "Numerical modeling of the polymer flow through the hot-end in filament-based material extrusion additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, Vol. 36, Pages 101454, 2020.
26. Jerez, M.R., Travieso, R.J., Corbella, X., Gómez, G., "Finite element analysis of the thermal behavior of RepRap 3D printer liquefier", *Mechatronics*, Vol. 36, Pages 119–126, 2016.
27. Güler, B., Çetinkaya, K., "Endüstriyel Boyutlu Çift Başlı Kartezyen Tipi Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı Ve Prototip Üretimi", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol 2, Issue 2, Pages 11–22, 2018.

28. Go, J., Schiffres, S.N., Stevens, A.G., Hart, A.J., “Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design”, *Additive Manufacturing*, Vol. 16, Pages 1-11, 2017.

29. Volpato, N., Zanotto, T.T., “Analysis of deposition sequence in tool-path optimization for low-cost material extrusion additive manufacturing”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 101, Pages 1855 – 1863, 2019.