



Endüstri 4.0 ve 3 Boyutlu Yazıcıların Karşılaştırılması

Ahmet Fatih Yuran¹, İbrahim Yavuz^{2*}

ÖZ

Endüstri devrimi olarak bilinen üretim teknolojilerinde yaşanan üç devrimsel gelişme toplumu önemli ölçüde etkilemiştir. Bu devrimler; ilk makinelerin hayatımıza girmesi endüstri 1.0, elektriğin üretim araçlarında kullanımı endüstri 2.0, otomasyonun yaygınlaşması endüstri 3.0 olarak tanımlanabilir. Günümüzde ise 3B yazıcılar ile birlikte endüstri 4.0 tartışılmaktadır.

Bu çalışmada endüstri 4.0 yolunda önemli bir yeri olan 3B yazıcılar üzerine kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Mevcut 3B yazıcı teknolojileri hakkında derlenen bilgiler sunulmuştur. 2015 ve 2020 yılları arasında 3B yazıcılarla yapılmış olan dikkat çekici çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde 3B yazıcıların; otomotiv, biyomedikal, uzay ve havacılık gibi alanlarda öne çıktığı görülmektedir. Gelecekte önemli yer tutacak olan 3B yazıcı teknolojileri başlı başına bir çalışma konusu olmanın yanı sıra farklı disiplinlerdeki araştırmacılar için önemli bir araç olacaktır.

Anahtar Kelimeler: 3 B yazıcı teknolojileri, eklemeli imalat teknolojileri, lazer teknolojisi, 3-D eklemeli imalat yöntemi, endüstri devrimi

Industry 4.0 and Comparison Of 3D Printers

ABSTRACT

Three revolutionary developments in production technologies known as the industrial revolution have significantly affected the society. These revolutions; The introduction of the first machines into our lives can be defined as industry 1.0, the use of electricity in production tools as industry 2.0, and the widespread use of automation as industry 3.0. Today, industry 4.0 is discussed with 3D printers.

In this study, a comprehensive evaluation has been made on 3D printers, which have an important place in the industry 4.0 road. Compiled information about current 3D printing technologies is presented. Examples of remarkable work done with 3D printers between 2015 and 2020 are presented.

When the studies are evaluated, 3D printers; It is seen that it stands out in areas such as automotive, biomedical, space and aviation. 3D printer technologies, which will take an important place in the future, will be an important tool for researchers in different disciplines as well as being a subject of study in itself.

Keywords: 3D printer technologies, additive manufacturing technologies, laser technology, 3-D additive manufacturing method, industrial revolution.

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 06.04.2021

Kabul/Accepted : 16.07.2021

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü
fatihyuran@aku.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2105-2614

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü
iyavuz@aku.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4480-2342

EXTENDED ABSTRACT

Introduction/ Background

Industry, with its role involving automated production processes, is the most critical part of the economy. Technological leaps in the 18th, 19th, and 20th centuries led to paradigm shifts formerly known as “Industrial Revolutions.” Throughout history, there have been three main revolutions in the industry. The first revolution comes with the steam engine, which leads to mechanization. The second revolution involves mass production with the automation of machines. Moreover, the third revolution begins with the rise of digital technologies like computers, software, the internet, etc. According to the time when it takes place, industrial revolutions are called consecutively 1.0, 2.0, and 3.0.

Industry 1.0 led to the change of production paradigms by mechanization. While production was almost entirely dependent on human resources before, machines started to take the basis of production after this revolution. Industry 2.0 was triggered by the widespread use of electrical energy in manufacturing systems. After this revolution, manufacturing systems were automated, and mass production increased rapidly. Thus, the concept of mass production has replaced the traditional production methods involving craftsmanship. With mass production, many products can be produced in a much shorter time than before. Industry 3.0 began with the incorporation of electronics, computers, and software into manufacturing systems. At the same time, information technologies played an essential role in mass production. With this revolution, computer-controlled machines and new generation technologies have played an inevitable role in production systems.

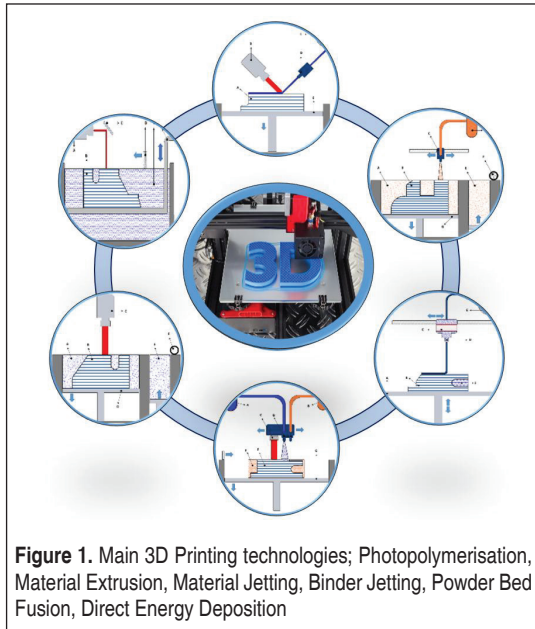


Figure 1. Main 3D Printing technologies; Photopolymerisation, Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Powder Bed Fusion, Direct Energy Deposition

Methods/Methodology

Now we are at the beginning of the fourth industrial revolution. Industry 4.0 has entered our lives after 2010 with concepts such as robotics, 3D printers, nanotechnologies, and the internet of things (IoT). 3D printers are vital manufacturing systems for Industry 4.0. It is possible to produce the most complex parts with 3D printers, which traditional production methods cannot produce. At the same time, 3D printers are more suitable devices for the spirit of Industry 4.0.

Traditional manufacturing systems, known as subtractive manufacturing, involve removing sections of material by machining or cutting it. 3D printers use a process that adding material layer by layer to create an object. This process is often referred to as Additive Manufacturing. There are many different types of 3D printers and technologies that are used for successive adding of layers. The American Society has made the basic definitions and classifications of 3D printers of Testing and Materials. 3D printers produce layers using seven basic principles; Binder Jetting, Direct Energy Deposition, Material Extrusion, Material Jetting, Powder Bed Fusion, Sheet Lamination, Vat Photopolymerization. There are more than twenty different types of printers that use each technique, with slight differences between them. Having such a large number of 3D printer types and different

technologies makes it difficult for engineers to master these manufacturing systems. 3D printers, which will take a crucial role among the future production tools, should be better known by the engineers. The schematic view of 3D printers in different designs is given in Figure 1.

Engineers will encounter more and more 3D printers in the future. This study aims to give brief information about all 3D printer technologies. A comprehensive evaluation has been made on different 3D printer technologies through this review. For this purpose, understandable and straightforward visuals have been prepared to understand the information about the 3D Printers better. The visuals present the basic principles of each 3D printer technology to the reader in an easy way. 3D printer technologies have some pros and cons compared to each other. Each type of 3D printer produces its unique raw materials like metal powders, thermoplastics, ceramics, etc. Figure 2 gives examples of metal printers and different designs. The mechanical properties, chemical properties, and aesthetic properties of the product can vary using a different type of 3D printer with the same raw material. The engineer has to choose the 3D printer technology and the appropriate raw material suitable for the application.



Many researchers predict that we are at the beginning of a new industrial revolution under the name of “Industry 4.0” of the period we live in. One of the most critical technologies in the Industry 4.0 revolution is 3D printers. 3D printers have been used in many sectors, especially in biomedical, automotive, aerospace, and aviation. When 3D printer technologies emerged in the early ‘90s, it was planned to be used for prototyping purposes. By 2020 3D printers are used for both prototypes and final products. This situation shows that 3D printing technologies are on the way to becoming a key concept in Industry 4.0 revolution.

Discussion and Conclusions

In recent years, there are many excellent studies conducted by researchers from different disciplines with 3D printers. In this review, some examples of 3D printer applications made between 2015 and 2020, are presented. When the studies are examined, it is seen that fields such as automotive, biomedical, aerospace, and aviation are the main application areas of 3D printers. More complex, lighter, and customized products can be produced with 3D printers. Therefore, it is understandable that 3D printers are commonly used in these areas where such products and structures are mostly needed.

With Industry 4.0, additive manufacturing is increasing its influence day by day, not only in the manufacturing industry but also in all sectors. It is quite clear that 3D printers will be more significant in every aspect of our daily lives. Developing new 3D printer technologies is a matter of study on its own. Besides, 3D printers are used in niche applications of different research areas. This review article will be an essential start for engineers to know different 3D printing technologies.



1. GİRİŞ

Sanayi veya diğer adıyla endüstri, mekanize ve otomatikleştirilmiş üretim süreçlerini içeren rolü ile ekonominin en önemli parçasıdır. Avrupa’da 18., 19. ve 20. Yüzyıllarda yaşanan teknolojik sıçramalar bugün eski adıyla “endüstriyel devrimler” olarak adlandırılan paradigma kaymalarına yol açmıştır [1]. Endüstride tarih boyunca makineleşme, seri üretim ve dijitalleşme olmak üzere üç ana devrim yaşanmıştır. Birinci endüstri devrimi (Endüstri 1.0) su ve buhar gücünün keşfi ile makineleşmeyi sağlayarak üretimin değişimine yol açmıştır. Daha önce üretim neredeyse tamamen insan gücüne bağılıken bu devrim sonrasında üretimin temelini makineler almaya başlamıştır. İkinci endüstri devrimini (Endüstri 2.0) elektrik enerjisinin kullanım alanının yaygınlaşması tetiklemiştir. Birinci endüstri devriminde ortaya çıkan ve yaygınlaşan makineler, ikinci endüstri devrimi ile birlikte elektrik enerjisi ile çalışma imkânı kazanmıştır. Böylece; sanat ve zanaat içeren eski üretim yöntemlerinin yerini seri üretim kavramı almıştır. Seri üretim ile çok sayıda ürün eskisine göre çok daha kısa zamanda üretilebilmektedir. Üçüncü endüstri devrimi (Endüstri 3.0); üretimde elektronik sistemlerin kullanımı ve bilgi teknolojilerinin üretime dahil edilmesi ile yaşanmıştır. Bu devrim ile birlikte yeni nesil makine ve tezgahlar geliştirilmiş, üretimde otomasyon önem kazanmıştır. Dördüncü endüstri devrimi ya da diğer adıyla Endüstri 4.0 ise robotik, 3B (üç boyutlu) yazıcılar ve nano teknolojilerde yaşanan gelişmeler ve nesnelerin interneti (IoT) gibi kavramlar ile birlikte hayatımıza girmiştir. 3B yazıcılar sahip oldukları potansiyel nedeniyle endüstri 4.0 için hayati öneme sahiptir [2]. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilemeyecek parçaların 3B yazıcılar ile üretilebilmesi mümkündür. Aynı zamanda klasik üretim tezgahlarının sahip olamayacağı kadar dijital üretime yatkın, Endüstri 4.0 ruhuna uygun, cihazlardır.

3B yazıcılarla ilgili ilk ticarileşen patent Charles W. Hull tarafından 1991’de alınmıştır [3]. Stereolitografi (SLA) teknolojisi sıvı bir polimerin ışık ile kürlenmesi esasına dayanır. 1990’lı yılların başlarında S. Scott Crump, Stratasys firması adına Ergimiş Filament Üretimi (FDM) teknolojisini kullanan bir cihaz ile ilgili patent alınmıştır [4]. Yine yakın zamanda hammadde olarak toz malzemeler kullanan Seçici Lazer Sinterleme (SLS) esasına dayanan bir başka cihazın patenti alınmıştır [5]. 1990’ların başında patentleri alınan bu cihazların tamamı bilgisayar ve yazılım destekli üretim sistemleriydi ve öncelikli amaçları prototip üretimiydi. 3B yazıcıların ilk örnekleri olan bu çalışmalar endüstrinin farklı kollarında daha çok kullanılmaya ve yıllar içinde daha çok talep görmeye başladı. Özellikle medikal [6], otomotiv [7], uzay [8] ve havacılık [9] gibi alanlarda 3B yazıcılar her geçen gün çok daha fazla kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada mevcut 3B yazıcı teknolojileri üzerine kapsamlı bir derleme yapılmıştır. 3B yazıcı teknolojilerinin çalışma prensipleri açıklanmış ve birbirleri arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. 3B yazıcı teknolojilerinin her biriyle ilgili 2015 – 2020 yılları

arasında yapılan önemli çalışmalardan örnekler sunulmuştur. 3B yazıcı teknolojilerinin gelecekteki durumuna yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

2. 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ

3B yazıcıların tamamı malzemelerin katmanlar halinde birbirine eklenmesi prensibine göre üretim yapar. Ancak katmanların birbirine eklenmesi sürecinde farklı teknikleri ve malzemeleri kullanan yazıcı türleri vardır.

Tablo 1. 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojileri ve Malzeme Türleri

İşlem Kategorileri	Teknoloji	Malzeme
Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)	Mürekkep Püskürtme (Ink Jetting) S Print M Print	Metal Polimer Seramik
Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)	Doğrudan Metal Biriktirme (Direct Metal Deposition) Lazer Biriktirme (Laser Deposition) Lazer Consolidation Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Direct Melting)	Metal Tozları Tel Metal
Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)	Ergimiş Filament Üretimi (Fused Deposition Modelling) Ergimiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication)	Polimer
Malzeme Jeti (Material Jetting)	Çoklu Püskürtme (Polyjet) Mürekkep Püskürtme (Ink Jetting) Thermojet	Fotopolimer
Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion)	Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering) Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting) Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Melting)	Metal Polimer Seramik
Sac Laminasyon (Sheet Lamination)	Tabakalı Nesne Üretimi (Laminated Object Manufacturing) Ultrasonik Katmanlı Üretim (Ultrasonic Consolidation)	Metal Seramik
Fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization)	Stereolitografi (Stereolithography) Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing)	Fotopolimer Seramik

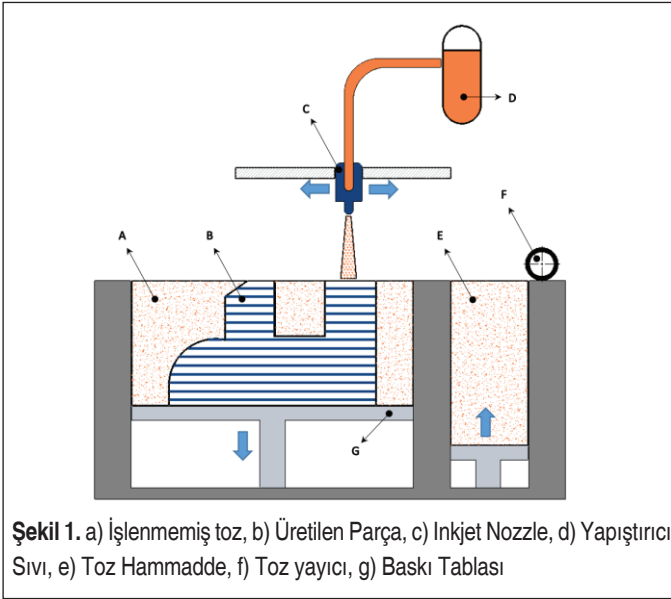
3B yazıcılar ile ilgili temel tanımlar ve sınıflandırmalar American Society of Testing and Materials (ASTM) tarafından yapılmıştır [10]. ASTM'nin işlem süreçlerini, teknolojileri ve bu teknolojilerle kullanılabilen malzemeler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tabloda 1'den de görüldüğü gibi 3B yazıcıların kullandığı işlem kategorilerini 7 ana başlıkta incelemek mümkündür. Bu ana teknolojiler; Binder Jetting, Direct Energy Deposition, Material Extrusion, Material Jetting, Powder Bed Fusion, Sheet Laminations, ve Vat Photo-Polymerization olarak adlandırılır.



2.1 Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)

Massachusetts Institute of Technology (MIT)'de yapılan çalışmalarla keşfedilmiş bu teknoloji "3D Printer" adıyla patentlenmiştir. Binder Jetting (BJ) 3B yazıcılar genel olarak ince toz hammaddenin üzerine bir yapıştırıcı kimyasal uygulamasıyla katmanların oluşturulduğu teknolojidir [11]. Seramik esaslı veya metal tozları hammadde olarak kullanılabilir [12]. Yazıcının nozul'ları baskı tablası üzerinde hareket ederek toz partiküllerinin üzerine kimyasal yapıştırıcı damlacıklarını püskürtür. Katmanın üretimi tamamlandığında baskı tablası "z" ekseninde katman kalınlığı kadar aşağıya iner ve diğer katmanın üretimi başlar. Bütün katmanların üretimi tamamlandığında ürünün tamamlanabilmesi için son işlem (post-processing) yapılması gerekir.

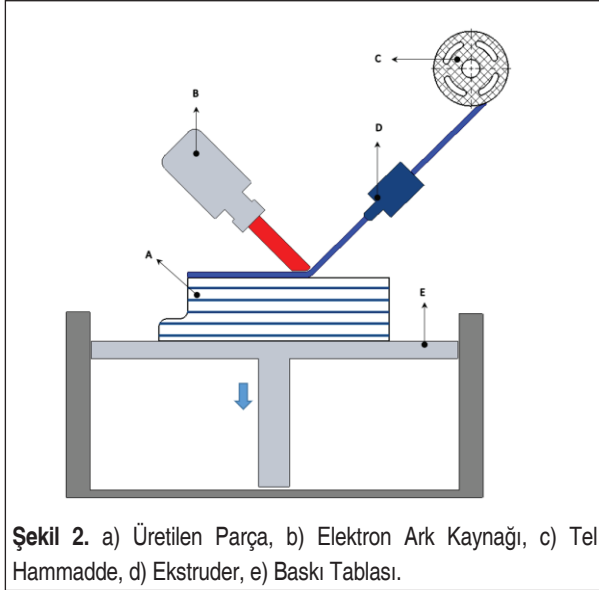


Son işlemler, üretim sırasında kullanılan malzemeye göre bazı durumlarda endüstriyel bir fırında fırınlama veya başka bir malzemenin ürüne emdirilmesi işlemlerini içerebilir [12]. Ürünlerin renklendirilmesi için akrilik veya başka bir kaplama işlemi de gerekebilir. BJ 3B yazıcıdan çıkan ürünlerin porozitesi yüksektir ve dolayısıyla mekanik özellikleri oldukça zayıftır. Uygulanan son işlemler ile ürünün porozitesi azaltılır ve mekanik özellikleri nispeten iyileştirilir. BJ 3B yazıcılar ile yapılan üretim oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Katmanların veya hammaddenin birbirine bağlanması için ısıtma işlemi gerekmez. Bu nedenle FDM, SLS veya DMSL gibi sıcaklık nedeniyle üründe çarpılmalar meydana gelmez. Bütün 3B yazıcı türleri arasında BJ 3B yazıcıların üretim hacmi en fazla olanıdır. 2200 x 1200 x 600 mm'e kadar büyüklükte ürünlerin üretilmesi mümkündür. Bu boyutlar aynı baskı tablası üzerinde çok sayıda ürün üretimine de imkân tanır.

2.2 Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)

Doğrudan enerji biriktirme (DED) prensibi ile üretimin esası tel veya toz haldeki hammaddenin doğrudan ergitilerek katmanların üretimini sağlanmasıdır [13]. Bu süreçte hammadde doğrudan yüksek ısı kaynağı ile birlikte baskı tablası üzerine dökülür [14]. Hammadde tel halde veya toz halde olabilir. Kullanılan ısı kaynağı lazer veya plazma ark kaynağı olabilir. DED prensibini kullanan 3B yazıcılar doğrudan yeni bir parçanın üretimini yanı sıra hasarlı parçaların onarımı için de kullanılabilir [15]. Bu prensip ile çalışan yazıcılar genellikle endüstriyel düzeyde kullanılmaktadır ve operatörlüğü için kontrollü ortamlara ihtiyaç duyarlar. Dolayısıyla DED yazıcılar genellikle kapalı bir kabin içerisinde ve nozzle hareketi çok eksenli robot kollar ile sağlanır. Bu prensibin uygulaması Lazerle Tasarlanmış Şekillendirme (Laser Engineered Net Shape) (LENS) ve Elektron Işını Eklemeli İmalatı (Electron Beam Additive Manufacture) (EBAM) 3B yazıcı teknolojilerinde kullanılmaktadır.

Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekli (Laser Engineered Net Shape) (LENS): LENS 3B yazıcılarda hareketli bir taşıyıcı üzerinde güçlü bir lazer ve toz partikülleri püskürtebilen bir nozzle bulunur [16]. Bütün üretim işlemi kapalı ve içinde argon gazıyla dolu bir kabin içinde gerçekleştirilir. Böylece ortamdaki oksijen ve nem oranı düşük tutularak, ürünün oksidasyona uğraması engellenir [17]. Taşıyıcı kafa üzerinde bulunan lazer, üretimin yapıldığı bölgede bir ergime alanı oluşturur ve toz bu bölgeye ulaştığı anda ergir. Ergiyik haldeki toz döküldüğü alanda katlaşıp katman oluşturur. Bütün katmanlar üretildikten sonra parçaya gerekliyse ısıl işlemler veya diğer geleneksel yöntemlerle son işlem uygulanabilir.



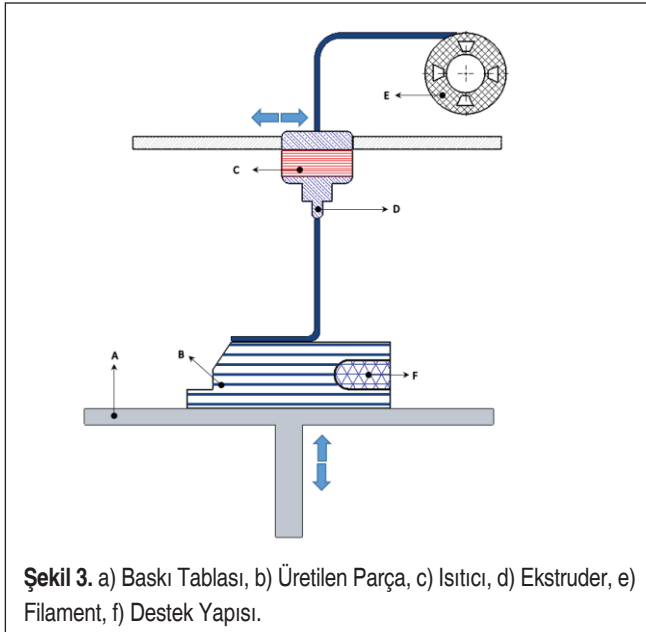
Şekil 2. a) Üretilen Parça, b) Elektron Ark Kaynağı, c) Tel Hammadde, d) Ekstruder, e) Baskı Tablası.



Elektron Işını Eklemeli İmalatı (Electron Beam Additive Manufacture) (EBAM): EBAM 3B yazıcılarda hammadde olarak tel veya toz halde metaller kullanılabilir. Titanyum, tantalum ve nikel hammaddeler ile üretim yapılabilir. Kaynak ve elektron ışını kaynakları üzerine uzmanlaşmış bir firma olan Sciaky patentli bir teknolojidir. LENS 3B yazıcılarla benzer şekilde çalışır ancak ısı kaynağı lazer yerine elektron ışınıdır ve vakumlu bir kabinde üretim gerçekleştirilir [18]. Bu teknoloji aynı zamanda hasarlı parçaların tamiri ve düzeltilmesi için de kullanılmaktadır.

2.3 Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)

Hammaddenin bir nozzle'ın içinde işleminden geçirilerek baskı tablası üzerinde istenen bölgeye katmanlar halinde dökülerek üretim yapılması prensibidir. Nozzle üretilecek olan parçanın kesiti boyunca tabla üzerinde hareket eder. Bu prensibi kullanan yazıcılar Ergimiş Filament Üretimi: (Fused Deposition Modeling) (FDM) veya Ergimiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication) (FFF) olarak bilinir. En yaygın olarak kullanılan yazıcılardır.



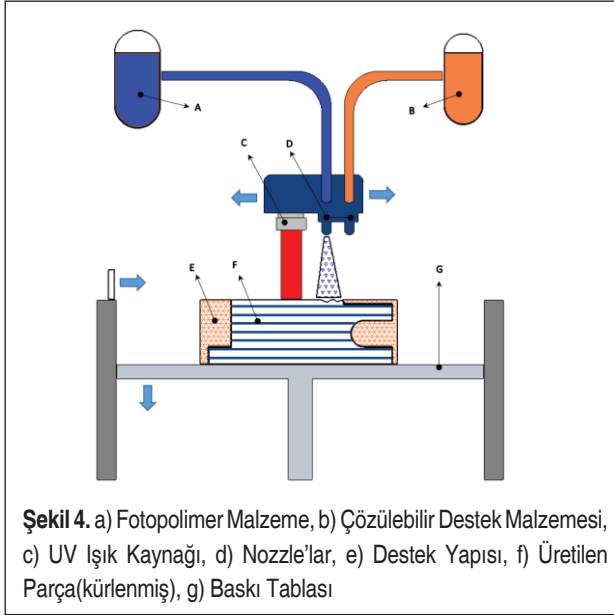
Ergimiş Filament Üretimi (Fused Deposition Modeling) (FDM): FDM 3B yazıcılarda hammadde olarak ABS, PLA veya Ultem gibi termoplastikler kullanılır [19]. Bu termoplastikler tel haldedir ve Filament olarak adlandırılır. FDM 3B yazıcılarda baskı tablası 2 veya 3 ekseninde hareket edebilir. Nozzle termoplastiğin camısı geçiş sıcaklığı-

na ulaşmasını sağlar. Ergiyen termoplastik parçanın kesitine uygun şekilde bir katman halinde tabla üzerine dökülür. Termoplastik baskı tablasına döküldüğünde katılaşır ve parçanın bir katmanını oluşturmuş olur. İlgili katmanın üretimi tamamlandığında baskı tablası veya nozzle z ekseninde katman kalınlığı kadar alçaltılır veya yükseltilir. Daha sonra parçanın diğer kesitine ait katman ilk katmanın üzerine örülür. Parçanın bütün kesitleri katmanlar halinde üretilerek tamamlandığında ürün kullanıma hazır olur.

2.4 Malzeme Jeti (Material Jetting)

Malzeme Jeti diğer 3B yazıcı türlerine göre nispeten daha yeni bir tekniktir. İşlem süreci oldukça hassas ve hızlıdır. UV ışığına veya yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında sertleşen fotopolimerler veya balmumu gibi malzemeler katmanların oluşturulması için kullanılır. Çok malzemeli üretime imkân tanıyan bir teknolojidir. Tek parça üzerinde farklı renklerde ve malzemeler ile üretim yapılabilir. Ancak üretim maliyetleri yüksek ve ortaya çıkan ürünler mekanik olarak kırılgan yapıdadır. Teknolojinin temelinde hammaddenin nozzle'dan sıvı olarak damlacıklar halinde spreyleneceğiyle katmanların oluşturulması vardır [20]. Çoklu Jet Füzyon (Multi Jet Fusion) (MJF), Nano parçacık püskürtme (Nano particle jetting) (NPJ) ve Sıvı metal damlacık 3 boyutlu yazıcı (Drop-On-Demand) (DOD) teknolojilerine sahip 3B yazıcılar bu prensipten faydalanarak üretim yaparlar.

Çoklu Jet Füzyon (Multi Jet Fusion) (MJF): MJF 3B yazıcılarda hareketli bir kafa üzerinde yüzlerce küçük nozzle bulunur. Bu nozzle'lardan fotopolimer hammadde





spreylenir katman katman parça oluşturur. Kafa üzerindeki nozzle sayısının fazla olması sayesinde diğer 3B yazıcılardaki gibi noktasal olarak üretim yapmak yerine çizgisel bir alanda üretim yapılır. Böylece üretim hızı nispeten daha yüksektir. Damlacıklar, baskı tablasında biriktikçe, UV ışığı kullanılarak kürlenir. UV ışığına maruz kalan bölgeler katılır. Farklı malzemelerle eş zamanlı üretim yapma imkânı sayesinde parça üzerinde oluşturulan destek yapılar ana parçadan farklı bir malzemeden üretilebilir. Böylece üretim sonrasında destek malzemelerin sökülmesi için gerekli olan son işlem (post-processing) sürecini kolaylaştırır. MJF 3B yazıcılarda ABS, kauçuk benzeri plastikler ve şeffaf plastikler hammadde olarak kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde görsel anlamda diğer 3B yazıcılara göre daha iyi ürünler elde etmek mümkündür.

MJF 3B yazıcılarda hammadde olarak kullanılan sıvı reçinenin spreylenebilmesi için ideal viskoziteye sahip olması gerekir. İstenen viskozite reçinenin 30-60 0C sıcaklığa ısıtılmasıyla sağlanır [21]. Daha sonra reçine yazıcının hareketli kafası baskı tablası üzerinde hareket ederken çok sayıdaki nozzlelardan yüzlerce küçük damlacıklar halinde spreylenebilir. Yazıcının hareketli kafası üzerinde bir de UV ışık kaynağı bulunur. Damlacıklar baskı tablasına yapıştıkça eşzamanlı olarak UV kürlenme işlemi gerçekleştirilir. UV ışığın temas ettiği yüzeyler katılır. İlgili katman üretildikten sonra baskı tablasının z ekseninde katman kalınlığı kadar hareket eder ve diğer katmanın üretim süreci başlar. MJF 3B yazıcılar da SLA yazıcılar gibi fotopolimerizasyondan faydalanarak üretim yaparlar. Ancak MJF 3B yazıcılar SLA yazıcılardaki gibi sonradan tekrar ışık kürüne ihtiyaç duymazlar.

MJF 3B yazıcılarda operatör kontrolü oldukça kısıtlıdır. Yazıcıya ait çok az parametreye müdahale edilebilir. Örneğin; diğer bütün yazıcılarda katman kalınlığı operatör tarafından belirlenebilirken, MJF 3B yazıcılarda katman kalınlığı kullanılan hammaddeye bağlı standart olarak belirlenir. Bunun nedeni nozzle'lardan püskürtülen damlacıkların oluşumunun fiziksel anlamda çok zor olmasıyla ilgilidir [22]. MJF 3B yazıcılar için bir diğer farklı özellik üretimi renkli yapabilmesi nedeniyle STL dosyalarının yerine ürünün renk bilgisini de barındıran OBJ veya VRML dosya türüyle çalışılması gerekir. MJF 3B yazıcılar ile her ne kadar renkli ve görsel anlamda ilgi çekici ürünler üretilebilse de mekanik özellikleri açısından oldukça zayıftır [23]. Dolayısıyla fonksiyonel ürünlerin üretimi bu teknoloji ile kolay değildir.

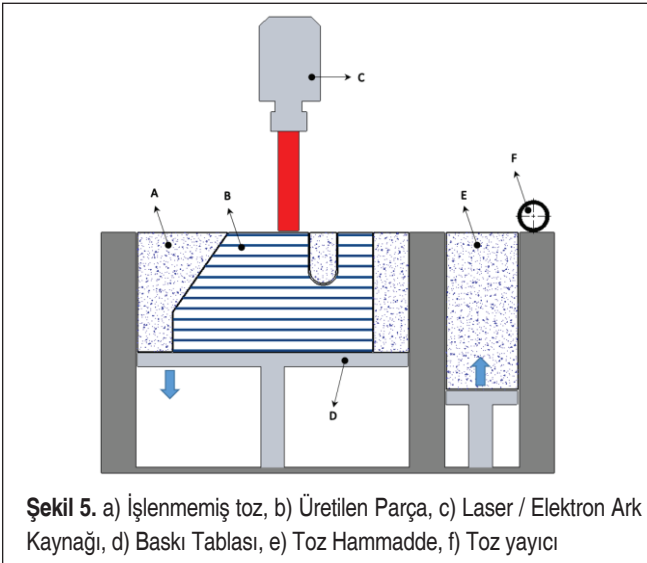
Nano Parçacık Püskürtme (Nano Particle Jetting) (NJP): NPJ 3B yazıcılar içinde metal veya seramik nanopartiküller barındıran bir sıvıyı hammadde olarak kullanır. Üretim 250 0C sıcaklığındaki bir baskı tablasında gerçekleştirilir. Bu sıcaklık sayesinde nanopartiküller ve sıvı karışım halde spreylenebilmesine rağmen tablaya ulaştığında sıvı buharlaşır ve geriye sadece metal partiküller kalır. Xjet firması tarafından ticarileştirilen bu teknolojiye zirkonya ve 316L paslanmaz çelik malzemeler ile üretim yapılabilir [24]. Üretim sırasında parçanın gerekli bölgelerine suda çözünebilir destek

malzemesi uygulanır. Üretilen parçaya yazıcıdan çıktıktan sonra bir takım son işlem uygulanması gerekir. Parça suda bekletilerek destek malzemelerinin suda çözülmesi gerekir. Ardından parça üzerinde kalan yapıştırıcı kimyasalların temizlenmesi için fırında ısıl işlem uygulanır.

Sıvı metal damlacık 3 boyutlu yazıcı (Drop-On-Demand) (DOD): DOD 3B yazıcılar, MJF 3B yazıcılarla oldukça benzer prensiplerle üretim yapar. DOD 3B yazıcılarda spreyleme için iki adet kafa bulunur. Bu kafalardan biri balmumu benzeri hammaddeyi püskürtürken, diğeri çözülebilir destek malzemesi için kullanılır. MFJ yazıcıların hammadde sürekli olarak spreylenebilirken DOD 3B yazıcılarda sadece gerekli zamanda gerekli bölgeye spreylenebilir [25]. Diğeri 3B yazıcılardan farklı olarak bir üst katmanın daha düzgün bir zemin üzerine örülmesi için önceki katman üzerinde düzleştirmek için ek bir işlem uygulanır.

2.5 Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion)

Powder Bed Fusion (PBF) teknolojileri, toz parçacıklarına katmanlar oluşturacak şekilde ergitilerek veya sinterlenerek birbirine kaynatılması prensibini kullanır. Toz halindeki hammadde erime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa belli bir süre maruz bırakıldığında parçacıklar birbirlerine temas ettikleri noktalardan başlayarak birbirine kaynamaya başlar [26]. Burada kullanılan hammadde plastik veya metal toz parçaları olabilir. PBF 3B yazıcılar, üretim sürecinde lazer veya elektron ışını gibi kullandığı enerji kaynaklarına göre ile farklılaşır. Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) ve Multi Jet Fusion (MJF) bu prensibi kullanan farklı teknolojilerdendir.



Şekil 5. a) İşlenmemiş toz, b) Üretilen Parça, c) Lazer / Elektron Ark Kaynağı, d) Baskı Tablası, e) Toz Hammadde, f) Toz yayıcı



Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering) (SLS): SLS 3B yazıcılarda, hammadde olarak plastik, cam veya seramik ince toz malzemeler kullanılır. Katmanların üretilmesi için toz parçacıklar güçlü bir lazer kaynağı ile sinterlenir. Süreç, baskı tablası üzerine ince bir toz tabakasının serilmesiyle başlar. Serilen toz katmanı 0,1 mm ve bazı uygulamalarda çok daha incedir [27]. Toz katmanı serildikten sonra parçanın üretilen kesit geometrisine uygun konulara lazer odaklanır. Lazerin odaklandığı bölgedeki toz tanecikleri sinterlenerek katlaşır ve birbirine yapışır [28]. Üretilen parçanın ilgili kesitinin tamamı katılaştıktan sonra baskı tablası z ekseninde katman kalınlığı kadar aşağı doğru iner. Tekrar yeni bir toz katmanı serilir. İşlem, istenen parçanın tamamı üretilinceye kadar tekrar eder. Süreç tamamlandığında, baskı tablası üzerinde tamamen sinterlenmemiş toz parçacıklarının arasında katlaşmış son ürün bulunur. Hazne ve ürün soğuduktan sonra tabladan çıkarılır ve etrafındaki tozlardan temizlenir. Tozların temizlenmesi için kompresör ve fırçalardan faydalanılır. Kalan tozlar tekrar kullanılabilir. Ürün daha sonra son işlemler (post-processing) uygulanarak kullanıma hazır hale gelir.

Seçici Lazer Eritme (Selective Laser Melting) (SLM) ve Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering) (DMLS): Metal 3B yazıcılar terimi genellikle en çok bilinen bu 3B yazıcı türleri için kullanılır. SLM ve DMLS 3B yazıcılar, SLS 3B yazıcılar ile oldukça benzer prensipleri kullanan teknolojilerdir. Hammadde olarak kullandıkları tozlar nedeniyle birbirlerinden farklılaşırlar. SLS 3B yazıcılarda hammadde olarak plastik, cam veya seramik ince toz malzemeler kullanılırken, SLM ve DMLS 3B yazıcılarda metal tozları kullanılır. SLM 3B yazıcılar metal tozlarını tamamen eriterek birbirleri ile birleşmesini sağlar. DMLS 3B yazıcılar ise tozları tamamen eritmek yerine eritime noktasına yakın sıcaklıklara ulaştırır [29]. Böylece toz parçacıklarının kimyasal olarak bağlanmalarına imkân tanıyacak kadar ısıtır. Dolayısıyla iki teknoloji birinin eritime değerinin sinterleme kullanmasıyla birbirinden farklılaşır. Ortak yönleri ise; her ikisinin de toz halindeki partiküllere lazer kaynağı ile seçici olarak işlem yapmasıdır. SLM 3B yazıcılar tek türde metal tozlarıyla üretim yapabilirken, DMLS 3B yazıcılar metal alaşımları kullanarak üretim yapabilir.

SLM ve DMLS 3B yazıcılarla yapılan üretimin temel bileşenleri birbirine oldukça benzerdir. Üretim izolasyonlu kapalı bir kabin içinde gerçekleştirilir. Kapalı kabinin içi argon gibi inert gazlar ile doldurulur. Daha sonra toz hammadde gerekli üretim sıcaklığına kadar ısıtılır. Çok ince bir tabaka halinde metal tozları baskı tablasına serilir. Yüksek güçteki bir lazer kaynağı üretilen kesit geometrisine göre metal tozlarını tabla üzerinde eritir. Bu esnada metal tozları hem baskı tablasına hem de birbirine kaynatılmış olur. Daha sonra baskı tablası katman kalınlığı kadar z ekseninde alçaltılır ve aynı işlem parça geometrisinin ikinci katmanı için gerçekleştirilir. Bu yazıcılarda katman kalınlıkları kullanılan tozların özelliklerine bağlı olarak 20-50 mikron kadar olabilir [30]. Parçanın tüm kesiti katman katman aynı şekilde işlenir ve üretim tamamlanır.

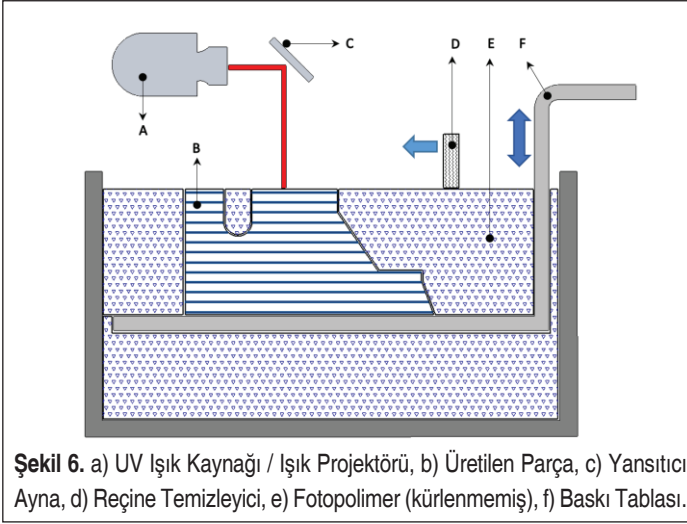
Üretim tamamlandığında işlenmemiş toz partiküller ve ürün haline gelmiş parça birbiri içinde bulunur. Kabin soğutulur ve daha sonra ürün için son işlemler (post-processing) uygulanır. Ürün baskı tablasına kaynamış halde üretildiği için EDM veya talaşlı imalat yöntemleri ile baskı tablasından ayrılması gerekir. Üretim sırasında oluşturulan destek yapıların temizlenmesi gerekir. Aynı zamanda kumlama ve benzeri uygulamalarla parça yüzeyi daha iyi hale getirilebilir. Bu yazıcılarla üretilen parçaların toleransları ± 0.1 mm civarındadır. SLM ve DMLS 3B yazıcılarda kullanılan toz hammadde açısından bakıldığında sarfiyatı oldukça azdır. Üretim sonrasında baskı tablasına yayılan tozların sadece %5'i kullanılamaz hale gelir. Dolayısıyla ürünün üzerinden temizlenen tozların çoğu tekrar kullanılabilir. Kayıplar sadece kullanılan destek yapılarından kaynaklanır. Dolayısıyla karmaşık ve çok destek yapısı gerektiren parçalarda toz maliyeti artacaktır. Aynı sebeple ürünün tasarımı ve üretim sırasında baskı tablasına konumlandırılması sırasında daha az destek yapısına ihtiyaç duyacak şekilde optimize edilmesi gerekir.

Elektron Işını Erime (Electron Beam Melting) (EBM): EBM 3B yazıcılar elektron ışını ile metal toz partiküllerin eritilmesi prensibiyle üretim yapar [31]. İsveç'de bulunan Arcam firması bu yazıcılardaki öncü firmadır. DMLS yazıcılar ile arasındaki fark EBM'de lazer yerine ısı kaynağı olarak elektron ışınlarının kullanılmasıdır. Bunun yanında EBM 3B yazıcılarda vakumlu bir kabin kullanılır. Aynı zamanda hammadde olarak kullanılan tozların iletken olması gerekir. Bunun haricinde üretim prensipleri DMLS yazıcı ile oldukça benzerdir.

Çoklu Jet Füzyon (Multi Jet Fusion) (MJF): MJF 3B yazıcılar bir anlamda püskürtmeli kâğıt yazıcılara benzerdir. Zaten teknolojinin öncüsü olan firma (HP) kâğıt yazıcılar üreten bir firmadır. Üzerinde 2B kâğıt yazıcıların inkjet nozzle'larına benzer nozzle'lar bulunur. 2B yazıcılarda bu nozzle'lardan mürekkep püskürtülürken MJF 3B yazıcılarda ise toz plastik parçaların birbirine yapışmasını sağlayan kimyasal bir sıvı (fusing agent) püskürtülür [32]. MJF 3B yazıcıda hammadde olarak toz halde naylon veya poliamid (PA 11, PA 12 ve PA12) termoplastik malzeme kullanılır. Toz hammadde baskı tablasına serilir daha sonra üretilecek olan parçanın kesitine uygun şekilde agent ilgili bölgelere damlatılır. Süreç tamamlandıktan sonra katman ısıtılır. Isıtma işlemi esnasında damlatılan kimyasal ile temas eden toz partikülleri bağlanır ve katlaşır. SLS 3B yazıcılara benzer bir prensiple çalışan MJF 3B yazıcıların farkı ısı kaynağıdır. SLS yazıcılarda toz partiküllerini sinterlemek için ısı kaynağı olarak lazer kullanılır. MJF yazıcılarda ise toz partiküllerinin infrared ışığı absorbe etmesini kolaylaştıracak bir kimyasal kullanılır. Sonrasında infrared bir enerji kaynağı kullanılarak tozlar sinterlenir.

2.6 Fotopolimerizasyon (Photopolymerization)

Fotopolimerizasyon, bir fotopolimer reçinenin belirli bir dalga boyunun ışığına maruz



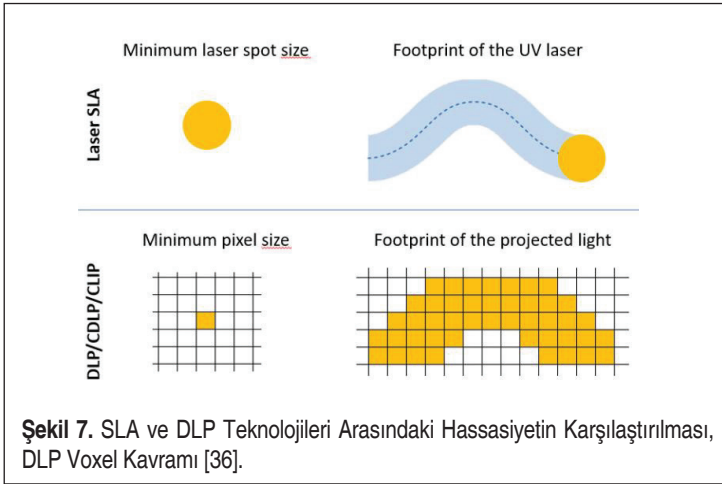
kaldığında kimyasal bir reaksiyonla katı hale geldiği süreçtir [33]. Bazı 3B yazıcılar katmanları oluşturmak için fotopolimerizasyon prensibini kullanır. Stereolithography (SLA), Direct Light Processing (DLP) ve Continuous DLP (CDLP) teknolojileri bu prensibe dayalı 3B yazıcılarıdır.

Stereolitografi (SLA): Bu teknolojiye sıvı fotopolimer reçineyle doldurulmuş bir hammadde haznesi vardır. Haznenin içinde bir baskı tablası bulunur. SLA’da kullanılan hammadde sıvı haldedir ve reçine olarak da adlandırılır. Reçine olarak ışığa duyarlı termoset polimerler kullanılır. Fotopolimerizasyon sırasında, sıvı reçineyi oluşturan monomer karbon zincirleri, UV lazerin ışığı ile aktive olur ve birbirleri arasında güçlü kırılmaz bağlar oluşturarak katlaşır [34]. Baskı tablası sıvı reçinenin içine daldırıldıktan sonra, makinenin içine yerleştirilen tek nokta lazerin değdiği bölge katlaşır. Böylece istenen katman oluşturulur. İlgili katmanın tüm kesiti üretildikten sonra, platform yukarı kalkar ve bu katmanın altında katlaşmamış sıvı reçinenin akmasına izin verir. Lazer bu noktada oluşturulacak nesnenin kesitine uygun bölgeleri tekrar katlaştırır ve bir önceki katmana yapışmasını sağlar. Bu işlem, katı bir parça üretmek için katman katman tekrarlanır.

SLA teknolojisinde üretilecek parçaların her bir katmanının yüksekliği 25-100 mikron arasında değişir [35]. Katman kalınlığı ne kadar düşük seçilirse, parçanın geometrisi daha doğru bir şekilde üretilebilir. Ancak bu durum üretim süresini ve maliyeti artırır. Üretimi yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya doğru yapan SLA 3B yazıcılar vardır. Yukarıdan aşağıya üretim yapan SLA yazıcılarda lazer kaynağı baskı tablasının üzerine yerleştirir ve parça yukarı bakacak şekilde üretilir. Baskı tablası reçine haznesinin en üst kısmında ilk katmanı üretir ve üretilen her katmandan sonra aşağı doğru

hareket eder. Aşağıdan yukarıya üretim yapan 3B SLA yazıcılarda lazer kaynağı reçine haznesinin altına yerleştirir ve parça baş aşağı bakacak şekilde oluşturulur. Bu tip 3B SLA yazıcıların hem üretimi hem de kullanımı daha kolaydır. Ancak z ekseninde üretim yapabilmek kapasitesi diğer SLA 3B yazıcıya göre daha düşüktür. Katılaştırılmış parça sıvı reçinenin içinden yukarı doğru çekilirken sistem içinde oluşan kuvvetler ve parçanın kendi ağırlığı üretimi zorlaştırır. Bu durum aşağıdan yukarıya üretim yapan SLA 3B yazıcılarda sorun oluşturmaz. Bu nedenle daha profesyonel endüstriyel uygulamalarda aşağıdan yukarıya üretim yapan SLA yazıcılar tercih edilir. Formlabs ve 3D Systems sektörde pazar payı yüksek SLA 3B yazıcı üreticilerindedir.

Doğrudan Işık İşleme (Direct Light Processing) (DLP): DLP 3B yazıcılar, SLA 3B yazıcılar ile neredeyse aynı prensibe dayanarak üretim yapar. Aralarındaki temel fark, SLA 3B yazıcılarda ışık kaynağı olarak lazer kullanılırken, DLP 3B yazıcılarda ışık kaynağı bir projektördür. Lazer ilgili katmanı üretirken o katman üzerinde parçanın kesiti boyunca hareket ederken, projektör ile ilgili katmanın kesiti tek seferde üretilir. Ancak burada projektör ile katmanlar voksel adı verilen kare şeklinde pikseller ile üretilir [36].



Şekil 7. SLA ve DLP Teknolojileri Arasındaki Hassasiyetin Karşılaştırılması, DLP Voxel Kavramı [36].

Projektörün yansıttığı ışık alanının lazere göre çok daha büyük olması nedeniyle 3B DLP yazıcıların üretim hızı, SLA 3B yazıcılara göre daha fazladır. Hem SLA hem de DLP 3B yazıcılar ile üretilen parçalar için bazı son işlem (post-processing) süreçleri uygulanır. Parçalar yazıcıdan çıktıktan sonra destek yapılarının temizlenmesi gerekir. Parçanın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için UV ışığı ile son işlem olarak tekrar kürlenabilir. Bazı durumlarda üretilen parçaların yüksek sıcaklıktaki bir kabinde bekletilmesi ürünün dayanımını artırmak için gerekli olabilir.

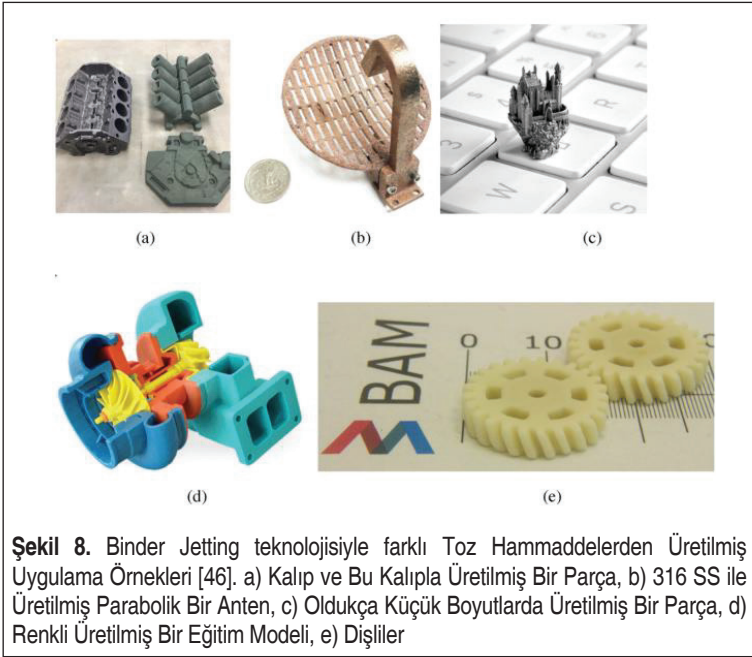


3. YÖNTEM

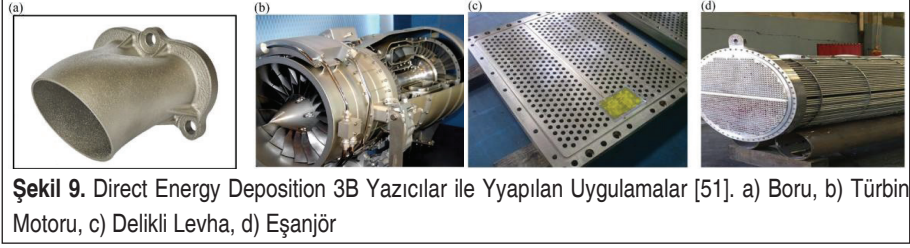
Çalışmada 2015 – 2020 Arasında Yapılan Çalışmalardan Örnekler

Bağlayıcı Jeti (Binder Jetting) Çalışmaları: BJ teknolojisi istenen herhangi bir toz malzeme ile çalışabilme potansiyeli açısından oldukça önemli bir teknolojidir. Bu özelliği ile döküm kalıpları (Resim 8a), medikal ve elektronik ile ilgili çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Aynı zamanda farklı tozlarla üretim yapabilme imkânı ürünlerin Resim 8d’de görüldüğü gibi renkli üretilmesine de imkân tanımaktadır.

Literatürde BJ 3B yazıcılar ile kum kalıbı ve seramik kalıp uygulamaları geniş yer tutmaktadır [37–41]. 3B yazıcılar ile karmaşık geometrilerin geleneksel imalat yöntemlerine göre çok daha kolay üretilmesi özellikle kalıp uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. Karmaşık geometrilerin yanı sıra ürünlerdeki yüksek toleranslı hassas işlemler de gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 8c). BJ 3B yazıcılar son zamanlarda diş protezi [42,43], cerrahi implantlar [44] ve hatta farmakolojik [45] uygulamalarda da kullanılmaktadır.



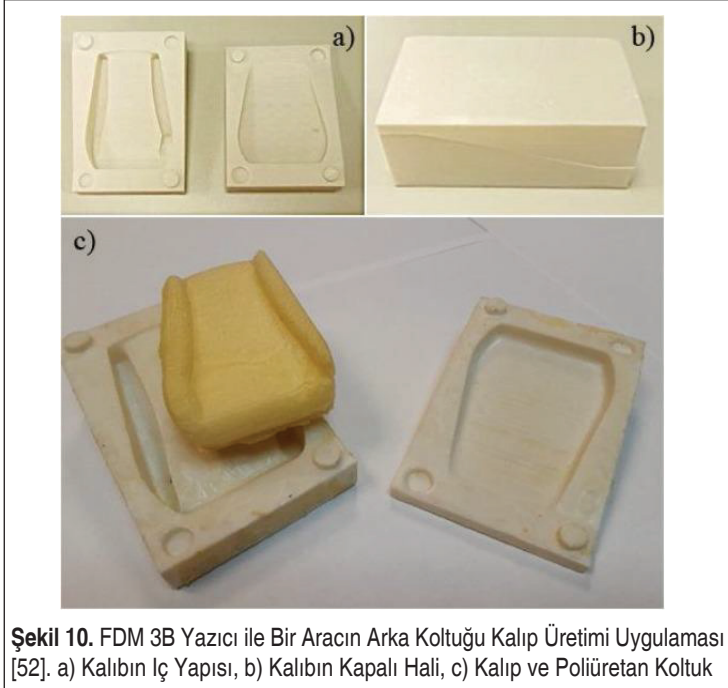
Doğrudan Enerji Biriktirme (DED) Çalışmaları: DED 3B yazıcılar son zamanlarda üzerinde daha çok çalışılmaya başlanmıştır. Otomotiv [47], uzay ve havacılık [48] endüstrilerinde DED 3B yazıcılar her geçen gün daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. Otomotiv alanında hasarlı parçanın değiştirilmesi yerine mevcut parça-



Şekil 9. Direct Energy Deposition 3B Yazıcılar ile Yapılan Uygulamalar [51]. a) Boru, b) Türbin Motoru, c) Delikli Levha, d) Eşanjör

nın tamir edilmesi hem maliyet hem de hizmet süresi açısından önemlidir. Hasarlı ürünlerin tamiri için tungsten inert gaz kaynağı halen bu tür onarım işlemleri için öncelikli olarak kullanılan metottur. Ancak bu yöntemin dezavantajı parça üzerinde ısıdan etkilenen bölgelerin büyük olmasıdır. DED 3B yazıcılar bu anlamda ısı bölgesinin daha az tutulması olanağını sunmaktadır[49]. Aynı zamanda gaz kaynağına göre otomasyona çok daha yatkın bir teknolojidir. Endüstri 4.0 hedefi de göz önünde bulundurulduğunda önümüzdeki yıllarda DED 3B yazıcılar otomotiv sektöründe daha fazla uygulama alanı bulabilecektir.

Uzay ve havacılık endüstrilerinde kullanılacak olan bir parçanın mümkün olan en hafif yapıda olması beklenir. Bu anlamda DED 3B yazıcılar topoloji optimizasyonu yardımıyla geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilemeyecek ürünlerin üretilmesine imkan tanır [50].



Şekil 10. FDM 3B Yazıcı ile Bir Aracın Arka Koltuğu Kalıp Üretimi Uygulaması [52]. a) Kalıbın İç Yapısı, b) Kalıbın Kapalı Hali, c) Kalıp ve Poliüretan Koltuk

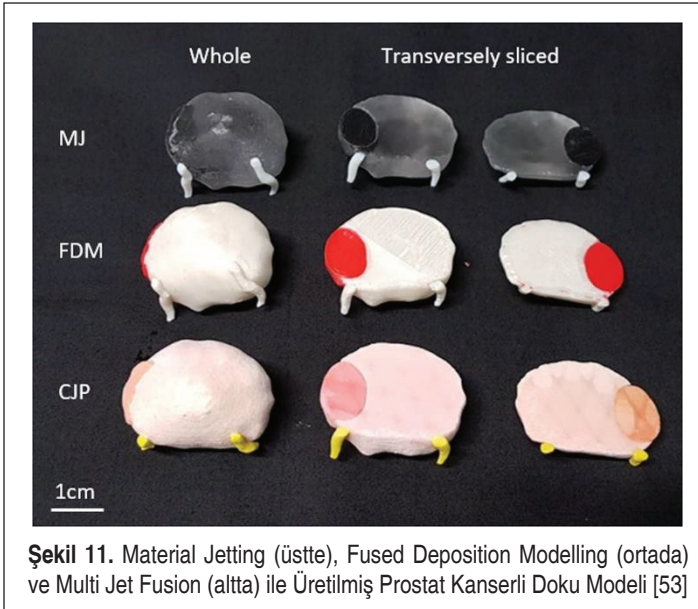


Ergimiş Filament Üretimi (FDM) Çalışmaları: FDM 3B yazıcılar düşük maliyetleriyle sektörde en çok kullanılan yazıcı türüdür. Bu anlamda FDM 3B yazıcılar otomotiv [52] ve medikal [53] gibi yüksek katma değerli endüstrilerden oyuncak üretimi [54] veya gündelik kişisel ürünlere [55] kadar çok geniş bir yelpazede kendine uygulama alanı bulmaktadır.

Şekil 10’da 3B FDM yazıcı ile üretilmiş bir koltuk kalıbı görülmektedir. Otomotiv endüstrisinde kullanılan bu tarz ürünler için kullanılan kalıplar metal hammaddelerden geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle üretilmektedir. Bu kalıpların üretim süreleri ve maliyetleri oldukça yüksektir. Ancak FDM 3D yazıcılar ile bu kalıpların üretilmesi mümkündür. Her ne kadar FDM ile üretilen kalıplar henüz geleneksel yöntemler ile üretilen rakiplerine göre istenen yüzey hassasiyetini sağlayamasa da önemli bir potansiyel barındırmaktadır [52].

Medikal alanda FDM 3B yazıcılar anatomik modellerin üretimi için kullanılmaktadır. Şekil 11’de farklı FDM 3B yazıcıların yanı sıra farklı 3B yazıcı teknolojileriyle üretilmiş kanserli dokuyu göstermektedir [53]. FDM 3B yazıcılar eğitim materyali veya cerrahi operasyon öncesi planlama için kullanılacak modellerin üretimi için kullanılabilir. Şekil 11’de farklı FDM 3B yazıcıların yanı sıra farklı 3B yazıcı teknolojileriyle üretilmiş kanserli dokuyu göstermektedir [53]. FDM 3B yazıcılar eğitim materyali veya cerrahi operasyon öncesi planlama için kullanılacak modellerin üretimi için kullanılabilir.

Malzeme Jeti (Material Jetting) (MJ) Çalışmaları: MJ 3B yazıcıların en önemli özelliklerinden biri çok renkli üretimler yapılabilmesidir. Bu özelliği nedeniyle görsel prototiplerin üretiminde önemli bir kullanıma sahiptir. Son zamanlarda “3B Özçe-





kim” olarak adlandırılan bir kişinin veya yüzünün birebir ölçekte kopyasının üretimi bu türdeki 3B yazıcılarla yapılmaktadır.

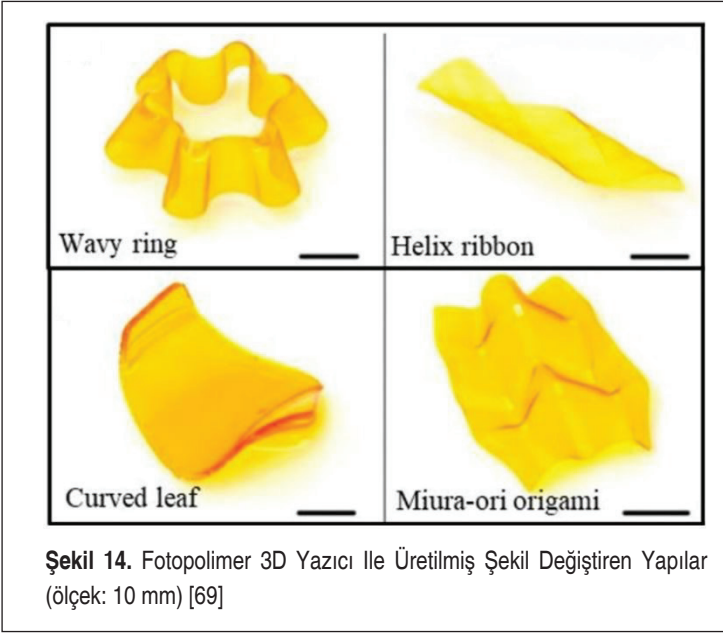
2014 yılında, ilk defa bir devlet başkanının (Barack Obama) büstü 3B yazıcı ile üretildi [56]. Barack Obama 3B yazıcıları “Neredeyse her şeyi yapma şeklimizde devrim yaratacak potansiyeline sahip” kelimeleriyle tanımladı [57]. Bu tür çalışmalar 3B yazıcılarla ilgili yapılan çalışmaların popülerliğini arttırmakta ve toplumda daha popüler hale gelmesine yardımcı olmaktadır.

MJ 3B yazıcılar sadece insan figürleri üretmekten çok daha önemli konularda da kullanılmaktadır. Medikal alanda kullanılabilecek ekipmanlardan [58], araçlarda kullanılabilecek helisel yaylara [59] ve mikroakış cihazlarına [60] kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadır.

Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion) (PBF) Çalışmaları: PBF 3B yazıcılar, doğası gereği, diğer birçok yazıcı türünün aksine çok geniş yelpazede çeşitli malzemeler ile üretim yapabilir [61]. Farklı malzemelerin yanı sıra oldukça hassas toleranslarda çok küçük parçaların üretimini de yapmak mümkündür (Şekil 13a). Bu anlamda



Şekil 13. a) Alüminyum Oksit Tozuyla Üretilmiş Minyatür Bir Çark [61], b) GE firması İçin Üretilmiş Bir Uçak Yakıt Nozzle'ı [62], c) Biyomedikal Uygulamalar İçin Titanyum Alaşım Bir Kafes Yapı [63]



Şekil 14. Fotopolimer 3D Yazıcı İle Üretilmiş Şekil Değiştiren Yapılar (ölçek: 10 mm) [69]

öngörülebilir gelecekte en yaygın 3B yazıcılardan biri olma potansiyeline sahiptir.

Dünyanın önde gelen firmalarından General Electric'in bir yan kuruluşu olan GE Aviation 30.000 adetten fazla yakıt nozzle'mı PBF 3B yazıcılar ile üretmiştir (Resim 13b). Biyomedikal alanda ise bu yazıcılarla üretilen ürünlerin sayısı hızla artmaktadır (Şekil 13c).

Fotopolimerizasyon Çalışmaları: Fotopolimerizasyon tekniğini kullanan 3B yazıcılar çok çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır: akıllı kompozitler [64], yumuşak robotik [65], protezler ve ortezler [66].

Bu alanların yanında en dikkat çekici uygulamalar zamanla şekil değiştirebilen yapıların üretilmesi olarak gösterilebilir. Bu ve benzeri çalışmalar 3B yazıcı teknolojisini bir bakıma yeniden tanımlamaktadır. Yeni geliştirilmiş fotopolimerler ile üretilen yapılar 3B yazıcıda belirli bir geometri ile üretilmiş olsa da zamana bağlı olarak şekil değiştirme yeteneğine sahiptirler. Böylece 3 boyutun ötesine geçerek yeni bir tanımlamayla 4B baskı kavramı karşımıza çıkmaktadır [67]. 4D baskı, su, sıcaklık, pH, ışık vb. gibi harici bir uyarana yanıt olarak zamanla şeklini, özelliğini ve işlevselliğini değiştirebilen nesnelere üretimini ifade eder [68]. Fotopolimerizasyon tekniğini kullanan 3B yazıcılarda su ile temas ettiğinde üretildiğinden çok daha farklı şekillere girebilen yapılar üretilmektedir (Şekil 14). Resimde uygulaması görülen çalışmada DLP 3B yazıcılar ile kullanılabilir yeni bir fotopolimer sentezlenmiştir [69]. Bu

fotopolimer ile üretilen nesnelere su ile temas ettiğinde zamanla ilk şekliinden farklı şekillere dönüşebilmektedir.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

İnsanlık tarihinde üretim teknolojilerinde yaşanan üç devrimsel gelişme toplumu önemli ölçüde etkilemiştir. 1800’lü yıllarda makineleşmenin başlangıcıyla Endüstri 1.0, 1900’lü yıllarda elektriğin üretim araçlarında kullanımıyla Endüstri 2.0 ve 1960’lardan sonra nümerik kontrollü cihazlarla birlikte Endüstri 3.0 devrimleri yaşanmıştır. Bu gelişmelerin devrim olarak adlandırılmasının sebebi üretim kapasitemizin artmasının yanında, toplumsal ve ekonomik anlamda köklü değişimlere yol açmalarıdır. Geçmişte yaşanan bu devrimlerin nasıl geliştiği, sonrasında yaşanan etkileri incelendiğinde; günümüze ışık tutmakta aynı zamanda geleceğe dair öngörüler yapmamıza olanak vermektedir. Bu anlamda birçok araştırmacı içinde yaşadığımız bu dönemin “Endüstri 4.0” adıyla yeni bir endüstriyel devrimin başında olduğumuzu öngörmektedir [70–73]. Endüstri 4.0 devriminde en önemli teknolojilerden biri 3B yazıcılardır.

Bu çalışmada 3B yazıcılar ile ilgili detaylı bir değerlendirme yapılmıştır. Bütün 3B yazıcılar hammaddenin katmanlar halinde üst üste eklenmesi ile üretim yapmaktadır. Ancak bu süreçte kullandıkları teknoloji ve prensipler farklılık göstermektedir. Bu çalışmada çok sayıda farklı teknolojiye sahip yazıcılar ile ilgili temel bilgiler derlenmiştir. Her bir 3B yazıcı teknolojisi ile yapılmış olan dikkat çekici çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

3B yazıcıların uygulamalarıyla ilgili 2015 ve 2020 yılları arasında yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde otomotiv, biyomedikal, uzay ve havacılık gibi alanların öne çıktığı görülmektedir. 3B yazıcılar ile geleneksel üretim yöntemleriyle üretilemeyecek veya üretimi daha zor olan; daha hafif, karmaşık geometri ve kişiye özgü ürünler üretilebilmektedir. Dolayısıyla bu tarz ürün ve yapıların en çok ihtiyaç duyulduğu otomotiv, biyomedikal ve havacılık gibi alanlarda 3B yazıcıların yaygın kullanılması kaçınılmazdır.

Gelecekte önemli yer tutacak olan 3B yazıcı teknolojileri başlı başına bir çalışma konusu olmanın yanı sıra farklı disiplinlerdeki araştırmacılar için önemli bir araç olacaktır. Bu anlamda farklı disiplinlerde çalışan araştırmacılar için 3B yazıcıların özelliklerinin ve temel çalışma prensiplerinin kavranması önemlidir.

KAYNAKÇA

1. Lasi H, Fettke P, Kemper HG, Feld T, Hoffmann M. 2014.”Industry 4.0”. Bus Inf Syst Eng 2014;6:239–42. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>.
2. Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M. 2017.”The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0”. Procedia Manuf 2017;11:545–54.



<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.

3. **Hull CW, Spence ST, Albert DJ, Smalley DR, Harlow RA, Stinebaugh P, et al.** 1993. Method and Apparatus for Production of High Resolution Three-Dimensional Objects By Stereolithography, 1993.
4. **Crump SS.** 1989.Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects, 1989.
5. **Beaman JJ, Deckard CR.** 1989.SELECTIVE LASER SINTERNG WITH ASSISTED POWDER HANDLNG, 1989.
6. **Ventola CL.** 2014."Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses.". P T 2014;39:704–11.
7. **Lim CWJ, Le KQ, Lu Q, Wong CH.** 2016. An Overview of 3-D Printing in Manufacturing, Aerospace, and Automotive Industries. IEEE Potentials 2016;35:18–22. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2540098>.
8. **Joshi SC, Sheikh AA.** 2015."3D printing in aerospace and its long-term sustainability". Virtual Phys Prototyp 2015;10:175–85. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1111519>.
9. **Gülcan, O, Şimşek, U, Kavas, B.** (2021). Eklemeli İmalatla Üretilen İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Metal Yapılar. Mühendis ve Makina, 62 (702), 1-22. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/muhendismakina/issue/60660/894585>
10. **ISO/ASTM.** 2015."ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles - Terminology". Int Stand 2015;5:1–26.
11. **Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M, Gibson I, Rosen D, et al.** 2021. Binder Jetting. Addit. Manuf. Technol., Springer International Publishing; , p. 237–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_8.
12. **Gonzalez JA, Mireles J, Lin Y, Wicker RB.** 2016."Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology". Ceram Int 2016;42:10559–64. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.079>.
13. **Poyraz, Ö, Kuşhan, M.** 2018. Havacılık Komponentlerinin Bakım Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanımı. Mühendis ve Makina, 59 (691), 59-69. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/muhendismakina/issue/48796/620853>
14. **Bae CJ, Diggs AB, Ramachandran A.** 2018.Quantification and certification of additive manufacturing materials and processes. Addit. Manuf. Mater. Process. Quantif. Appl., Elsevier; , p. 181–213. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00006-2>.
15. **Oh WJ, Lee WJ, Kim MS, Jeon JB, Shim DS.** 2019."Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition". Opt Laser Technol 2019;117:6–17. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.04.012>.
16. **Atwood C, Griffith M, Harwell L, Schlienger E, Ensz M, Smugeresky J, et al.**

2018. Laser engineered net shaping (LENSTM): A tool for direct fabrication of metal parts. *Int. Congr. Appl. Lasers Electro-Optics*, vol. 1998, Laser Institute of America; , p. E1–7. <https://doi.org/10.2351/1.5059147>.
17. **Hofmeister W, Wert M, Smugeresky J, Philliber JA, Griffith M, Ensz M.** 1999. "Investigating Solidification with the Laser-Engineered Net Shaping (LENSTM) Process". *J Miner Met Mater Soc* 1999;51:1–6.
 18. **Cheng B, Price S, Lydon J, Cooper K, Chou K.** 2014. "On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation". *J Manuf Sci Eng Trans ASME* 2014;136. <https://doi.org/10.1115/1.4028484>.
 19. **Novakova-Marcincinova L, Novak-Marcincin J.** 2012. Applications of rapid prototyping fused deposition modeling materials. *23rd DAAAM Int. Symp. Intell. Manuf. Autom.* 2012, vol. 1, p. 57–60.
 20. **He Y, Wildman RD, Tuck CJ, Christie SDR, Edmondson S.** 2016. "An Investigation of the Behavior of Solvent based Polycaprolactone ink for Material Jetting". *Sci Rep* 2016;6:1–10. <https://doi.org/10.1038/srep20852>.
 21. **Kim H, Zhao Y, Zhao L.** 2016. Process-level modeling and simulation for HP's Multi Jet Fusion 3D printing technology. 2016 1st Int. Work. Cyber-Physical Prod. Syst. CPPS 2016, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; <https://doi.org/10.1109/CPPS.2016.7483916>.
 22. **Tan H.** 2016. "Three-dimensional simulation of micrometer-sized droplet impact and penetration into the powder bed". *Chem Eng Sci* 2016;153:93–107. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.015>.
 23. **Tasch D, Schagerl M, Wazel B, Wallner G.** 2019. "Impact behavior and fractography of additively manufactured polymers: Laser sintering, multijet fusion, and hot lithography". *Addit Manuf* 2019;29:100816. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100816>.
 24. **Oh Y, Bharambe V, Mummareddy B, Martin J, McKnight J, Abraham MA, et al.** 2019. "Microwave dielectric properties of zirconia fabricated using Nano-Particle Jetting™". *Addit Manuf* 2019;27:586–94. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.005>.
 25. **Simonelli M, Aboulkhair N, Rasa M, East M, Tuck C, Wildman R, et al.** 2019. "Towards digital metal additive manufacturing via high-temperature drop-on-demand jetting". *Addit Manuf* 2019;30:100930. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100930>.
 26. **Martin AA, Calta NP, Khairallah SA, Wang J, Depond PJ, Fong AY, et al.** 2019. "Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing". *Nat Commun* 2019;10:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10009-2>.
 27. **Wai Ming L, Gibson I.** 2000. Colour Rapid Prototyping based on SLS process.



28. **Wang Lingling Wang Lihua Zhao Zijian Liu R-J.** 2007."Influence of process parameters on part shrinkage in SLS". *Int J Adv Manuf Technol* 2007;33:498–504. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0490-x>.
29. **Duda T, Raghavan LV.** 2016."3D Metal Printing Technology". *IFAC-PapersOnLine* 2016;49:103–10. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>.
30. **N'Dri N, Mindt H-W, Shula B, Megahed M, Peralta A, Kantzos P, et al.** 2015. DMLS Process Modelling and Validation. TMS 2015 144th Annu. Meet. Exhib., Springer International Publishing; , p. 389–96. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48127-2_49.
31. **Seifi M, Dahar M, Aman R, Harrysson O, Beuth J, Lewandowski JJ.** 2015."Evaluation of Orientation Dependence of Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation Behavior of As-Deposited ARCAM EBM Ti-6Al-4V". *JOM* 2015;67:597–607. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1298-7>.
32. **Safka J, Ackermann M, Seidl M, Vele F, Machacek J, Behalek L, et al.** 2020."Mechanical properties of two types of lattice structures fabricated with the use of hp multijet fusion technology". *MM Sci J* 2020;2020:4074–9. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_11_2020029.
33. **Bagheri A, Jin J.** 2019."Photopolymerization in 3D Printing" 2019. <https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00165>.
34. **Salonitis K.** 2014.Stereolithography. *Compr. Mater. Process.*, vol. 10, Elsevier Ltd; , p. 19–67. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01001-3>.
35. **Kazmer D.** 2017.Three-Dimensional Printing of Plastics. *Appl. Plast. Eng. Handb. Process. Mater. Appl. Second Ed.*, Elsevier Inc.; , p. 617–34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00029-8>.
36. **Pagac M, Hajnys J, Ma Q-P, Jancar L, Jansa J, Stefek P, et al.** 2021."A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing". *Polymers (Basel)* 2021;13:598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>.
37. **Mitra S, Rodríguez de Castro A, El Mansori M.** 2019."On the rapid manufacturing process of functional 3D printed sand molds". *J Manuf Process* 2019;42:202–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.034>.
38. **Huang S, Ye C, Zhao H, Fan Z.** 2019."Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting". *Addit Manuf* 2019;29:100802. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100802>.
39. **Rodríguez-González P, Fernández-Abia AI, Castro-Sastre MA, Barreiro J.** 2020."Heat treatments for improved quality binder jetted molds for casting aluminum alloys". *Addit Manuf* 2020;36:101524. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101524>.
40. **Almaghariz ES, Conner BP, Lenner L, Gullapalli R, Manogharan GP, Lamonc-**

- ha B, et al.** 2016."Quantifying the role of part design complexity in using 3d sand printing for molds and cores". *Int J Met* 2016;10:240–52. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0027-5>.
41. **Le Néel TA, Mognol P, Hascoët JY.** 2018."A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering". *Rapid Prototyp J* 2018;24:1325–36. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2016-0161>.
 42. **Miyanaaji H, Zhang S, Lassell A, Zandinejad A, Yang L.** 2016."Process Development of Porcelain Ceramic Material with Binder Jetting Process for Dental Applications". *JOM* 2016;68:831–41. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1771-3>.
 43. **Mostafaei A, Stevens E, Ference J, ... DS-A,** 2018 undefined. n.d."Binder jetting of a complex-shaped metal partial denture framework". Elsevier n.d.
 44. **Pandey A, Awasthi A, Saxena KK.** 2020."Metallic implants with properties and latest production techniques: a review". *Adv Mater Process Technol* 2020;6:167–202. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1731236>.
 45. **Rahman Z, Charoo NA, Kuttolamadom M, Asadi A, Khan MA.** 2019.Printing of personalized medication using binder jetting 3D printer. *Precis. Med. Investig. Pract. Provid., Elsevier;* , p. 473–81. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819178-1.00046-0>.
 46. **Ziaee M, Crane NB.** 2019."Binder jetting: A review of process, materials, and methods". *Addit Manuf* 2019;28:781–801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
 47. **Saboori A, Aversa A, Marchese G, Biamino S, Lombardi M, Fino P.** 2019."Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair". *MdpciCom* 2019. <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
 48. **Shah K, Pinkerton AJ, Salman A, Li L.** 2010."Effects of Melt Pool Variables and Process Parameters in Laser Direct Metal Deposition of Aerospace Alloys". *Mater Manuf Process* 2010;25:1372–80. <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.480999>.
 49. **Bennett J, Garcia D, ... MK-J of,** 2019 undefined. n.d."Repairing automotive dies with directed energy Deposition: Industrial application and life cycle analysis". *AsmedigitalcollectionAsmeOrg* n.d.
 50. **Tepylo N, Huang X, Patnaik PC.** 2019."Laser□Based Additive Manufacturing Technologies for Aerospace Applications". *Adv Eng Mater* 2019;21:1900617. <https://doi.org/10.1002/adem.201900617>.
 51. **Pratheesh Kumar S, Elangovan S, Mohanraj R, Ramakrishna JR.** 2021."A review on properties of Inconel 625 and Inconel 718 fabricated using direct energy deposition". *Mater Today Proc* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.566>.
 52. **Romero PE, Arribas-Barrios J, Rodriguez-Alabanda O, González-Merino R, Guerrero-Vaca G.** 2021."Manufacture of polyurethane foam parts for automotive



- industry using FDM 3D printed molds". *CIRP J Manuf Sci Technol* 2021;32:396–404. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.01.019>.
53. **Chen MY, Skewes J, Woodruff MA, Dasgupta P, Rukin NJ.** 2020."Multi-colour extrusion fused deposition modelling: a low-cost 3D printing method for anatomical prostate cancer models". *Sci Rep* 2020;10:1–5. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67082-7>.
 54. **León-Cabezas MA, Martínez-García A, Varela-Gandía FJ.** 2017."Innovative functionalized monofilaments for 3D printing using fused deposition modeling for the toy industry". *Procedia Manuf* 2017;13:738–45. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.130>.
 55. **Mwema FM, Akinlabi ET, Fatoba OS.** 2019. Visual assessment of 3D printed elements: A practical quality assessment for home-made FDM products. *Mater. Today Proc.*, vol. 26, Elsevier Ltd; , p. 1520–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.313>.
 56. **Metallo A, Rossi V, Blundell J, Waibel G, Graham P, Fyffe G, et al.** 2015. Scanning and printing a 3D portrait of president Barack Obama. *SIGGRAPH 2015 Stud.*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery (ACM); , p. 1–1. <https://doi.org/10.1145/2785585.2796315>.
 57. **Gross D.** 2013."Obama's speech highlights rise of 3-D printing". *CNN* 2013.
 58. **Salmi M.** 2021."Additive manufacturing processes in medical applications". *Materials (Basel)* 2021;14:1–16. <https://doi.org/10.3390/ma14010191>.
 59. **Nazir A, Ali M, Hsieh CH, Jeng JY.** 2020."Investigation of stiffness and energy absorption of variable dimension helical springs fabricated using multijet fusion technology". *Int J Adv Manuf Technol* 2020;110:2591–602. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06061-8>.
 60. **Tasoglu S, Folch A.** 2018."Editorial for the Special Issue on 3D Printed Microfluidic Devices". *Micromachines* 2018;9:609. <https://doi.org/10.3390/mi9110609>.
 61. **Gibson I, Rosen D, Stucker B, Gibson I, Rosen D, Stucker B.** 2015. Powder Bed Fusion Processes. *Addit. Manuf. Technol.*, Springer New York; , p. 107–45. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_5.
 62. **Singh R, Gupta A, Tripathi O, Srivastava S, Singh B, Awasthi A, et al.** 2019. Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. *Mater. Today Proc.*, vol. 26, Elsevier Ltd; , p. 3058–70. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>.
 63. **Huang S, Sing SL, de Looze G, Wilson R, Yeong WY.** 2020."Laser powder bed fusion of titanium-tantalum alloys: Compositions and designs for biomedical applications". *J Mech Behav Biomed Mater* 2020;108:103775. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103775>.
 64. **Asif S, Chansoria P, Shirwaiker R.** 2020."Ultrasound-assisted vat photopolymerization 3D printing of preferentially organized carbon fiber reinforced polymer

- composites". *J Manuf Process* 2020;56:1340–3. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.029>.
65. **Sachyani Keneth E, Kamyshny A, Totaro M, Beccai L, Magdassi S.** 2020."3D Printing Materials for Soft Robotics". *Adv Mater* 2020:2003387. <https://doi.org/10.1002/adma.202003387>.
 66. **Pazhamannil RV, Govindan P.** 2021."Current state and future scope of additive manufacturing technologies via vat photopolymerization". *Mater Today Proc* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.225>.
 67. **Momeni F, M.Mehdi Hassani.N S, Liu X, Ni J.** 2017."A review of 4D printing". *Mater Des* 2017;122:42–79. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>.
 68. **Kuang X, Roach DJ, Wu J, Hamel CM, Ding Z, Wang T, et al.** 2019."Advances in 4D Printing: Materials and Applications". *Adv Funct Mater* 2019;29:1805290. <https://doi.org/10.1002/adfm.201805290>.
 69. **Zhao Z, Kuang X, Yuan C, Qi HJ, Fang D.** 2018."Hydrophilic/Hydrophobic Composite Shape-Shifting Structures". *ACS Appl Mater Interfaces* 2018;10:19932–9. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02444>.
 70. **Bassi L.** 2017.Industry 4.0: Hope, hype or revolution? 2017 IEEE 3rd Int. Forum Res. Technol. Soc. Ind., IEEE; , p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTSI.2017.8065927>.
 71. **Almada-Lobo F.** 2016."The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES)". *J Innov Manag* 2016;3:16–21. https://doi.org/10.24840/2183-0606_003.004_0003.
 72. **Ungureanu A.** 2019."Industry 4.0. the Role of Gig Economy in the Industrial Revolution of the 21St Century.". *USV Ann Econ Public Adm* 2019;19:77–84.
 73. **Haleem A, Javaid M.** 2019."Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review". *J Ind Integr Manag* 2019;04:1930001. <https://doi.org/10.1142/s2424862219300011>.