



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme

 İdris KARAGÖZ^{a,*},  Ayşe DANIŞ BEKDEMİR^b,  Özlem TUNA^c

^a Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE

^b Bilgisayar Destekli Tasarım ve Animasyon Bölümü, Plato Meslek Yüksekokulu, İstanbul Ayyansaray Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

^c Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: idris.karagoz@yalova.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.877423

ÖZ

Günümüzün umut vadeden teknolojisi olarak eklemeli imalat (Eİ) veya 3B yazıcı teknolojileri farklı alanlarda kullanılabilir ürünlerin/parçaların üretilmesi konusunda dikkatleri üzerine çekmektedir. 3B yazıcı teknolojileri ile farklı malzemeler kullanılarak istenilen mekanik ve yapısal özelliklere sahip parçalar üretilmektedir. Bu teknolojiler geleneksel üretim yöntemlerine göre parça tasarımında esneklik, üretim sürecinde ise malzeme, enerji ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Bu çalışmada, 3B yazıcı teknolojileri, Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından yapılan sınıflandırma temel alınarak yedi ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Eİ yöntemleri çalışma prensibi ve kullanılan malzeme türü dikkate alınarak anlatılmış ve 3B yazıcılar ile yapılan çalışmalar incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, 3B yazıcı teknolojilerinde polimerler, metal ve alaşımları, seramikler ve kompozit malzemelerin hammadde olarak kullanılabilirliği ve baskı sonrası ikincil işlemler ile oldukça yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların üretilbildiğini göstermektedir. Diğer yandan, 3B baskı teknolojilerinin otomotiv, savunma, havacılık ve demiryolu taşımacılığı da dahil olmak üzere çok çeşitli endüstriyel sektörlerde kolayca prototip oluşturma ve bileşenlerin üretiminde yeni ufuklar açacağı beklenmektedir. Ancak 3B teknolojilerinde kullanılan malzeme sayısı şu an için oldukça sınırlıdır ve çalışmalar bu teknolojilerde kullanılabilir yeni malzemelerin araştırılması üzerine yoğunlaşmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, 3B yazıcılar, 3B teknolojisi, Yenilikçi malzemeler

A Review of Used Methods and Developments in 3D Printer Technologies

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) or 3D printer technologies, as today's promising technique, has been drawn attention to the production of innovative products/parts that can be used in various fields. It can produce materials with desired mechanical and structural properties with 3D technologies. As compared to traditional production methods, the promising technology provides flexibility in product design, and contributes to increase material, energy, and cost efficiency in manufacturing system. Herein, 3B printer technologies are divided into seven different groups according to the American Society for Testing and Materials (ASTM) classification. AM methods are explained by considering working principles, and the type of material, as well as studies conducted with 3B printers using these methods were examined. This study shows that in 3D printer technologies, polymers, metals and alloys, ceramics and composite materials can be utilized as raw materials and post-printing

secondary processes promote to produce parts with excellent mechanical properties. On the other hand, the technologies have been expected to open new horizons for easily creating prototypes and production of components using plastics, metals, metal alloys and ceramic materials used in a wide range of industrial sectors, including automotive, defence, aerospace, and rail transport. Nowadays, the number of raw materials for 3D technologies are limited and, recent studies should be directed to investigate new materials.

Keywords: Additive manufacturing, 3B printer, 3B technology, Innovative materials

I. GİRİŞ

3B (Üç Boyutlu) yazıcılar günümüz teknolojisinin en önemli mühendislik ürünlerinden biridir. İlk kez 1984 yılında Dr. Charless Hull tarafından geliştirilen 3B yazıcı teknolojisi, 2006 yılına kadar yalnızca hızlı prototipleme alanında kullanılmıştır [1]. 2006 yılında Reprap ve Fab@home projesi ile tekrar gündeme gelmiş, endüstri 4.0, bilgisayar destekli tasarım programları ve malzeme bilimindeki gelişmelerle birlikte yöntem kullanım açısından daha geniş kitlelere ulaşmıştır [2],[3].

3B yazıcı teknolojisinin temel mantığını, CAD/CAM (Bilgisayar Destekli Tasarım/Bilgisayar Destekli Üretim) programları kullanılarak sanal ortamda üç boyutlu tasarlanmış olan objelerin, amaca uygun farklı tür malzemelerin kullanılmasıyla iki boyutlu bir düzlem üzerinde üst üste ince katmanlar şeklinde yığılarak somut bir obje haline getirilmesi oluşturmaktadır. CAD/CAM programlarında tasarlanan parçalar “.stl” (stereoligrafi) uzantısıyla dışa aktarılır ve Şekil 1’de gösterildiği gibi 3B yazıcılarda değeri olan bir ürüne dönüştürülürler [3],[4]. Ürüne son şeklini vermek için, kullanılan 3B yazıcı teknolojisi ve malzemeye göre veya istenilen ürün özelliğine göre (renklendirme, parlatma, mukavemet artırma, yüzey düzeltme, gerilim giderme vb.) imalat sonrası ek işlemler uygulanabilir [5]. 3B yazıcılarla yapılan üretim eklemeli imalat (Eİ) teknolojileri olarak da isimlendirilmektedir. Eİ yöntemiyle üretilmiş bir parçada, talaşlı imalat, döküm, kaynak [6],[7] vb. diğer geleneksel yöntemlerle yapılan üretime oranla hammaddeden %90 oranında tasarruf yapılabilmektedir [2].



Şekil 1. 3B yazıcılarla tasarım ve üretim [6]

3B yazıcı teknolojileri, üretim paradigması ve üretim imkanları açısından endüstriyel anlamda, yeni tasarımların pazara daha hızlı sürülmesi, üretim sürelerinin ve maliyetlerinin azaltılması, müşteri talebinin daha hızlı karşılanması gibi yeni fırsatlar sunmaktadır [9]. Son yıllarda pek çok şirketin 3B yazıcı teknolojilerini benimsediği ve sunduğu avantajlardan faydalanmaya başladığı bilinmektedir. Wohlers tarafından 2014 yılında yayınlanan bir rapora göre; 2013 yılında dünya çapında 3,07 milyar dolarlık bir pazara sahip olan Eİ teknolojilerinin 2021 yılında 25 milyar doların üzerine çıkması beklenmektedir [10]. Bu konuda çalışan uzmanlar; Eİ yöntemlerinin gelecekte geleneksel üretim süreçlerinin yerini alacağını düşünmüyor ancak bu süreçleri tamamlayıcı bir unsur olarak görüyorlar. Gelişen teknolojiyle birlikte, Eİ yöntemlerinin son zamanlardaki uygulamalarının günlük yaşamdaki pek çok şeyi kökten değiştireceği görüşünde birleşiyorlar [5]. Özellikle firmaların ekonomik bir şekilde az adetlerde, kişiselleştirilmiş özel ürünler yapmasına imkân vermesi, gelecekte üretim açısından çok farklı teknolojileri ve lojistik gereksinimleri de ortaya çıkaracaktır [4]. Günümüzde 3B yazıcılar havacılık, otomotiv, medikal ve tıp uygulamaları, kalıpcılık uygulamaları, nano kompozit üretimi, enerji sektörü, inşaa sanayi, tekstil, gıda sanayi, eğitim, sanat ve hobi uygulamalarına kadar çok

geniş bir alanda kullanılmaktadır [11],[12]. 2020 yılında Amerikan şirketlerinin %42'sinin üretimde 3D yazıcıları kullandığı tahmin edilmektedir [13].

Eİ teknolojileri kullanılmaya başlandığı ilk yıllara oranla 2006 yılından itibaren çok daha hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir [2],[13]. Kişiselleştirilmiş özel ürünlerin ve karmaşık geometrideki parçaların üretilmesi, daha özgün tasarımların ortaya çıkması ve bunların dijital olarak paylaşılabilmesi, tasarımın farklı üretimin farklı yerlerde/ülkelerde yapılabilmesi, ürün iyileştirmelerinin hızlandırılabilmesi, daha hızlı teslimat ve daha az stok tutulması, tasarım serbestliği sağlanması, atık malzeme miktarını azaltması, geri dönüştürülebilir malzeme kullanılması, lojistiği kolaylaştırması, tasarım ve üretim arasındaki uyum, kalıba ihtiyaç duyulmaması, üretim öncesi ürün maliyetlerinin üretim süresi ve kullanılan malzeme miktarına bağlı olarak hesaplanabilmesi, zaman ve maliyet tasarrufu sağlanması Eİ yöntemlerinin en büyük avantajlarıdır [12],[13],[14].

Eİ yöntemlerinin sahip olduğu bu benzersiz avantajların yanında bazı dezavantajları ve zorlukları da mevcuttur. Eİ yöntemiyle üretilmiş parçalardaki mekanik anizotropi, homojen olmayan mikro yapı, parçanın üretimi esnasında ısıtma ve soğutmaya bağlı oluşan ve parça performansını etkileyen iç gerilmeler, bazı Eİ yöntemlerinde üretim sonrası parça yüzeylerine ek yüzey işlem uygulama gereksinimi, işlem hızının kritik olması, Eİ yöntemlerinin dezavantajlarından bazılarıdır. Eİ yönteminde kullanılan teknolojiye bağlı olarak henüz tam olarak çözülemeyen bazı sınırlılıklar da söz konusudur. Bu sınırlılıklar; (i) malzeme, renk ve yüzey özellikleri açısından seçeneklerin sınırlı olması, (ii) üretilen parçaların sıcaklık, nem ve kırılma dayanımının az olması, (iii) 3B yazıcıda üretilen parça boyutu büyüdükçe parça maliyetinin katlanarak artması, (iv) talaşlı imalat vb. diğer üretim yöntemlerine oranla boyutsal hassasiyetin daha düşük olması ve orijinal boyutlarda üretim zorluğu, (v) 3B yazıcı fiyatlarının yüksek olması, (vi) CAD dosyalarının/tasarımların izinsiz çoğaltılma ihtimali şeklinde ifade edilebilir [11],[14].

3B yazıcılarla birlikte polikarbonat (PC), akrilonitril-bütadien-stiren (ABS), poli(fenilen sülfon) (PPSU), PC-ABS karışımları, polilaktik asit (PLA), poliamid (PA), polipropilen (PP), polistiren (PS), ultraviyole (UV) ile sertleşen reçineler, vakslar, köpük ve toz şeklindeki polimerler, karbon fiber, alüminyum (Al) katkılı PA, paslanmaz çelik, Al, bakır (Cu), demir (Fe), nikel (Ni) ve kobalt (Co) bazlı alaşımlar, seramik tozları, silika, kum, grafit, Al₂O₃, alçı vb. malzemeler halihazırda kullanılmaktadır. Son yıllarda 3B yazıcılar için malzeme geliştirme konusunda yapılan çalışmalarla birlikte, parça üretiminde kullanılan malzeme sayısı giderek artmaktadır [11]. 3D yazıcılar için filament üretimi yapan firmalar, kullanım oranları, maliyetler, talep sıklığı gibi durumları dikkate alarak çok kullanılan belirli renkleri stoklarında tutmaktalar. Bu da farklı renk isteyen kişi ya da şirketler için bir sınırlılık oluşturmaktadır. Gelecekte 3B yazıcı fiyatlarının ucuzlaması ve bireysel kullanımın/parça üretiminin yaygınlaşmasıyla birlikte daha fazla sayıda renk seçeneğinin kullanıcıya sunulacağı ve bu sınırlamanın da kalkacağı düşünülmektedir. Ancak 3B yazıcılarda bireysel kullanımın artması fikri mülkiyet haklarındaki ihlalleri de arttıracaktır. Fikri mülkiyet haklarındaki bu ihlallerin, 3B yazıcılarla parça üretiminde yeni yasal düzenlemeleri de beraberinde getireceği ön görülmektedir.

Üretilen ürüne ve kullanılan teknolojiye bağlı olarak ürün/parça üretiminde çok farklı Eİ yöntemleri ve malzemeler kullanılmaktadır. Bu durum şirketler ve bireysel kullanıcılar için Eİ yöntemi seçiminde yeni bir zorluk seviyesi oluşturmaktadır. Parça geometrisinin karmaşıklığı, yöntemde kullanılan malzemelerin seçimi, 3B yazıcı ve CAD modellerinin uyumu ve hala çözüm bekleyen diğer teknik konular derinlemesine bir çalışmayı gerektirmektedir [15]. Yukarıda bahsedilen çalışmalardan da anlaşılacağı gibi, elektrik-elektronik, otomotiv, inşaat, taşımacılık, uzay ve havacılık uygulamalarından, doku ve yapay organ üretimine kadar çok farklı alanlarda 3B teknolojisi kullanılarak üretilmiş ürünlerin gelecekte daha yoğun bir şekilde kullanılacağı ve üretimde 3B teknolojilerini kullanan firmalara çok büyük avantajlar sağlayacağı görülmektedir. Ülkemizde 3B teknolojilerindeki son gelişmeleri ele alan ve inceleyen yeterli sayıda çalışma yoktur. Genellikle çalışmalar belli alanlara yoğunlaşmakta ve spesifik olarak kalmaktadır. İmalat yöntemleri, gelişen yeni teknolojilere bağlı olarak çok hızlı bir değişim göstermektedir. Bu nedenle son gelişmelerin ele alındığı, bu konuda çalışan ve konuya ilgi duyanlar için bir kaynak olarak bu çalışmanın yapılması, bu

konuda kaynak anlamında bir eksikliğin giderilmesine katkı sağlayacaktır.

Gündelik hayatta 3B yazıcı terimi Eİ yöntemleriyle aynı anlamda kullanılmaktadır [12]. Eİ yönteminde kullanılan makine ve malzemeye göre uygulanan prosesler ve Eİ yöntemlerinin çalışma prensipleri farklılık göstermektedir. Bu çalışmada; 3B yazıcı teknolojilerindeki son gelişmeler mevcut çalışmalar doğrultusunda gözden geçirilecek ve kullanılan proses, malzeme ve teknolojiye göre yöntemler sınıflandırılacaktır. Bu çalışma ile 3B yazıcı teknolojilerindeki kullanılan yöntemlerin ve son gelişmelerin incelenerek Türkçe bir kaynak oluşturulması amaçlanmaktadır.

II. GÜNÜMÜZDE YAYGIN KULLANILAN 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Literatürde 3B yazıcı teknolojileriyle ilgili olarak çok farklı sınıflandırma yöntemleri mevcuttur [16]. 3B yazıcı teknolojilerindeki proses farklılıkları, kullanılan makine ve malzemelere bağlı olarak Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından, 2010 yılında Tablo 1'dekine benzer şekilde; 1- Fotopolimerizasyon, 2- Malzeme ekstrüzyonu, 3- Malzeme püskürtme, 4- Yapıştırıcılarla katmanlı imalat, 5- Toz yataklı eritme, 7- Yönlendirilmiş enerji biriktirme ve 6- Levha/Sac laminasyonu olmak üzere yedi ana kategoride bir sınıflandırma yapılmıştır [17]. Bu çalışmada ASTM tarafından yapılan sınıflandırma temel alınmıştır.

Tablo 1. Ekleme imalat yöntemlerinin sınıflandırılması [1],[18]

S. No	Tip	Proses	Teknoloji	Malzeme
1	Fotopolimerizasyon	Lazerle sertleştirme	Stereolitografi (SLA)	-UV ile sertleşen reçineler -Vakslar -Seramikler
		Projektörle sertleştirme	Dijital ışık işleme (DLP)	
		LED ve oksijenle sertleştirme	Aralıksız dijital ışık işleme (CDLP)	
2	Malzeme ekstrüzyonu	3B Yazıcı	Eriyik yığma modelleme (FDM)	-Termoplastikler -Vakslar
		UV ışıkla ile sertleştirme	Malzeme püskürtme (MJ)	-UV ile sertleşen reçineler
3	Malzeme püskürtme	Isı ile sertleştirme	Nanopartikül püskürtme (MPJ)	-Metaller
		Kesici ile şekillendirme	DOD (İstek üzerine bırakma)	-Vakslar
4	Yapıştırıcılarla katmanlı imalat	Bağlayıcı madde ile birleştirerek	Yapıştırıcı ile katmanlı imalat (BJ)	-Alçı -Kum -Metaller
5	Toz yataklı eritme	Madde ve enerji ile eritme	Multijet eritme (MJF)	-Termoplastikler
		Lazer ile sertleştirme	Seçici lazer sinterleme (SLS)	-Metaller
		Elektron ışınıyla eritme	Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) Seçici lazer sinterleme (SLM)	
6	Yönlendirilmiş enerji biriktirme	Lazer ile eritme	Lazer toz şekillendirme (LENS)	-Metaller
		Elektron ışınıyla eritme	Elektron ışın eklemeli imalat (EBAM)	

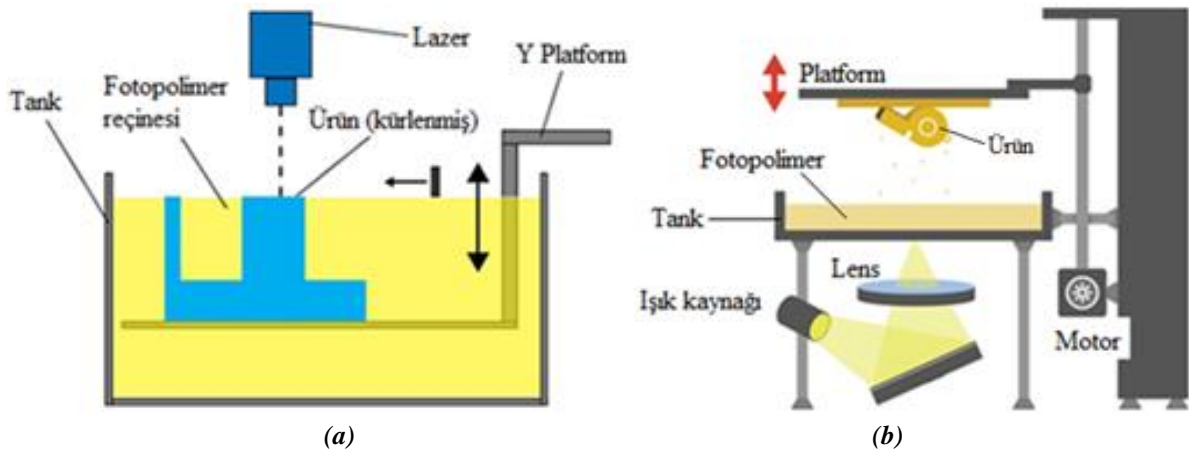
Tablo 1 (devam). Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması [1],[18]

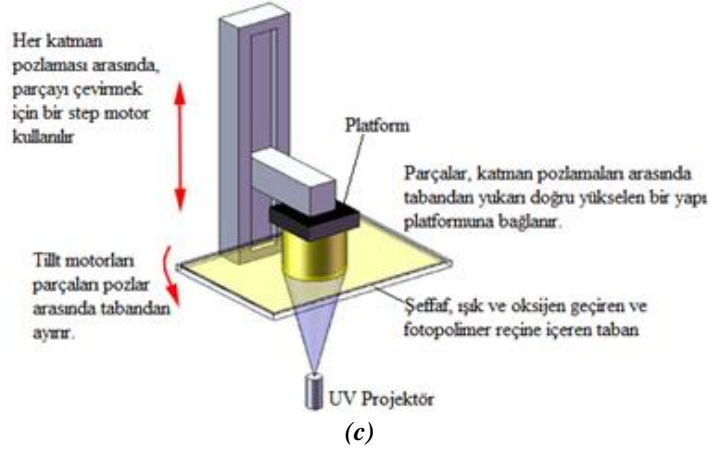
7	Levha/Sac laminasyonu	Tabakalı obje üretimi (LOM)	-Termoplastikler -Kompozitler -Kâğıt
---	-----------------------	-----------------------------	--------------------------------------------

A. FOTOPOLİMERİZASYON (VAT PHOTOPOLYMERIZATION)

Fotopolimerizasyon prosesinde sıvı, radyasyonla kürlenene reçineler ve fotopolimerler birincil malzemeler olarak kullanılmaktadır. Çoğu fotopolimer malzemeler, UV dalga boyunda radyasyona tepki verir. Benzer şekilde bazı ışık kaynakları da bu amaçla kullanılmaktadır. Işınlama ile bu malzemeler kimyasal reaksiyona girerek katı hale gelirler. Bu reaksiyona fotopolimerizasyon denir [19]. Fotopolimerizasyon yöntemi ilk kez Charles Hull tarafından 1984 yılında stereolitografi yöntemi (SLA) kullanılarak geliştirilmiştir [1]. Fotopolimerizasyon yönteminde, stereolitografi (SLA), dijital ışık işleme (DLP) ve aralıksız dijital ışık işleme (cDLP) olmak üzere, Şekil 2’de gösterildiği gibi üç farklı teknik kullanılmaktadır.

SLA yönteminde modeli katman katman inşa eden bir sıvı fotopolimer reçinesi kullanılmaktadır. Gerektiğinde reçineyi iyileştirmek veya sertleştirmek için bir ultraviyole lazer ışık kullanılmaktadır. Oluşturulan katmanlar, sonrasında parça tamamlanmaya kadar kürlenmektedir. Şekil 2a’da gösterildiği gibi; sistemde bir platform her yeni katman kürendikten sonra, oluşturulan modeli sonraki katman için aşağıya doğru hareket ettirmektedir [20]. Kalan reçine tekrar kullanılabilir. Bu nedenle proses tamamlandığında, reçinenin kirlenmemesi için model reçineden çıkartılmalı ve fazla reçine tanktan boşaltılmalıdır. SLA yönteminde, saatte 1-3 cm katman oluşturacak şekilde üretim hızı yüksektir. Minimum tabaka kalınlığı sertleşme derinliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Tabaka kalınlığı, kürlenme süresi vb. proses parametreleri üretilen parçanın mekanik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır [21]. Proses parametrelerinin optimizasyonu veya reçineye nano dolguların eklenmesiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Weng ve ark. [22] tarafından SLA reçinesine yüzeyi modifiyeli nano dolgular ilave edilmiştir. Araştırmacılar ağırlıkça %5 SiO₂ ilavesinin sertleşme hızını arttırdığı ve parçanın mekanik özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, SLA yöntemiyle nano kompozitlerin üretilebileceğini göstermiştir. Onuh ve Han [23] çalışmalarında parametre optimizasyonu ile yapılan üretimlerde, parçaların daha hızlı bir şekilde üretilebileceği, üretim maliyetlerinin azalacağını ve çok iyi yüzey kalitesine sahip ürünler elde edilebileceğini belirtmişlerdir.



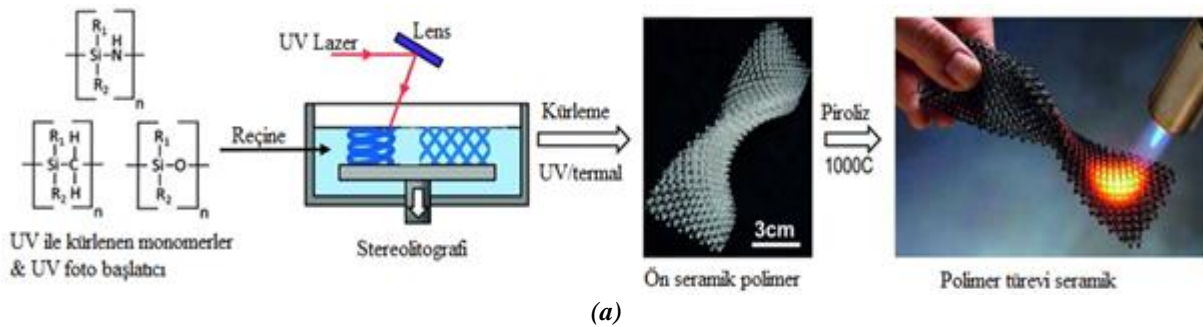


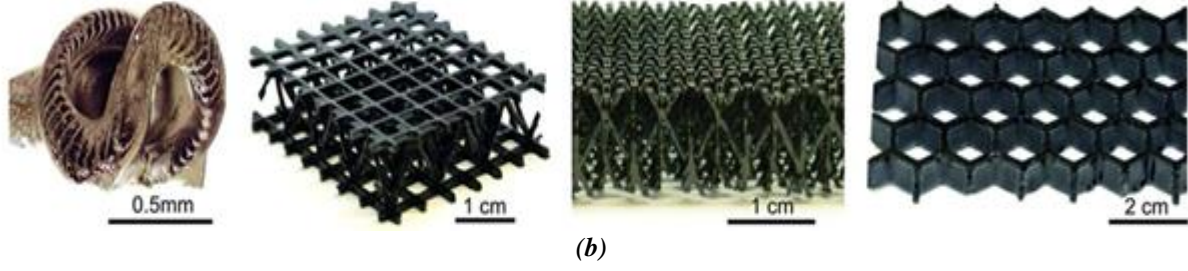
Şekil 2. Fotopolimerizasyon prosesleri, (a) SLA [20], (b) DLP [24], (c) cDLP [25]

SLA yöntemiyle üretilen ürünlerin yüzey kalitesi ve ölçü tamlığı oldukça iyidir. West ve ark. [26] göre; üründe istenen yüzey kalitesi, boyutsal ve geometrik toleranslarının elde edilmesinde, parça oryantasyonu, tabaka kalınlığı, z-seviyesi bekleme süresi, tarama süresi, taramaların (ince çizgilerin) aşırı kürlenmesi ve parçanın tamamının aşırı kürlenmesi gibi altı temel proses değişkeni etkili olmaktadır. Araştırmacılar, bu proses parametrelerinin doğru bir şekilde ayarlanmasının istenilen amaca ulaşmada kilit faktör olduğunu belirtmişlerdir.

SLA yönteminde, modeli oluşturmak için sıvı malzeme kullanıldığından, toz esaslı yöntemlerin aksine, üretim esnasında malzemeye yapısal bir destek yoktur [1]. SLA yöntemiyle üretilmiş parçaların yapısal uygulamalarda kullanılabilmesi için, modele destek yapılar eklenmeli ve post kürlenme işlemi yapılmalıdır [20]. Ancak kaliteli bir ürün için, proseste fotopolimer reçinesi ve destek yapılar arasında boşluklar oluşmamasına dikkat edilmelidir. Proses sonrası destekler bir bıçak ya da keskin bir alet yardımıyla reçineden ayrılmalıdır. Ayrılma sonrası model önce alkolle sonra su ile durulanmalıdır. Durulama sonrasında model hava tabancasıyla ya da normal havada kurutulmalıdır [20]. Yöntemin aşırı ısınma, taranmış çizgi şekli, yüksek ekipman ve malzeme maliyetleri gibi dezavantajları vardır. Bu teknoloji doğası gereği fotopolimerizasyona bağlıdır, bu nedenle fotopolimerler ile sınırlıdır [1]. Ancak farklı araştırmacılar tarafından bu teknik kullanılarak seramik bileşenlerde SLA yöntemiyle işlenmiştir [27],[28],[29],[30],[31].

Şekil 3'te SLA prosesiyle üretilmiş polimer türevi seramiklere örnekler verilmiştir. Ön seramik polimerin sahip olduğu konfigürasyon (Şekil 3a), piroliz sonrası (Şekil 3d) seramiğin bileşimini, mikro yapısını ve verimini etkiler. Fotopolimer reçinenin bağ yapısı, molekül ağırlığı ve sahip olduğu özellikler bu durum üzerinde etkilidir. Piroliz sırasında düşük moleküler kütle türlerinin kaybının önlenmesi için polimer molekülleri arasında yüksek bir çapraz bağlanma gereklidir. Polimere Silan bileşiklerinin eklenmesi tipik olarak oksijen miktarını azaltacağı için yapıda SiC oranı artacaktır. Şekil 3'te verilen örneklerde (Şekil 3e, Şekil 3f, Şekil 3g, Şekil 3h) çok farklı geometrilere sahip polimer türevi seramik parçaların SLA yöntemiyle üretilebileceği görülmektedir.





Şekil 3. (a) SLA prosesi, (b) Polimer seramik karışımlarıyla üretilmiş ürün örnekleri

DLP yönteminde ışık kaynağı (projektör) tankın altında konumlandırılmıştır. Model deseni oluşturmak için yansıtma yöntemi kullanılır. Işık, yarı iletken bir çip üzerindeki bir matriste yerleştirilen mikroskobik boyutlu aynalardan oluşan dinamik bir maske olan Dijital Mikro Ayna Cihazı (DMD) üzerine yansır. Işığı tankın dibine veya bir ısı emiciye doğru yönlendiren mercekler arasında bu küçük aynalar hızla değiştirilerek, reçinenin verilen katman içinde kürlendiği koordinatlar tanımlanır [33]. Işık, monomer veya oligomer fotopolimer reçineyi tankın altındaki transparan yüzeyden geçerek kürleştirmektedir. Sıvı reçine tank içerisinde olduğundan DLP yönteminde atık oluşmaz ve ışık kullanımı nedeniyle üretim hızı yüksektir. Sıvı bileşen parçanın ağırlığını desteklemiyorsa SLA prosesinde olduğu gibi destek yapılar kullanılabilir. SLA ve DLP proseslerini farklı kılan ışık kaynağıdır [20]. Valentinčić ve ark. [34] göre, DLP prosesinde aydınlatmanın yönü kilit bir role sahiptir. DLP projektörünün eşit olmayan şekilde aydınlatılması, daha küçük kullanılabilir çalışma alanı ve daha düşük bir baskı kalitesi sağlar. Bir yazılım ara yüzü ile aydınlatmada karşılaşılan bu problem giderilebilir. Ancak bu durum pozlama süresini arttırabilir. Borlaf ve ark. [35], son yıllarda ışığa duyarlı seramik çamur karışımlarının hazırlanmasıyla birlikte, yüksek çözünürlüklü, karmaşık geometrilere ve iyi mekanik özelliklere sahip seramik malzemelerin DLP yöntemiyle üretildiğini belirtmişlerdir. DLP yöntemi şematik olarak Şekil 2b’de gösterilmiştir. SLA ve DLP yöntemi prensipte benzer olmasına rağmen, her iki teknolojiye Şekil 4’de gösterildiği gibi değişken çıktılar üretebilir.

cDLP prosesinde, oksijen geçirgen şeffaf bir tabandan (mercekler) ışın demetinin sıvı reçine içerisine yansıtılması tekniği kullanılmaktadır (Şekil 2c). Ardışık çalışan ışık ve oksijen, reçinenin katılaştırılmasını kontrol ederek modeli oluşturmaktadır. Yöntemle mekanik özellikleri iyi ve yüksek çözünürlüklü parçalar üretilmektedir. cDLP prosesi, DLP teknolojisinin çalışma mantığıyla benzerdir [24]. SLA ile DLP ve cDLP arasındaki en belirgin fark donanımdır [25]. SLA prosesinde parça reçineye doğru aşağı yönlü hareket ederken, DLP ve cDLP prosesinde ise reçineden yukarı doğru çekilmektedir. SLA prosesinde kullanılan cihazların UV lazeri, cDLP prosesinde kullanılan lamba tabanlı sistemden altı kat daha fazla güç üretmektedir. SLA prosesinde saniyeler içerisinde oluşturulan katmanlar, cDLP prosesinde çok daha uzun pozlama süreleri nedeniyle dakikalar almaktadır. Bunun için cDLP prosesinin üretim hızı SLA prosesine göre oldukça düşüktür [25]. Pan ve ark. [36] uzun pozlama süresinin, proses sırasında yapı formunun şeffaf taban plakasına yapışmasına neden olabileceğini belirtmiştir. Dean ve ark. [37] göre, bu yapışma baskı işleminin bozulmasına yol açan delaminasyona neden olabilir. Bu nedenle taban plakasının bir sonraki katın polimerizasyonundan önce akması gereken polimeri aktif olarak itmemesi önemlidir.

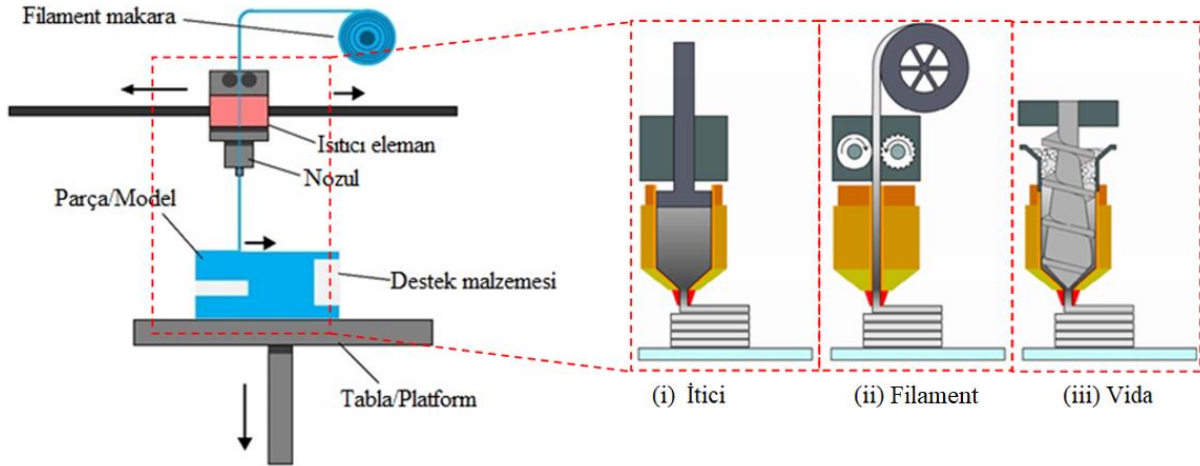
cDLP prosesinde fotopolimerlere ek olarak, nano parçacıklar veya seramikler gibi dolgu maddeleri içeren bulamaç reçineleri de fotokimyasal kürlleme yöntemiyle kullanılabilir. cDLP’de kullanılan 3B baskı malzemesi tipik olarak ışığa duyarlı oligomerler, seyreltici ve foto başlatıcılardan oluşan düşük viskoziteli bir reçine olarak formüle edilir. Seyrelticinin birincil amacı, reçinenin viskozitesini azaltmaktır. Shin ve Becker [38] ticari reçine formülü gizli kalsa da kullanılan seyrelticinin oligomerin monomerik alt birimine benzediğini belirtmiştir. Dean ve ark. [25] göre, seyreltici kullanımı katmanlar arasında boşluk oluşumunu önleyebilir. Seyreltici, reçinenin büyük bir bölümünü oluşturduğu için, birleştirilmemiş artıkların, 3B baskıdan sonra iyileştirilmesi veya yıkanması gerekmektedir.



Şekil 4. SLA ve DLP yöntemiyle üretilmiş parçaların karşılaştırılması [33]

B. MALZEME EKSTRÜZYONU (MATERIAL EXTRUSION)

Stratasys şirketinin kurucu ortağı olan Scott Crump, 1998’de erimiş termoplastik malzemeyi mekanik olarak bir alt katmana ekstrüde ederek katmanlar oluşturan bir eklemeli imalat yöntemi geliştirdi [1]. Eriyik Yığılma Modellemesi (FDM) olarak isimlendirilen bu yöntemde; filament şeklindeki malzeme, ısıtılmış bir nozuldun çekilmekte ve nozulun ısısıyla eriyen malzeme, Şekil 5’te görüldüğü gibi tabla/platform üzerine katmanlar şeklinde eklenerek model oluşturulmaktadır [39]. Sitemde yer alan nozul, yatay olarak hareket edebilir ve her yeni tabaka eklendikten sonra bir platform dikey olarak yukarı ve aşağı hareket ederek diğer katmanların oluşturulmasını sağlar [20].



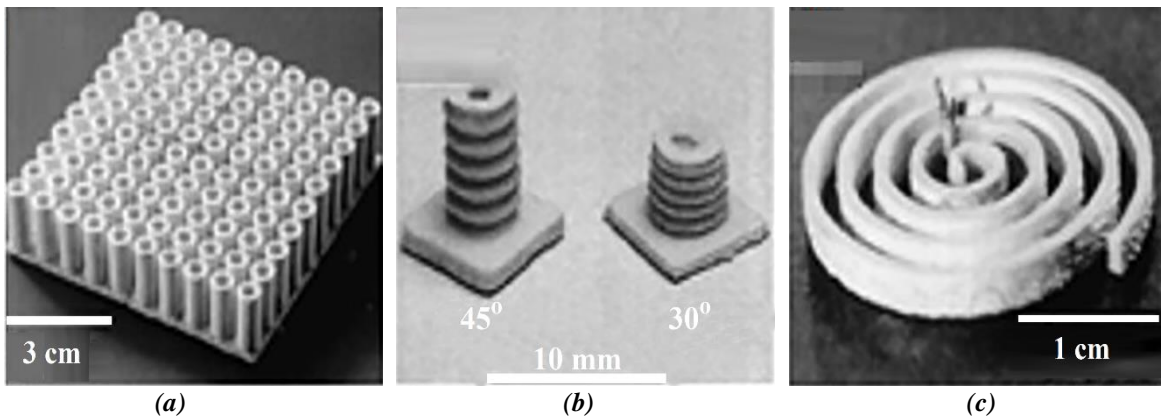
Şekil 5. FDM yöntemi şematik gösterim [20],[40]

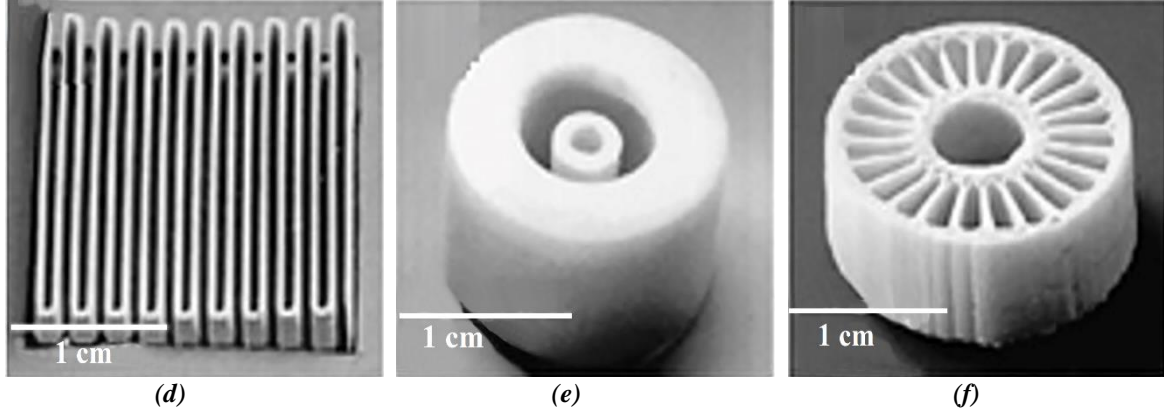
Proseste, nihai model kalitesini etkileyen birçok parametre mevcuttur. İstenilen özelliklerde ürünlerin üretilebilmesi, proseste bu parametrelerin kontrol edilmesine bağlıdır. Yadav ve ark. [41], FDM yönteminde, çekme mukavemetinin ekstrüzyon sıcaklığı ve katman yüksekliğinden etkilendiği ancak ekstrüzyon sıcaklığının çekme mukavemeti üzerinde katman yüksekliğinden daha etkili olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından, belli bir sınır değere kadar, daha yüksek ekstrüzyon sıcaklıklarının, çekme mukavemetini artırdığı rapor edilmiştir. FDM yönteminde model katman katman oluşturduğundan, üretilen ürünün özellikleri malzemenin bir nozuldun sabit basınç altında ve

sürekli bir akışta eklenmesine göre de değişiklik göstermektedir. Başarılı bir proses için basınç ve malzemenin akış hızı sabit tutulmalıdır. Ürün yüzey kalitesi, nozul çapı ve son işlemlere göre değişiklik göstermektedir. Alsoufi ve Elsayed [42], nozul çapı ve katman yüksekliğinin, üretim süresi ve parça maliyetini etkilediğini ve dış yüzeylere oranla yüzey pürüzlülüğünün iç yüzeyler de daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek toleranslara sahip parçaların üretiminde, yer çekimi ve malzemelerin yüzey gerilimi de hesaba katılmalıdır.

Proseste sıcaklığın doğru ayarlanması da oldukça önemlidir. Yöntem kullanılan termoplastik malzemenin türüne bağlı olmakla birlikte yüksek çalışma sıcaklıkları gerektirmektedir. Modeli oluşturan katmanlar, sıcaklığın kontrol edilmesi veya kimyasal ajanların kullanımı ile doğru bir şekilde birleştirilebilir. FDM yöntemiyle üretilmiş ürünler, tipik olarak yüksek gözenekliliğe sahiptir ve parçanın soğutma prosesi, üretilen parçanın çarpılma oranı ve gözeneklilik üzerinde oldukça etkilidir. Benzer şekilde, yapı platformu, bölmeler ve katmanlar arasındaki sıcaklık farklılıkları, katmanların birbirine bağlanması, katkı ve dolgu maddeleri ilavesi vb. de parçanın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynar [43]. Weng ve ark. [44] ABS filamente ağırlıkça %5 montmorillonit ilavesiyle çekme mukavemetinin %43 oranında iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Aynı ürünün enjeksiyon yöntemiyle yapılan üretiminde ise, çekme mukavemeti %28,9 oranında artmıştır. Araştırmacılar, bu yeni ABS nano kompozitlerin daha iyi termal ve mekanik özellikler gösterdiği ve 3B yazıcılar için umut verici bir gelişme olduğunu belirtmişlerdir. Akhoundi ve ark. [45], mekanik özelliklerin sürekli elyaf takviyesi ile iyileştirilebildiğini ve kullanılan takviye elamanının türüne göre farklı mekanik değerlerin elde edilmesinin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Akhoundi ve Behravesht [46], katmanlar arasındaki zayıf bağlanmaların mekanik özellikleri düşürdüğünü ve bu zayıf bağlantıların dolgu maddeleri ile iyileştirilebileceğini belirtmiştir. Araştırmacılara göre, kullanılan dolgu ve katkı maddesinin oranı ve üründeki desen şekli mekanik özellikleri büyük oranda etkilemektedir.

Yöntem ucuz olması, üretim sonrası kimyasal bir işlem gerektirmemesi, ekipmanların kolay kullanılabilmesi ve esnek ekstrüzyon sistemlerine sahip olması nedeniyle, evde kendi tasarladığı ürünü somut bir nesneye dönüştürmek isteyenler için, günümüzde oldukça popüler bir teknoloji haline gelmiştir. Enjeksiyonla kalıplamaya göre FDM yöntemi oldukça pahalıdır. Ancak üretim adedi az olan parçaların FDM yöntemiyle üretilmesi, enjeksiyon kalıplama yöntemine göre oldukça ekonomiktir [20],[47]. Atık oluşturmaması, esnek bir teknoloji olması, kullanım kolaylığı, ucuz ve çevre dostu olması, karmaşık geometriye ve boşluklara sahip parçaların kolayca üretilebilmesi yöntemin en önemli avantajlarından [48]. Üretim hızı, malzeme yoğunluğu ve üretilen parçaların doğruluğu yöntemin öne çıkan dezavantajlarıdır. Üretilen parçanın şekli, nozul çapı, üretim hızındaki iniş ve çıkışlar, malzemenin viskoelastik davranışına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [49]. Şekil 6'da FDM yöntemiyle üretilmiş farklı geometri ve tipteki dönüştürücü örnekleri verilmiştir. FDM yönteminde yaygın olarak, PC, ABS, poli(fenilen sülfon) (PPSU), PC-ABS karışımları, PLA gibi termoplastik malzemeler kullanılmaktadır [44],[50]. Ancak seramik ve metal karışımlarında işlenmesi, iyi mekanik ve tasarımsal özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretilmesi için çalışmalar devam etmektedir [1],[51].

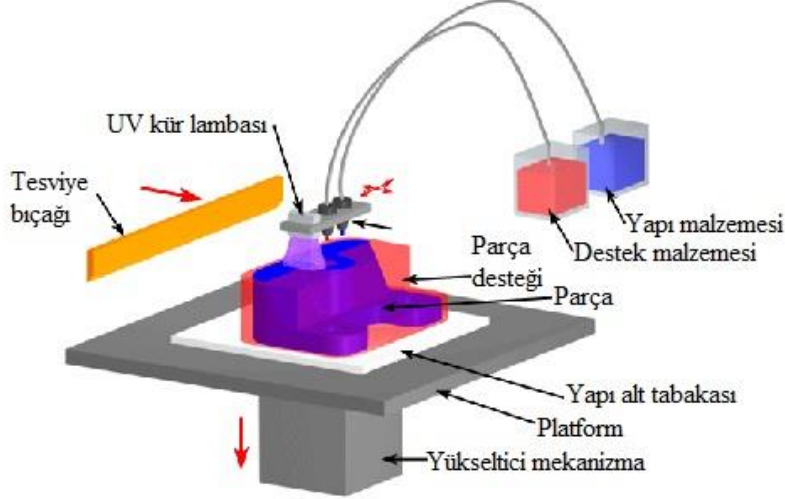




Şekil 6. FDM yöntemiyle üretilmiş farklı tipteki dönüştürücü örnekleri, (a) Tüp dizilişi, (b) Körükler, (c) Spiral, (d) Kavisli, (e) İç içe geçmiş, (f) Radyal aktüatörler [52]

C. MALZEME PÜSKÜRTME (MATERIAL JETTING)

Malzeme püskürtme, iki boyutlu mürekkep püskürtmeli yazıcıya benzer bir yöntemle modeli oluşturmaktadır. Şekil 7’de şematik olarak gösterilen yöntemde, sürekli ya da istek üzerine bırakma (DOD) yaklaşımı kullanılarak malzeme (fotopolimer reçine) katılaştığı ve modelin katman katman oluşturulduğu yapı yüzeyine veya bir platforma püskürtülür. Model oluşturma işleminin birinci aşamasında, malzemeyi püskürtmek için, yapı platformu boyunca yatay olarak hareket eden bir nozul kullanılır. Malzeme katmanları daha sonra kurlenir veya UV ışığı kullanılarak sertleştirilir [20]. Yöntemde kullanılan makineler, çalışma şekilleri ve malzemelerin birikmesini kontrol etme metodlarına göre farklılık göstermektedir.

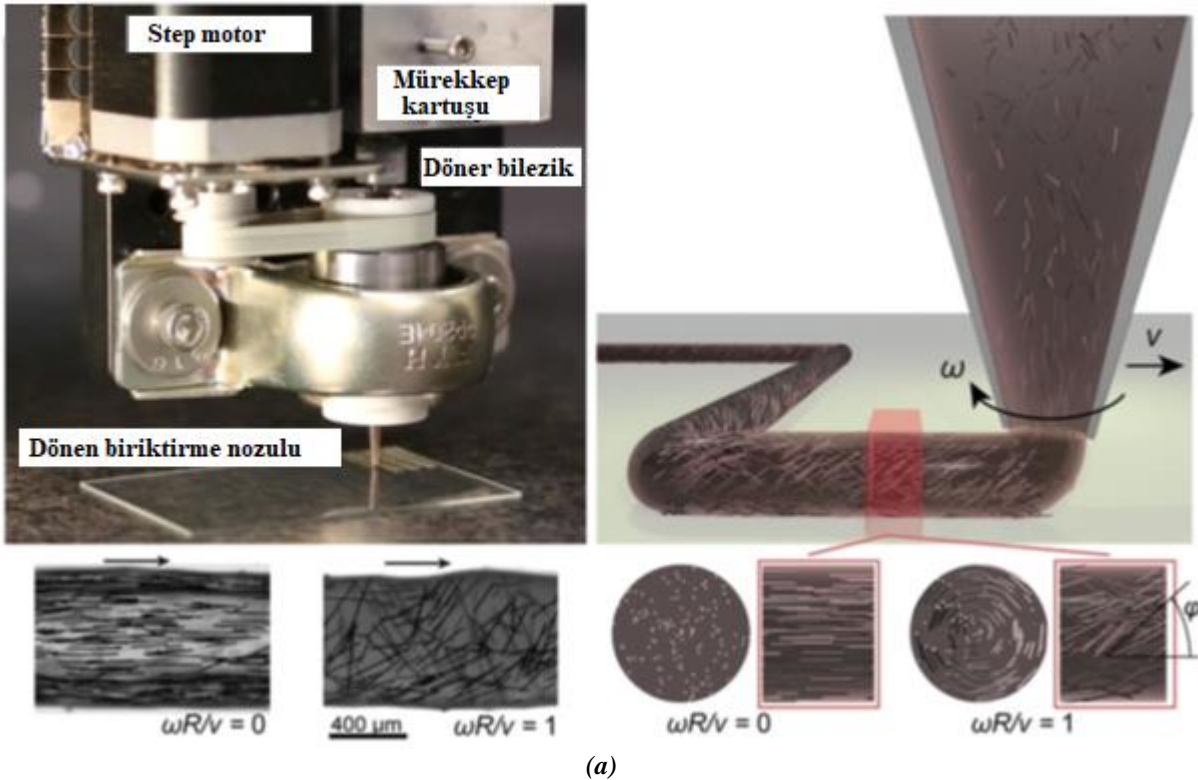


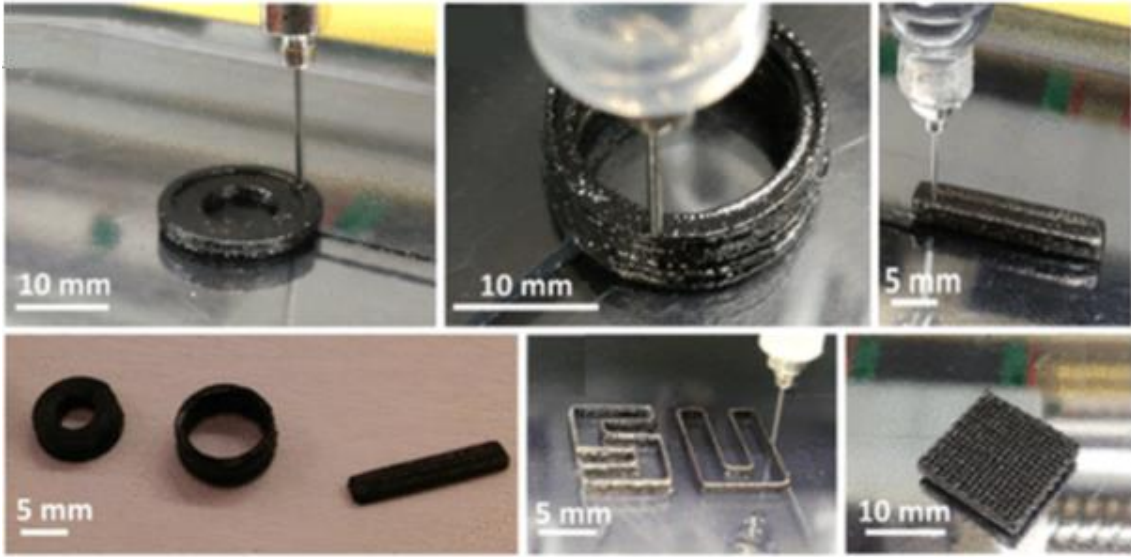
Şekil 7. Malzeme püskürtme (MJ) yöntemi şematik gösterim [20]

Yöntem renkli parçalar oluşturulabilmesinin yanında farklı malzeme ile çalışmaya da izin veren üstün ve baskı hızı yüksek bir teknolojidir. Üretilen parça için yumuşak veya sert malzemelerin kullanılabilmesi nedeniyle aynı parça üzerinde farklı mekanik özelliklere sahip parçalar üretilebilmektedir [50]. Yöntemde kullanılan ve su ile çözülebilir formlarda hazırlanabilen destek yapılar, kolay temizlenebildiği için yüzeylerde iz oluşturmaz. Malzemenin damlalar halinde depolanması gerektiğinden, kullanılacak malzeme sayısı sınırlıdır. Polimerler ve vakıflar, viskoz yapıları ve damla oluşturma yetenekleri nedeniyle uygun ve yaygın olarak kullanılan malzemelerdir [20].

Malzeme püskürtme yöntemi, günümüzde prototip üretimi, fonksiyonel polimerlerden üretilmiş hafif yapıli komponentler, gündelik yaşamda kullanılan giyilebilir ürünler, özel anatomik modellerin yapımı ve doku mühendisliği gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır. Pek çok araştırmacı, malzeme püskürtme yöntemiyle üretilmiş ürünlerin özellik, boyut ve geometri karakterizasyonu, 4B (Dört Boyutlu) baskı, çoklu ve takviyeli baskı gibi konularda çalışmalar yapmaktadır [53],[54],[55],[56],[57],[58],[59].

Malzeme püskürtme yönteminde baskı yönü, boyutsal kararlılık, bitmiş ürünün yüzey kalitesi ve mekanik özellikler üzerinde etkili olan en önemli parametredir [53]. Baskı yönü ve kürlenme davranışına göre çok farklı özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir [60]. Şekil 8'de gösterildiği gibi bileşenlerin farklı yönlerde basılabilmesi, gelişmiş tasarım ve üretim esnekliği sağlamaktadır. Ancak birden fazla malzemenin kullanıldığı kompozit sistemlerde malzeme özelliklerinde ve ara yüzlerdeki uyumsuzluk, mekanik özellikleri düşürebilir [61]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarla birlikte, ara yüzey özellikleri ve katmanların birbirine yapışması farklı tekniklerle kontrol edilebilmekte ve bu sayede daha iyi özelliklerde malzemeler üretilebilmektedir. Dilag ve ark. [61] fotopolimer malzemenin yapışma özelliklerini poli(metil metakrilat) (PMMA) malzemede yüzey serbest enerjisini değiştirerek incelemişlerdir. Araştırmacılar temas açısı ve profilometri analizi ile, PMMA yüzeyin daha fazla ıslatılması ve damlacık yayılmasının iyileştiğini tespit etmişlerdir. Khoshkhoo ve ark. [62] baskı yönlendirmesi, açıların kontrolü ve diğer parametrelerin etkili kontrol edilmesiyle ürün yüzey özelliklerinin ve boyutsal özelliklerin iyileştirilebildiğini belirtmişlerdir. Yang ve ark. [63] makinenin püskürtme performansının, basılı parçaların yüzey kalitesi, biçimlendirme kalitesi ve boyutsal hatalar üzerinde etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.



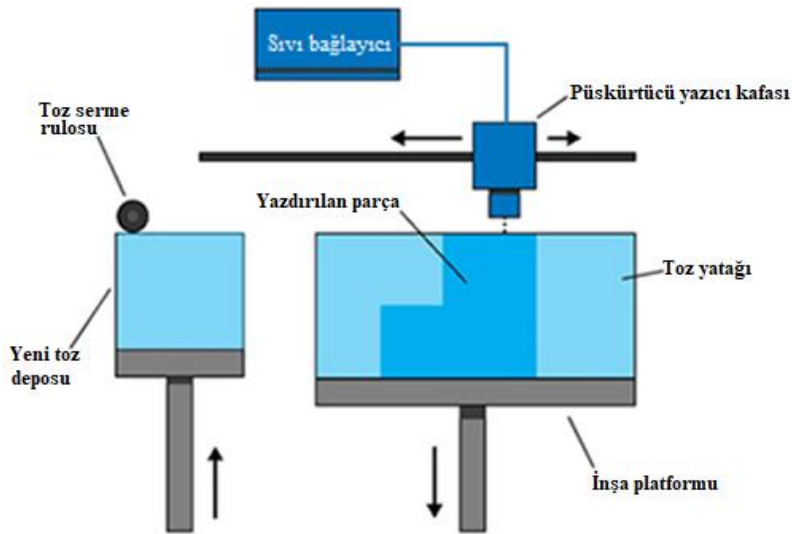


(b)

Şekil 8. (a) Karbon fiber katkılı reçine kullanılarak malzeme püskürtme yöntemiyle baskı yapılması ve desene dik baskı esnasında fiber yönlenmesinin şematik gösterimi, (b) Malzeme püskürtme yöntemiyle yazılmış farklı geometrilerdeki 3B baskı örnekleri [64]

D. YAPIŞTIRICILARLA KATMANLI İMALAT (BINDER JETTING)

Yapıştırıcılarla katmanlı imalat yöntemi 1990'lı yıllarda geliştirilmiş bir yöntem olmasına rağmen 2010 yılına kadar ticarileştirilememiştir [65],[66]. Bağlayıcı püskürtme (yapıştırıcılarla katmanlı imalat) işleminde, toz tabanlı bir malzeme ve sıvı formulu bir bağlayıcı olmak üzere iki malzeme kullanılmaktadır. Parçayı oluşturan malzemelerin çoğu toz yatağındaki tozlardan oluşur. İşlemden kullanılan bağlayıcı damlacıklarının görevi (~80 µm çapında), toz tabakalarının birbirine yapıştırılmasıdır [65]. Yöntem şematik olarak Şekil 9'da gösterilmiştir. Yöntemde ilk aşamada toz malzeme bir rulo yardımıyla inşa platformunun üzerine yayılmaktadır. İkinci aşamada; bir baskı kafası, makinenin x ve y eksenleri boyunca hareket eder ve bağlayıcıyı gerektiği yerde tozun üstüne bırakarak toz ve bağlayıcıdan oluşan katmanları oluşturur. Katman tamamlandıktan sonra bir sonraki katmanın oluşturulması için yapı platformu aşağı yönlü olarak katman kalınlığı kadar hareket ettirilir. Sonrasında yeni bir toz tabakası önceki tabakanın üzerine serilmekte ve tüm katmanlar tamamlandıktan sonra yazdırılmak istenen parça oluşturuluncaya kadar aynı işlemler tekrar edilmektedir.

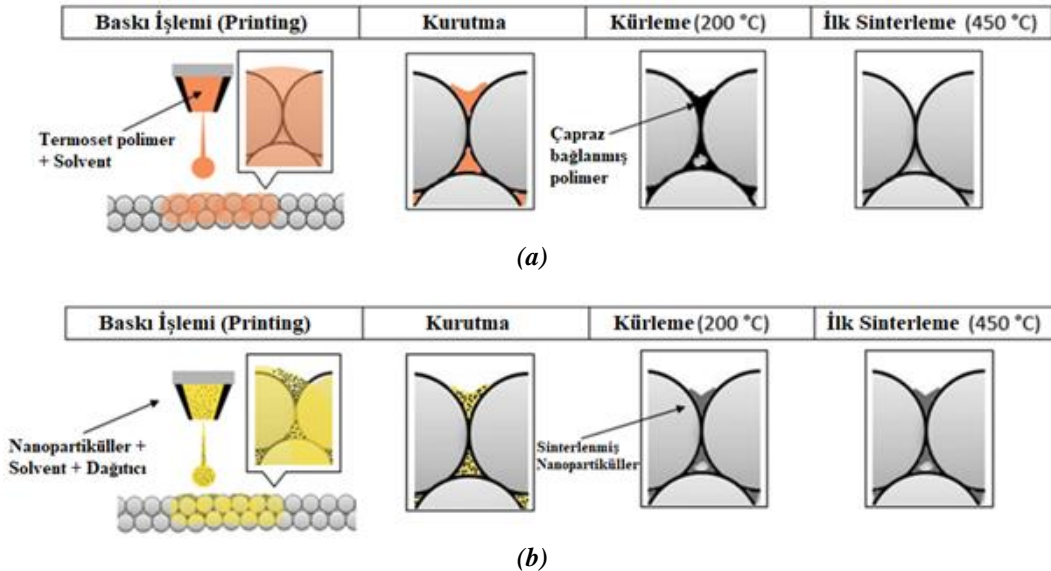


Şekil 9. Yapıştırıcılarla katmanlı imalat yönteminin şematik gösterimi [20]

Bağlama yöntemine bağlı olarak, malzeme özellikleri yapısal parçalar için her zaman uygun değildir. Yöntemde üretim hızı göreceli olarak yüksektir. Ancak üretim sonrası parçalara ek işlemler uygulanması gerekebilir ve bu durum parçaların üretim süresini arttırabilir. Diğer toz bazlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi, basılan parça toz yatağı içerisinde toz tarafından desteklenmektedir. Yazdırma işlemi tamamlandığında, basılan parça kullanılmayan tozların içerisinde çıkartılmaktadır. Yöntem yaygın olarak 3BP (Üç Boyutlu Püskürtme) teknolojisi olarak bilinmekte ve telif hakkı ile korunmaktadır [20].

Bağlayıcı püskürtme yönteminde renkli baskı yapılabilmektedir. Yöntemde metal (paslanmaz çelik, Al, Cu, Fe, Ni ve Co bazlı alaşımlar vb.), polimerler (ABS, PA, PC vb.) ve seramik malzemeler (silika, kum, grafit, Al_2O_3 vb.) kullanılabilir. Üretim hızı diğer yöntemlere oranla daha hızlıdır. Malzemeyi biriktiren yazıcı kafası deliklerinin sayısı artırılarak üretim süresi daha da kısaltılabilir. Bağlayıcı ve toz oranı ya da özellikleri değiştirilerek, çok farklı mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilir. Benzer şekilde daha yüksek mekanik ve yapısal özelliklere sahip parçalar elde etmek için baskı sonrası ek işlemler de uygulanabilir. İnşa platformunda ısıtılmış bir bölme ile malzemelerin viskozitesi arttırılabilir ve daha kısa baskı süreleri elde edilebilir. Çünkü iyi bir yüzey kalitesi ve bağlayıcının kuruması için parçanın makinede soğumaya bırakılması üretim süresini arttırmaktadır. Yöntem ile üretilmiş parçalar yüksek gözeneklilik gösterir ve bu da malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Malzemeler kullanılmadan önce infiltran maddeler (seramikler için siyanoakrilat yapıştırıcılar, metaller için bronz) kullanılarak mekanik özellikler iyileştirilebilir [24].

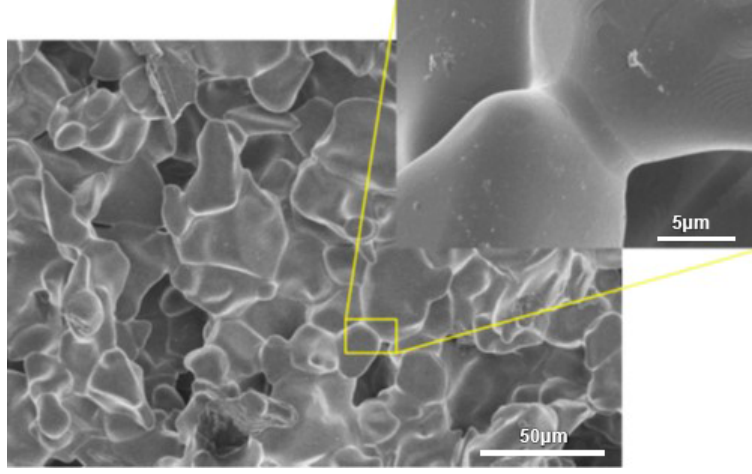
Bağlayıcı püskürtme yönteminde bağlayıcılar polimer esastır. Ancak son yıllarda farklı tür bağlayıcılarında yöntemde kullanılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bai ve Williams [67], organik esaslı, ısıtıldığında nanopartikülleri çökeltebilen partikül içermeyen bir metal mürekkep bir bağlayıcı kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, baskı sonrası malzemelere sinterleme işlemi uygulayarak daha yüksek parça mukavemetlerinin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Şekil 10'da bağlayıcı püskürtme yönteminde termoset polimer ve nanopartikül kullanıldığında oluşan yapılar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 10. Bağlayıcı püskürtme tekniğinde farklı bağlayıcılar kullanıldığında oluşan yapılar, (a) Termoset polimer, (b) Metal esaslı nanopartiküller [67]

Gonzalez ve ark. [68], bağlayıcı püskürtme yönteminin medikal uygulamalarda kullanılabilirliğini incelemek amacıyla Al_2O_3 tozu kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, en iyi toz dağılımının katman kalınlığının küçük olması durumunda elde edildiğini, sinterleme sonrası toz partikülleri arasında boyu vermenin oluştuğu ve tozların birleşmeye başladığını gözlemlemişlerdir

(Şekil 11). Geleneksel yöntemlerle üretilmeyen örgü ve köpük şeklindeki yapıların bağlayıcı püskürtme yöntemiyle üretilbileceğini ve yöntemin medikal sektörde uygulanabilir olduğunu ifade etmişlerdir.

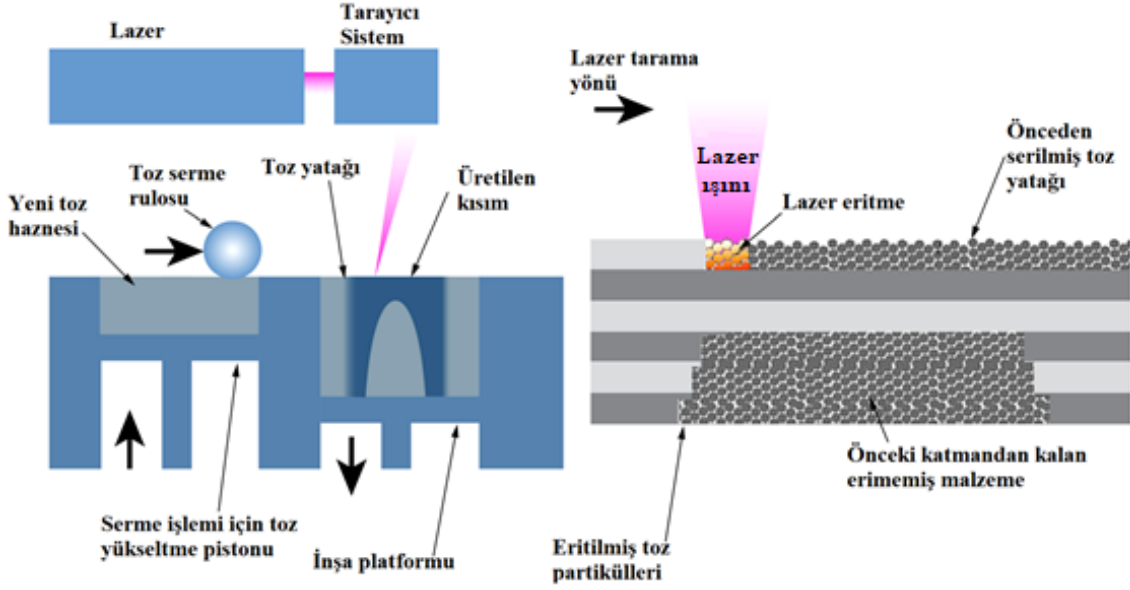


Şekil 11. Bağlayıcı püskürtme yöntemiyle üretilmiş malzemede, 16 saat sinterleme sonucu iki toz parçacığı (Al_2O_3) arasında oluşan boyun vermenin SEM görüntüsü [68]

Miyanaji ve ark. [69], toz yatağı yüzeyine çarpan damlacıkların hızı, imal edilen parçaların kalitesi ve bütünlüğünde ortaya çıkabilen damlacık yayılması ve soğurma dinamikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini ve artan baskı hızının basılmış parçaların doğruluğunu azalttığını ifade etmiştir. Ziaee ve Crane [70], bağlayıcı püskürtme yönteminde bağlayıcı damlacıkları ve toz arasındaki dinamik etkileşimlerle ilgili konuların henüz tam anlaşılmadığını, sektörde ince tozların işlenmesi, taşınması ve dağıtılması ile ilgili büyük bir ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar bağlayıcı püskürtme teknoloji ile ilgili bilgi birikimi arttıkça, endüstriyel uygulama alanlarının artmaya devam ettiğini, henüz toz şeklinde kullanılabilen az sayıda malzeme olduğunu ve bu farklı malzeme türlerinin kullanılmasyla ilgili olarak çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir. Gukuldoss ve ark. [66], bağlayıcı püskürtme ile üretilmiş parçalara üretim sonrası, kütleme, toz giderme, sinterleme, infiltrasyon, tavlama ve son şekline getirme gibi son işlemlere ihtiyaç duyulduğunu, bazı uygulamalarda son işlemlerin (sinterleme gibi) baskıdan daha uzun zaman aldığını bununda parça maliyetlerini önemli oranda arttırdığını belirtmişlerdir.

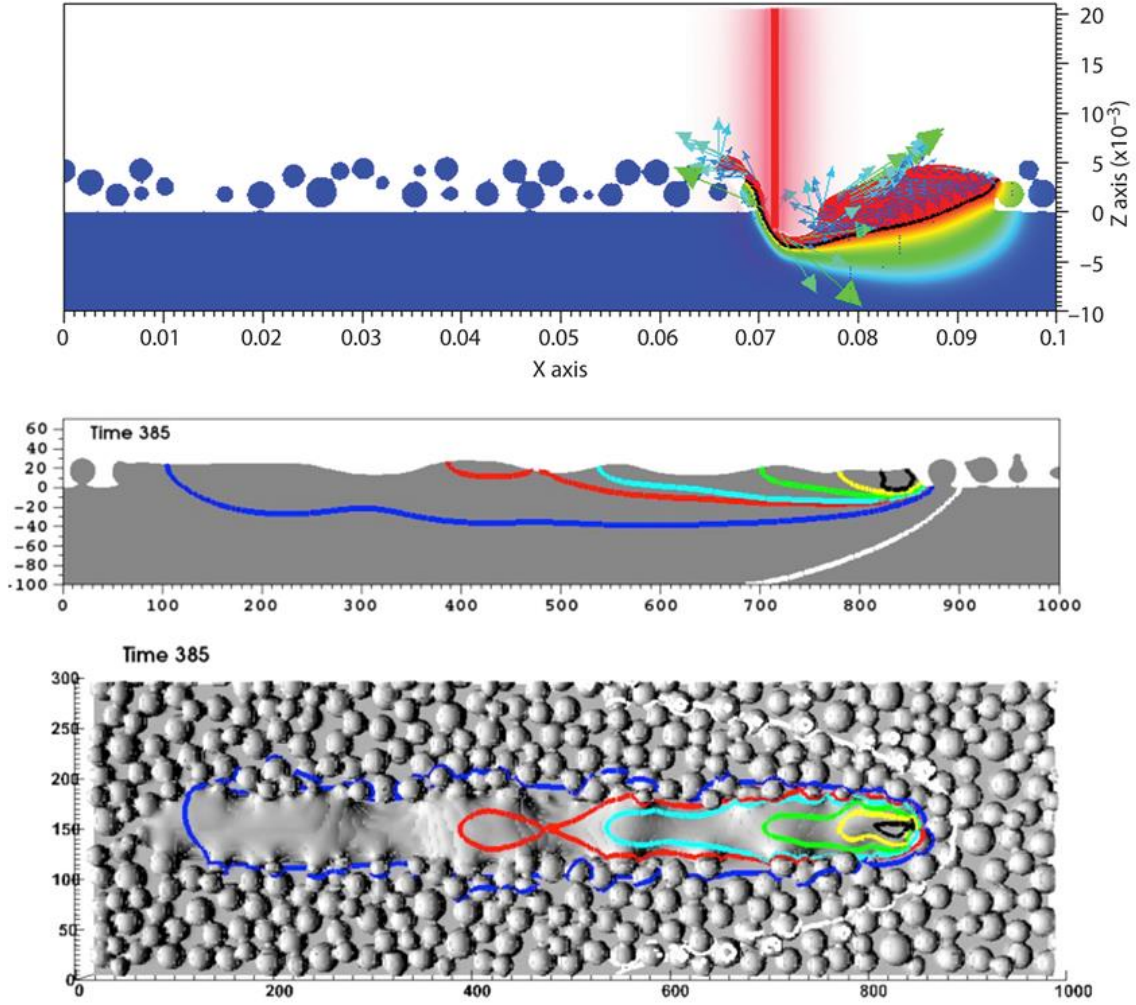
E. TOZ YATAKLI ERİTME (POWDER BED FUSION)

Toz yataklı eritme, multijet eritme (MJF), seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer eritme (SLM), direkt metal lazer sinterleme (DMLS) gibi yaygın kullanılan teknolojileri içermektedir. Yöntemde, toz halindeki malzemeyi eritmek ve kaynaştırmak için güçlü bir lazer veya elektron ışını kullanılır [71]. Fonksiyonel parçaların üretiminde metal ve alaşımları birlikte kullanılabilir. Tüm işlemler 0,1 mm kalınlığında bir toz malzemenin tabakasının önceki tabakalar üzerine rulo ya da bıçak gibi farklı mekanizmalar tarafından yayılmasını, bir lazer kaynağından üretilen termal enerjinin erittiği toz malzemeyi soğudukça katılaşması ve bu şekilde parçanın oluşturan her katman için tekrarlanmasını içermektedir. Her bir katmandan sonra yeni katmanı oluşturmak için inşa platformu aşağı doğru indirilmekte ve yüzeye yeni malzeme serilmektedir. İşlem görmemiş toz yerinde kalmakta ve baskı işlemi tamamlanınca parça toz içerisinden çıkartılmaktadır [20]. Toz yataklı eritme yöntemi şematik olarak Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Toz yataklı eritme yönteminin şematik gösterimi [72]

SLS makinesi, malzemeyi kaynaştırmak için bir ısı kaynağı, ısı kaynağını kontrol etmek için bir kontrol ünitesi ve katmanlar için gerekli toz tabakasını yaymayı sağlayan bir mekanizma olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Kullanılmayan tozlar (eritilmeyen) baskıda bir destek görevi gördüğünden yöntemde ekstra desteğe ihtiyaç duyulmamaktadır [73]. Yapı platformu, sıcaklığın genellikle malzeme erime noktasının birkaç derece altında olduğu uygulamalarda, lazerin katmanları bir araya getirme özelliğini azaltmaması amacıyla sıcaklık kontrollü bir bölme (içerisi tamamen nitrojenle doldurulmuş) içerisine alınmalıdır. Basılan modeller yüksek tolerans ve birleşme kalitesi elde etmek için kontrollü bir şekilde soğutulmalıdır. Bazı makineler baskı kalitesini arttırmak amacıyla katman sıcaklıklarını kontrol ederek, gerekli sıcaklığın doğru ayarlanması için lazer parametrelerini otomatik olarak ayarlamaktadır. King ve ark. [72] toz yataklı eritme yönteminde ısı dağılımının ve sıcaklık profilinin önemli olduğunu ve toz malzemenin bu parametreler üzerinde etkili olduğunu belirtmişler ve lazerin ilerlemesinden sonra arka kısımlarda sıvı adacıkların oluştuğunu, yüzey ve alt katmanlar arasındaki sıcaklık farklılıklarına bağlı olarak sıvı miktarı arasında fark olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar ısının eşit olduğu yüzeyde soğumanın homojen olmamasının tozdan kaynaklanabileceğini ve bu özelliklerin mikro yapı ve parça özelliklerine aktarılacağını ifade etmişlerdir. Şekil 13’de lazer noktası hareket ederken oluşan sıcaklık dağılımı ve sıvı adacıklarının oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 13. Lazer noktası hareket ederken oluşan sıcaklık dağılımının anlık görüntüsü [72]

SLM yöntemi SLS yöntemine göre daha hızlıdır. Ancak yöntemin inert bir gaz kullanılmasını gerektirmesi enerji maliyetleri arttırmaktadır. Yöntemde toz serme işleminden sonra, katmanın her bölgesinde tozun eşit dağıtılmasını sağlamak için inşa platformuna titreşim uygulanır. MJF yöntemi toz malzemeyi birbirine kaynaştırmak için ısıtılmış bir termal baskı kafası ve termoplastik malzeme (Naylon) kullanılmasıyla diğer toz yataklı eritme yöntemlerinden ayrılmaktadır. MJF yöntemi yapısal bileşenlerden daha çok ürün prototipleri oluşturmak amacıyla tercih edilmektedir. MJF yönteminde lazer yerine bir termal baskı kafasının kullanılması, gerekli ısı ve güç seviyelerini önemli oranda azaltır. DMLS yöntemi SLS yönteminde metalik tozların kullanımı aynı şekildedir. Yöntemde toz tabakası katman katman sinterlenmekte ve farklı çeşitte metalik tozlar (paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum, bakır, krom kobalt, çelik vb.) kullanılmaktadır [65]. Tüm yöntemlerde baskı sonrası parçalar temizlenmeli ve ihtiyaç duyuluyorsa talaşlı imalat vb. yöntemlerle toleranslarına getirilerek parçaya son şekli verilmelidir. Baskı sonrası parça mukavemetini ve yoğunluğunu artırıcı ek işlemler yapılabilir. Homojen ve malzeme boyunca daha sürekli bir mikro yapı elde etmek amacıyla parçalara sıvı faz sinterleme yapılabilir. Ancak bu durumda ölçülerde çekme payları hesaba katılmalıdır. Nispeten ucuz olması, görsel modeller ve prototipler için uygun olması, teknolojiyi (MJF için) küçük ölçekli ve ofis boyutundaki makinelere entegre etme yeteneği, sinterlenmemiş tozun baskıda bir destek yapısı görmesi ve kullanıcıya geniş malzeme seçenekleri sunması yöntemin en önemli avantajlarıdır. Üretim hızının yavaş olması (MJF için), üretilecek parça boyutlarının sınırlı olması, yüksek güç kullanımı, parça yüzey kalitesinin toz tane boyutlarına bağlı olması, malzemelerde yapısal özellik eksikliği ise yöntemin dezavantajlarıdır.

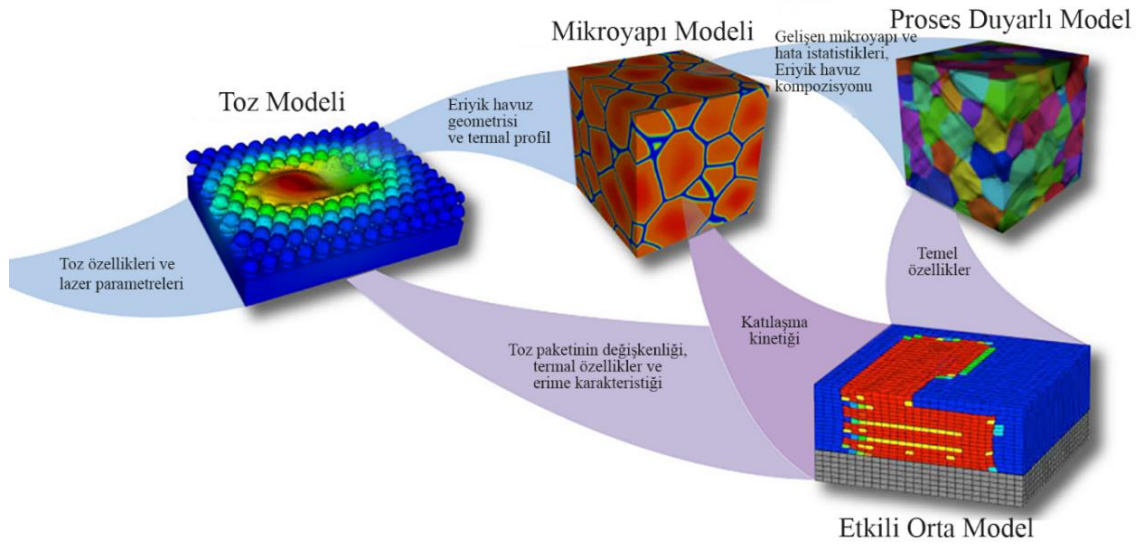
Vock ve ark. [73], kullanılan tozun kalitesi ve oranının, prosesin performansı ve son ürünün kalitesi

üzerinde oldukça önemli olduğunu belirtmiştir. Araştırmacılara göre; son yıllarda çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen toz ve parça özellikleri arasındaki ilişki henüz tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Tozun parça kalitesi üzerindeki etkisinin anlaşılması, daha kaliteli tozların üretilmesine ve toz maliyetlerinin düşürülmesine önemli oranda katkı sağlayacaktır. Martin ve ark. [74], parça içerisinde ve lazer dönüş noktalarındaki gözeneklerin lazer tarama hızındaki değişikliklerden ve lazer dönüş noktasından uzaklaştıkça malzeme katılaşırken bir gözenek oluşturan gaz halindeki argonu hapsetmesinden kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Bu durumun engellenmesiyle parça kalitesinin ve geometrik toleranslarının iyileştirileceğini belirtmişlerdir. Sutton ve ark. [75], parça özellikleri için tozların kritik bir önemde olduğu, toz yatağında eritme esnasında oluşan yan ürünlerin lazeri engelleyebileceği ve toz yatağındaki enerjiyi azaltabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacıların yaptığı toz özelliklerinin morfoloji, kimya ve mikro yapı açısından sınıflandırılması Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Toz özelliklerinin morfoloji, kimya ve mikro yapı açısından sınıflandırılması [75]

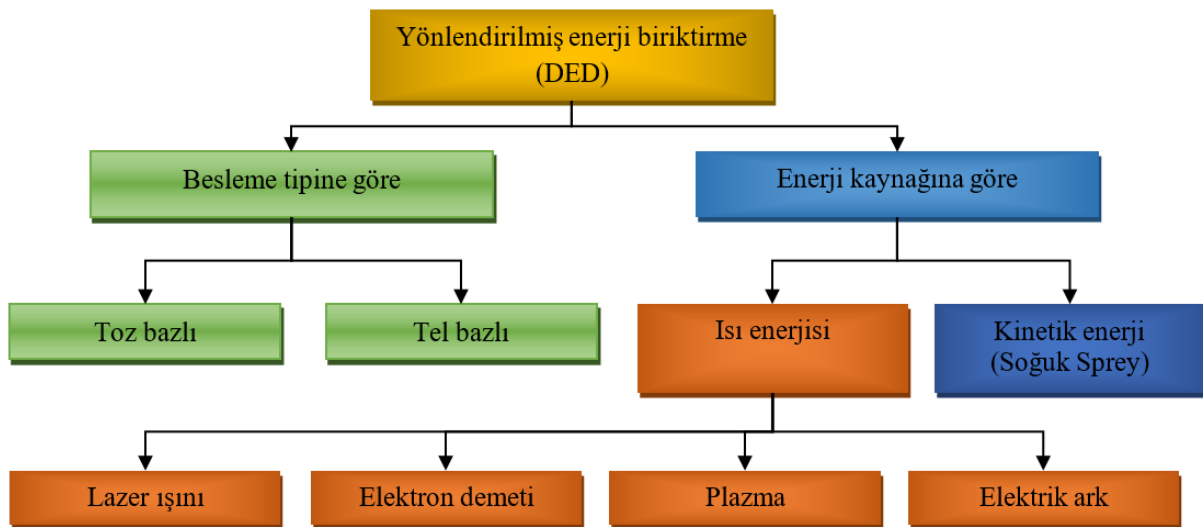
King ve ark. [71] toz yataklı eritmede kullanılan metal tozlarını farklı parametreleri kullanarak modelleme ve simülasyon yaptıkları çalışmada, katmanların birbiri üzerinde oluşturulmasındaki uyumu en önemli zorluk olarak belirlemişler ve veri toplamının modellemenin başarısını arttıracığını belirtmişlerdir. Süreçleri bölümleyen (Şekil 15) araştırmacılar, başarılı bir üretimin önceki çalışmalardan süreçlerle ilgili veri toplanması ve bu verileri kullanarak çalışmanın modellenmesi, simülasyon yapılması ve parametrelerin optimize edilmesi gibi işlemlerin gerçekleştirilebileceğini ifade etmişlerdir. Süreçlerle ilgili veri tabanlarının oluşturulması ve kullanıcıların bilgisine sunulması, kullanıcılarında kendi verilerini gireceği ortak bir sistem ya da veri kütüphanesi oluşturulması ilerleyen dönemlerde konu ile ilgili yapılabilecek en önemli çalışmalardan biridir. Toz modellerinin, istenen mikro yapının, proses şartlarının seçimiyle birçok proses ve malzemeyi deneme yanılma yaklaşımından kurtaracak ve proses verimliliğini arttıracaktır. Bu işlem üretim maliyetlerinin düşmesini sağlayacaktır.



Şekil 15. Toz yataklı eritme yönteminde kullanılan çok ölçekli modelleme stratejisinin şematik gösterimi [75]

F. YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ BİRİKTİRME (DIRECTED ENERGY DEPOSITION)

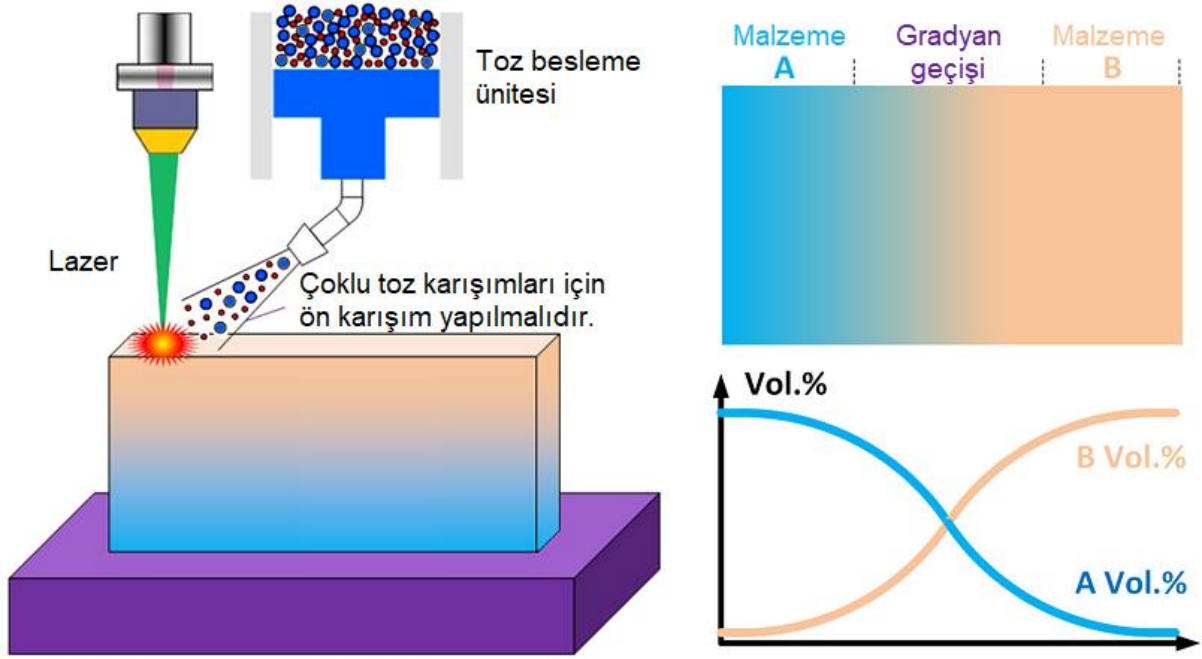
Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED), lazer toz şekillendirme (LENS) ve elektron ışın eklemeli imalat (EBAM) teknolojilerini kapsamaktadır. Tipik bir DED makinesi çok eksenli bir kol üzerine monte edilen ve erimiş malzemeyi katılacağı konuma (malzeme yüzeyine) bırakan bir nozul'dan oluşur. Yöntem çalışma şekli itibariyle FDM yöntemine benzemektedir. Ancak FDM'dan farklı olarak nozul çok yönlü/ksenli hareket etmekte ve belirli bir eksene sabitlenmemektedir. Herhangi bir açıdan 4 veya 5 eksenli makineler kullanılarak biriktirilmiş malzeme bir lazer, plazma arki ya da elektron ışını kullanılarak eritilir. Katılmış malzeme yüzeylerine yeni katmanlar uygulamak mümkündür [20]. Yöntemde malzeme olarak polimerler, seramikler ve tipik olarak toz veya tel şeklinde metaller kullanılabilir. Ancak eritme işleminde elektron ışını kullanılıyorsa sadece metal ve seramikler için uygundur. Elektron ışını plastiklerde kullanılmaz. Yapısal parçaların onarımı ve bakımı tipik uygulama alanlarıdır. Mevcut parça üzerinde yeni unsurlar oluşturulabilir [76]. Yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemi Şekil 16'da ki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 16. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yönteminin sınıflandırılması [77]

Toz bazlı yöntem en yaygın ve en bilinen DED tekniğidir. Yöntemde ısı kaynağı olarak lazer ışını

kullanılmaktadır. Tel bazlı DED prosesleri, lazer ışını toz bazlı proseslere göre daha düşük bir çözünürlük sağlar. Ancak daha yüksek biriktirme oranına ve daha büyük yapılar inşa etme kabiliyetine sahiptir. Yöntemde ihtiyaç kadar malzeme kullanıldığı için, toz kullanılan diğer yöntemlere oranla malzeme verimi yüksektir. Yöntemde farklı tozlar karışım şeklinde kullanılabilir (Şekil 17). Ancak uygun bir kompozisyon için toz boyutları aynı ya da yaklaşık olmalı ve tozun geometrisi küre ya da küreye yakın olmalıdır [77]. Malzemeler oldukça hızlı bir şekilde soğutulur. Tipik olarak bu değer 1000-5000 °C/s arasındadır. Soğutma süresi eritilmiş ve katılaştırılmış malzemenin tane yapısını etkilemektedir. Katmanlar arasında erimenin meydana gelmesi de mikro yapıyı etkileyecektir. Mikro yapının önemli olduğu uygulamalarda bu durum dikkate alınmalıdır. Katman kalınlıkları 0,25-0,50 mm arasında değişmektedir [20].

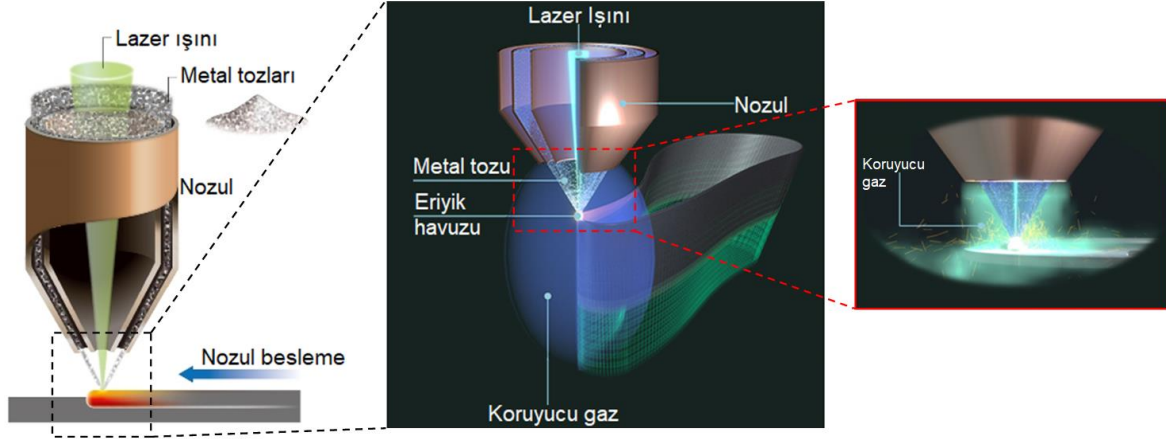


Şekil 17. Çoklu toz karışımı DED yönteminin şematik gösterimi [77]

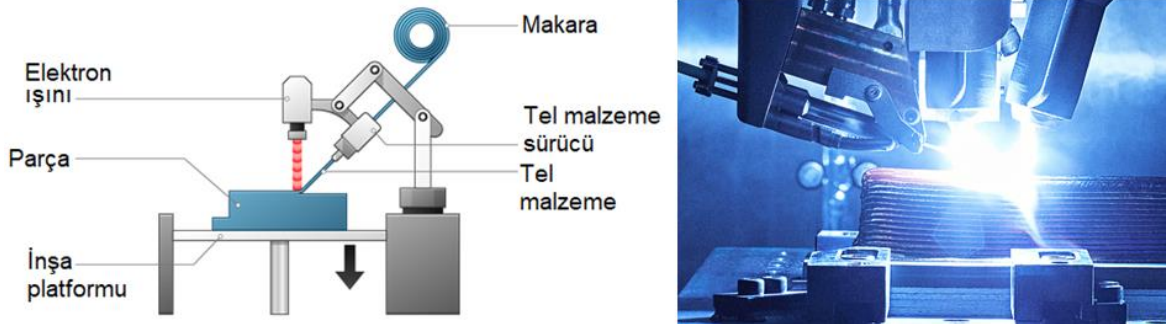
Toz bazlı yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemi Şekil 18'de, tel bazlı yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemi Şekil 19'da şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 19'da görüleceği gibi tel bazlı uygulamada ısı kaynağı olarak genellikle bir elektron ışını, plazma veya elektrik arkı kullanılır. Vakumda yüksek enerji odaklı bir elektron ışınına sahip olan elektron ışını bazlı AM (EBAM) hemen hemen her metali birleştirebilir ve esas olarak ağ şekilli parçaların imalatında kullanılır. Nispeten yeni bir 3B yazıcı teknolojisi olan plazma bazlı eklemeli imalat yönteminde, metal parçacıkları eritmek için kontrollü bir plazma kaynağı kullanılmaktadır. Elektrik arkına dayalı DED, katmanları biriktirmek için tel beslemesini eritir ve büyük parçaları basmak için elektrik ark kaynağı prensibinden yararlanır. Genellikle soğuk püskürtme olarak adlandırılan kinetik enerji tabanlı DED sistemleri, mikron boyutlu parçacıkları süpersonik hızlara hızlandırmak için yakınsak-uzaklaşan bir nozul kullanır. Kritik bir darbe hızının ötesinde, mikron boyutundaki parçacıklar alt tabakaya yapışkan bir şekilde bağlanır ve serbest duran yığın bileşenler şeklinde bir kaplama malzeme oluşturur [76].

Melia ve ark. [78], DED yöntemiyle şekillendirilmiş 304L paslanmaz çeliğinin korozyon davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar mikro yapı incelemelerinde, lazer toz tabanlı üretim yöntemlerinde sıklıkla karşılaşılan gaz boşlukları, füzyon eksikliği ve nano ölçekli oksitlenme gibi tipik kusurlara rastladıklarını, hızlı soğutma ve parametrelerin doğru ayarlanmasıyla daha uzun korozyon dayanımının elde edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Haley ve ark. [79] göre; prosesteki pek çok parametre üretilen parçada morfolojik ve mikro yapısal etkilere sahiptir. Araştırmacılara göre; eriyik havuzundaki toplam eriyik miktarı oluşan ısı ve enerji dengesine bağlı olarak farklılaşmaktadır. Çalışma mesafesindeki

(kurs boyunda) en ufak değişiklikler verimliliği de etkilemektedir. Bu nedenle tüm üretim sürecinde optimum şartlara etki eden tüm parametreler dikkate alınarak ayarlanmalı ve bu mesafe sabit olacak şekilde ayarlanmalıdır. Haley ve ark. [79] diğer bir çalışmada, lazer tarafından oluşturulan milimetrik eriyik havuzunda, tozların yüzey gerilimine bağlı olarak tutulduğunu ve erimeden önce eriyik havuzunda yüzdüğünü bunun da yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk gibi ürün özelliklerini etkilediğini belirtmişlerdir. Bu olumsuz etkiyi en aza indirmek amacıyla yüzey ıslatılabilirlik gibi toz özelliklerinin kontrolüne yönelik çalışmalar yapılmasını ve bununla ilgili güvenilir bir sistem oluşturulması gerektiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 18. Toz bazlı DED yönteminin şematik gösterimi [81],[82]

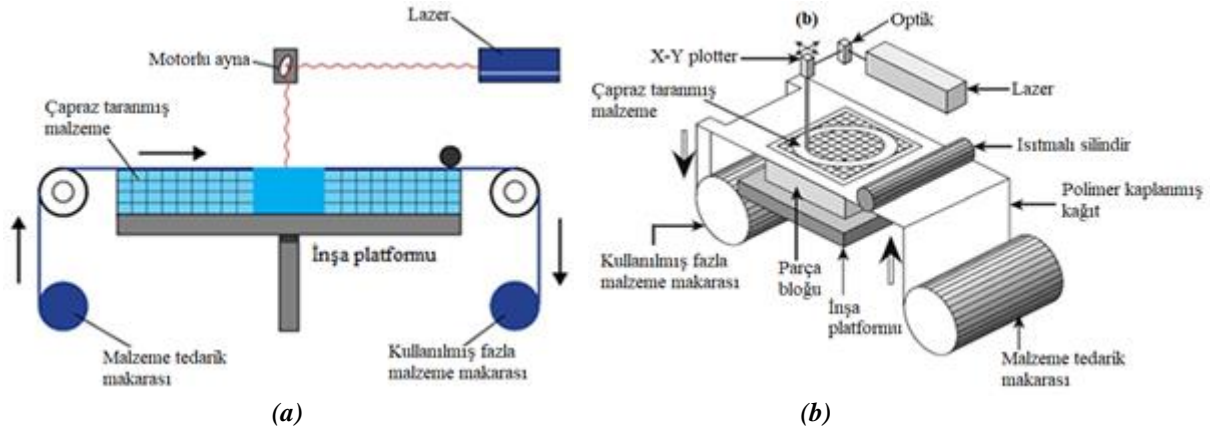


Şekil 19. Tel bazlı DED yönteminin şematik gösterimi [83],[84]

E. LEVHA/SAC LAMİNASYONU (SHEET LAMINATION)

Levha/Sac laminasyonu, tabakalı obje üretimi (LOM) ve ultrasonik katmanlı imalat (UAM) teknolojilerini kapsamaktadır. Ultrasonik katmanlı imalatta, metal levha veya şeritler (metaller, alüminyum, bakır, paslanmaz çelik, titanyum vb.) katman katman lamine edilir ve ultrason kaynağı kullanılarak birleştirilir. Metal malzemeler elle çıkartılamaz ve istenmeyen malzemelerin yapıdan çıkartılması için ek CNC işlemleri gerektirebilir [85].

Tabakalı obje üretimi katman tabanlı sistemlere benzer bir yaklaşım içerir. Kaynak yerine malzeme olarak kâğıt ve yapıştırıcı kullanılır. Kâğıt kalınlıkları 0,007-0,2 mm arasında değişmektedir [63]. LOM işleminden sonra üretilmiş malzemenin inşaa platformundan kolay bir şekilde kaldırılması için yazdırma işlemi sırasında çapraz tarama yöntemi kullanılır. Kesilmiş malzemeler bir önceki katmanın üzerine yerleştirilir ve arasına yapıştırıcı sürülür. Katmanlar, arasına sürülen termal bir yapıştırıcı vasıtasıyla tabakalar ısı ve basınç uygulamasıyla birbirine bağlanır [86]. İstenilen kalınlık elde edilinceye kadar işleme devam edilir. Daha sonra istenilen şekli elde etmek amacıyla gerekli şekil CO₂ lazer ya da bıçakla kesilir. Sonrasında boyama, zımparalama vb. işlemler yapılır. Yöntemin uygulanmasına ait şematik ve perspektif görünüm Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. Tabakalı obje üretimi (LOM) yöntemi (a) İki Boyutlu görünüm [20], (b) Perspektif görünümü [65]

Genellikle estetik ve görsel modellerin üretimi için kullanılan lamine nesnelere yapısal kullanım için uygun değildir. Yöntemde işlem sıcaklıkları düşüktür ve farklı iç geometrilerinin oluşturulmasına izin verir. Levha/sac laminasyonu ile farklı malzemeler birbirlerine bağlanabilir. Metal erimeye kadar kullanılan yöntemlere göre daha az enerji gerektirir. Laminasyon hızının artması için, yüksek deformasyon, sıcaklık ve kâğıt ile ısıtılmalı silindir arasındaki temas yüzeyinin artması gerekmektedir [87]. Isı ve basıncın dengeli bir şekilde ayarlanmasıyla parça mukavemetini arttıran çok iyi bir yapışma gücü elde edilebilir [88].

III. SONUÇ

Bu çalışmada; 3B yazıcı teknolojileri ASTM standardı referans alınarak kullanılan proseslere göre sınıflandırılmış ve yöntemlerdeki son gelişmeler incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar genel hatlarıyla aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. Döküm, talaşlı imalat, kaynak gibi geleneksel üretim yöntemleriyle yapılan imalatlarda malzeme israfı ve işçilik fazladır. Geleneksel üretim yöntemlerinde bir parçayı üretmek için birçok ardışık proses bir arada kullanılmaktadır. Bu durum hem üretim maliyetini arttırmakta hem de üretim esnasında pek çok problemi de beraberinde getirmektedir. Eİ yöntemiyle üretilmiş bir parçada, talaşlı imalat vb. geleneksel yöntemlere oranla %90 oranında daha az hammadde kullanılabilir. 3B yazıcı teknolojileri, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan ve çok farklı geometrilere sahip parçaların kalıp maliyeti olmadan ya da üretim hattı kurulmadan başarılı bir şekilde üretimine imkân vermektedir. Özellikle otomotiv, savunma, havacılık, raylı taşımacılık vb. sektörlerde plastiklerden yapılan parçaların seri üretim öncesi prototiplerinin oluşturulması ve prototiplere göre revizyonların yapılarak ürünün son şeklinin verilebilmesi, kalıp maliyetlerinin yüksek olduğu enjeksiyon [89], polimer döküm [90] gibi proseslere oranla daha ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmektedir.
2. 3B yazıcı teknolojilerindeki en büyük zorluklardan biri, maliyet, proses zorluğu, mevcut hali ile malzemelerin 3B yazıcılarda kullanmaya uygun olmaması vb. nedenlerle ürün/parça üretiminde kullanılan hammaddelerin sayıca az olmasıdır. 3B yazıcı teknolojilerinin kullanılmaya başladığı ilk yıllara oranla, son dönemlerde daha fazla sayıda polimer, metal ve alaşımları, seramikler ve kompozit malzemeler 3B yazıcılarda hammadde olarak kullanılabilir. Ancak 3B teknolojilerinde kullanılan hammaddelerin hala yeterli sayıda olmaması 3B yazıcı teknolojilerinin kullanımının yaygınlaşması açısından bir sınırlılık oluşturmaktadır. Baskı sonrası, renklendirme, yüzey parlatma, sinterleme, ısıl işlem uygulamaları [91] vb. son işlemlerin uygulanmasıyla seramikler, metal ve alaşımları için daha yüksek mekanik özelliklere sahip parçalar üretilebilmektedir. Son yıllarda son işlemlerle ilgili

çalışmaların önemli oranda arttığı ve az sayıda çeşidi kullanılan metal ve alaşımları için yeni malzeme türlerinin 3B yazıcılarda kullanılmasıyla ilgili yeni konseptlerin geliştirildiği görülmektedir. 3B teknolojilerinde kullanılacak yeni tür malzemelerin geliştirilmesiyle birlikte gelecekte pek çok sektörde üretim bakış açısı ve iş yapma biçimleri/üretim yöntemleri kökten değişecektir. Havacılık ve savunma sanayine yönelik yapılan çalışmalar bu konseptlerin geliştirilmesinde ve bu yeniliklerin farklı sektörlerde uygulanabilmesinde öncü bir rol üstlenecektir.

3. 3B yazıcı teknolojileri ile detay geometrilerin oluşturulabilmesi, mikro ya da makro boyutlu parçaların üretilebilmesi, üretimde adet sınırı olmaması, tasarımcı ve üreticinin birbirinden bağımsız olması, parça hassasiyetlerinin ayarlanabilmesi, ölçü tamlığının ve ürün mukavemetinin son işlemlerle artırılabilmesi, üretim teknolojileri içerisinde 3B yazıcı teknolojilerinin gelecekteki önemini daha da arttıracaktır. 3B yazıcıların geleneksel üretimdeki birçok prosesi birleştirmesi ve üretimi kolaylaştırması, geleneksel üretim süreçlerindeki üretim ve tasarım bakış açılarında da yeni gelişmeleri beraberinde getirecektir.
4. Günümüzde hala 3B yazıcı fiyatlarının ve üretim maliyetlerinin yüksek olması, kullanılan malzemelerin şu aşamada sınırlı olması yöntemin yaygınlaşması önündeki en büyük zorluktur. Bu zorlukların aşılmasıyla birlikte 3B yazıcı teknolojileri hem şirketler arasında hem de bireysel kullanıcılar arasında daha fazla yaygınlaşacaktır. Ancak bireysel kullanıcılar arasında yöntemin yaygınlaşması, tasarımların kopyalanması ve CAD dosyalarının izinsiz kullanımını da beraberinde getirecektir. Telif haklarında ortaya çıkan problemler ve artan davalarla beraber bu durumun gelecekte fikri mülkiyet haklarında yapılacak yasal düzenlemelerle çözüme kavuşturulacağı düşünülmektedir.
5. Endüstri 4.0'la birlikte, emek yoğun sektörlerde 3B yazıcı kullanımının artacağı, maliyetlerin düşeceği, kompozit malzeme üretiminde, havacılık, otomotiv, medikal sektörü, gıda ve ambalaj sanayi, inşaat, elektrik-elektronik vb. sektörlerde 3B yazıcıların günümüze oranla çok daha fazla kullanılacağı öngörülmektedir. Robotik ve yazılım teknolojilerindeki gelişmeyle beraber 3B yazıcıların robotik teknolojilere entegre edilmesi, yapay zekâ ve 3B parça tarama teknolojileri ile tasarıma gerek kalmadan tamir bakım gibi uygulamalar için ürün/parça üretimi yapılabilecektir.

TEŞEKKÜR: Yazarlar, mühendislik bölümleri için temel işlemler atölyesi alt yapısının oluşturulması isimli 2020/F/0001 nolu proje ile çalışmaya verdikleri finansal destek ve 3B yazıcı temini için, Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür eder.

V. KAYNAKLAR

- [1] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C.C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, and P.D. Zavattieri, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 65-89, 2015.
- [2] E. Bulut ve T. Akçacı, "Endüstri 4.0 ve inovasyon göstergeleri kapsamında Türkiye analizi," *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, c. 7, ss. 50-72, 2017.
- [3] E. Şenol, M.B. Yolcu, ve S. Celayir, "Üç boyutlu yazıcılar ve çocuk cerrahisi," *Çocuk Cerrahisi Dergisi*, c. 29 s. 3, ss. 77-82, 2015.
- [4] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Business Horizons*, vol. 55, pp. 155-162, 2012.

- [5] Ş. Özel, M. Zeren, ve N.Ç. Alp, “3D yazıcılar ile katmanlı imalat teknolojisinin otomotiv endüstrisinde uygulanması,” *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, c. 4, s. 1, ss. 18-31, 2020.
- [6] C. Chen, B.T. Mehl, A.S. Mushi, A.D. Townsend, D.M. Spence, and R.S. Martin, “3D printed microfluidic devices: fabrication, advantages and limitations – a mini review,” *Analytical Methods*, vol. 8, pp. 6005-6012, 2016.
- [7] İ. Karagöz ve M. Öksüz, “Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan yöntemler,” *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 31, s. ÖS1, ss. 19-28, 2016.
- [8] İ. Karagöz and M. Öksüz, “Microstructures occurring in the joined thermoplastics sheets with friction stir welding,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 33, no. 2, pp. 503-515, 2018.
- [9] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” *Business Horizons*, vol. 60, no. 5, pp. 677-688, 2017.
- [10] Wohlers Associates Inc., “*3D printing and additive manufacturing state of the industry*,” Fort Collins, CO: Wohlers, USA, Rep., 2014.
- [11] G. Yıldırım, S. Yıldırım, ve E. Çelik, “Yeni bir bakış - 3 boyutlu yazıcılar ve öğretimsel kullanımı: Bir içerik analizi,” *Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi*, c. 13, s. 25, ss. 163-184, 2018.
- [12] R. Jiang, R. Kleer, and F.T. Piller, “Predicting the future of additive manufacturing: A delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030,” *Technologies Forecasting & Social Change*, vol. 117, pp. 84-97, 2017.
- [13] G. Özer, “Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme,” *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.*, c. 9, s. 1, ss. 606-621, 2020.
- [14] K. Şahin ve B.O. Turan, “Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin karşılaştırmalı analizi,” *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, c. 2, s. 2, ss. 97-116, 2018.
- [15] H.G. Lemu, “Study of capabilities and limitations of 3D printing technology,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1453, Apr 2012, Art. no. 857.
- [16] C.B. Williams, F. Mistree, and D.V. Rosen, “A functional classification framework for the conceptual design of additive manufacturing Technologies,” *J. Mec. Des.*, vol. 133, no. 12, Dec 2011, Art. no. 121002.
- [17] *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM F42, 2012.
- [18] Y. Huang and M.C. Leu, “*An NSF additive manufacturing workshop report 2013*,” University of Florida Center for Manufactory Innovation, USA, Rep. 2013.
- [19] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Vat photopolymerization processes,” in *Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed., New York, USA: Springer, 2015, pp. 63-103.
- [20] Loughborough University Additive Manufacturing Research Group. (2021, Jan 3). 7 Categories of additive manufacturing [Online]. Available: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>.

- [21] K. Chockalingam, N. Jawahar, K.N. Ramanathan, and P.S. Banerjee, "Optimization of stereolithography process parameters for part strength using design of experiments," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 29, pp. 79-88, 2006.
- [22] Z. Weng, Y. Zhou, W. Lin, T. Senthil, and L. Wu, "Structure property relationship of nano enhanced stereolithography resin for desktop SLA 3D printer," *Composites: Part A*, vol. 88, pp. 234-252, 2016.
- [23] S.O. Onuh and K.K.B. Hon, "Optimising build parameters for improved surface finish in stereolithography," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1998, vol. 38, no. 4, pp. 329-392, 1998.
- [24] H.K. Sürmen, "Eklemeli imalat (3D baskı): Teknolojiler ve uygulamalar," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 24 s. 2, ss. 373-392, 2019.
- [25] D. Dean, J. Wallace, A. Siblani, M.O. Wang, K. Kim, A.G. Mikos, and J.P. Fisher, "Continuous digital light processing (cDLP): Highly accurate additive manufacturing of tissue engineered bone scaffolds," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 7, no. 1, pp. 13-24, 2012.
- [26] A.P. West, S.P. Sambu, D.W. and Rosen, "A process planning method for improving build performance in stereolithography," *Computer-Aided Design*, vol. 33, pp. 65-79, 2001.
- [27] M.L. Griffith and J.W. Halloran, "Freeform fabrication of ceramics via stereolithography," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 79, no.10, pp. 2601-2608, 1996.
- [28] G.A., Brady and J.W. Halloran, "Stereolithography of ceramic suspensions," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 3, no.2, pp. 61-65, 1997.
- [29] C.E. Corcione, A. Greco, F. Montagna, A. Licciulli and A. Maffezzoli, "Slica moulds built by stereolithography," *Journal of Materials Science*, vol. 40, pp. 4899-4904, 2005.
- [30] Y. Yang, Z. Chen, X. Song, B. Zhu, T. Hsiai, P.I. Wu, R. Xiong, J. Shi, Y. Chen, Q. Zhou, and K.K. Shung, "Three dimensional printing of high dielectric capacitor using projection based stereolithography method," *Nano Energy*, vol. 22, pp. 414-421, 2016.
- [31] H. Wu, W. Liu, R. He, Z. Wu, Q. Jiang, X. Song, Y. Chen, L. Cheng, and S. Wu, "Fabrication of dense zirconia-toughened alumina ceramics through a stereolithography-based additive manufacturing," *Ceramic International*, vol. 43, pp. 968-972, 2017.
- [32] Z.C. Eckel, C. Zhou, J.H. Martin, A.J. Jacobsen, W.B. Carter, and T.A. Schaedler, "Additive manufacturing of polymer-derived ceramics," *Science*, vol. 351, no. 6268, pp. 58-62, 2016.
- [33] Formlabs. (2021, Jan 3). *SLA vs. DLP: Guide to resin 3D printers* [Online]. Available: <https://www.formlabs.com>.
- [34] J. Valentinčič, M. Peroša, M. Jerman, I. Sabotin, and A. Lebar, "Low cost printer for DLP stereolithography," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 63, no. 10, pp. 559-566, 2017.
- [35] M. Borlaf, A.S. Capdevila, C. Colominas, and T. Graule, "Development of UV-curable ZrO₂ slurries for additive manufacturing (LCM-DLP) technology," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 3797-3803, 2019.
- [36] Y. Pan, C. Zhou, and Y. Chen, "A fast mask projection stereolithography process for fabricating digital models in minutes," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 134, no. 5, Dec 2012, Art. no. 051011.

- [37] D. Dean, E. Mott, X. Luo, M. Busso, M.O. Wang, C. Vorwald, A. Siblani, and J.P. Fisher, "Multiple initiators and dyes for continuous Digital Light Processing (cDLP) additive manufacture of resorbable bone tissue engineering scaffolds," *Virtual Phy. Prototyping*, vol. 9, no. 1, pp. 3-9, 2012.
- [38] Y. Shin and M.L. Becker, "Alternating ring-opening copolymerization of epoxides with saturated and unsaturated cyclic anhydrides: Reduced viscosity poly(propylene fumarate) oligomers for use in cDLP 3D printing," *Polym. Chem.*, vol. 11, pp. 3313-3321, 2020.
- [39] A. Goyanes, H. Chang, D. Sedough, G.B. Hatton, J. Wang, A. Buanz A, S. Gaisford, and A.W. Basit, "Fabrication of controlled-release budesonide tablets via desktop (FDM) 3D printing," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 496, pp. 414-420, 2015.
- [40] J.G. Guitierrez, S. Cano, S. Schuschnigg, C. Kukla, J. Sapkota, and C. Holzer, "Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives," *Materials*, vol. 11, no. 5, May 2018, Art. no. 840.
- [41] D. Yadav, D. Chhabra, R.K. Gupta, A. Phogat, and A. Ahlawat, "Modeling and analysis of significant process parameters of FDM 3D printer using ANFIS," *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 1592-1604, 2020.
- [42] M.S. Alsoufi and A.E. Elsayed, "How surface roughness performance of printed parts manufactured by desktop FDM 3D printer with PLA+ is influenced by measuring direction," *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 5, pp. 211-222, 2017.
- [43] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, "Ekstrusion-Based Systems," in *Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed., New York, USA: Springer, 2015, pp. 147-173.
- [44] Z. Weng, J. Wang, T. Senthil, and L. Wu, "Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing," *Materials and Design*, vol. 102, pp. 276-283, 2016.
- [45] B. Akhoundi, A.H. Behraves, and A.B. Saed, "Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 38, no. 3, pp. 99-116, 2019.
- [46] B. Akhoundi and A.H. Behraves, "Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products," *Experimental Mechanics*, vol. 59, pp. 883-897, 2019.
- [47] R. Melnikova, A. Ehrmann, and K. Finsterbusch, "3D printing of textile-based structures by fused deposition modelling (FDM) with different polymer materials," *Materials Science and Engineering*, vol. 62, May 2014, Art. no. 012018.
- [48] V.G. Surange and P.V. Gharat, "3D printing process using fused deposition modelling (FDM)," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 1403-1406, 2016.
- [49] P. Stavropoulos and P. Foteinopoulos, "Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification," *Manufacturing Rev.*, vol. 5, no. 2, pp. 1-26, 2018.
- [50] K.V. Wong and A. Hernandez, "A review of additive manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, Aug 2012, Art. no. 208760.
- [51] P. Dudek, "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements," *Archives of*

Metallurgy and Materials, vol. 58, no. 4, pp. 1415-1418, 2013.

[52] Z. Chen, Z. Li, J. Li, C. Li, C. Lao, Y. Fu, C. Liu, Y. Li, P. Wang, and Y. He, "3D printing of ceramics: A review," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 661-687, 2019.

[53] Y.L. Yap, C. Wang, S.L. Sing, V. Dikshit, W.Y. Yeong, and J. Wei, "Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks," *Precision Engineering*, vol. 50, pp. 275-285, 2017.

[54] A. Cazón, P. Morer, and L. Matey, "PolyJet technology for product prototyping: tensile strength and surface roughness properties," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf.*, vol. 228, pp. 1664-1675, 2014.

[55] D. Blanco, P. Fernandez, and A. Noriega, "Nonisotropic experimental characterization of the relaxation modulus for PolyJet manufactured parts," *J. Mater. Res.*, vol. 29, pp. 1876-1882, 2014.

[56] D. Ibrahim, T.L. Broilo, C. Heitz, M.G. de Oliveira, H.W. de Oliveira, S.M.W. Nobre, J.H.G.D.S. Filho, and D.N. Silva, "Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet models in the reproduction of mandibular anatomy," *J. Cranio-Maxillo-Facial Surg.*, vol. 37, pp. 167-173, 2009.

[57] N. Meisel and C. Williams, "An investigation of key design for additive manufacturing constraints in multimaterial three-dimensional printing," *J. Mech. Des.*, vol. 137, no. 11, Nov 2015, Art. no. 111406.

[58] S. Tibbits, "4D printing: multi-material shape change," *Architl. Des.*, vol. 84, pp. 116-121, 2014.

[59] K. Yu, A. Ritchie, Y. Mao, M.L. Dunn, and H.J. Qi, "Controlled sequential shape changing components by 3D printing of shape memory polymer multimaterials," *Procedia IUTAM*, vol. 12, pp. 193-203, 2015.

[60] I.Q. Vu, L.B. Bass, C.B. Williams, and D.A. Dillard, "Characterizing the effect of print orientation on interface integrity of multi-material jetting additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 447-461, 2018.

[61] J. Dilag, T. Chen, S. Li, and S.A. Bateman, "Design and direct additive manufacturing of three-dimensional surface micro-structures using material jetting technologies," *Additive Manufacturing*, vol. 27, pp. 167-174, 2019.

[62] A. Khoshkhoo, A.L. Carano, and D.M. Bliersch, "Effect of surface slope and build orientation on surface finish and dimensional accuracy in material jetting processes," *Procedia Manufacturing*, vol. 26, pp. 720-730, 2018.

[63] H. Yang, J.C. Lim, Y. Liu, X. Qi, Y.L. Yap, V. Dikshit, W.Y. Yeong, and J. Wei, "Performance evaluation of ProJet multi-material jetting 3D printer," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 1, pp. 95-103, 2017.

[64] E.M. Palmero and A. Bollero, "3D and 4D printing of functional and smart composite materials," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, vol. 2, pp. 402-419, 2021.

[65] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, "Development of Additive Manufacturing Technology," in *Additive Manufacturing Technologies, 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, 2nd ed., USA: Springer, New York, 2015. pp. 19-41.

- [66] P.K. Gokuldoss, S. Kolla, and J. Eckert, "Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines," *Materials*, vol. 10, no. 6, June 2017, Art. no. 672.
- [67] Y. Bai and C.B. William, "Binder jetting additive manufacturing with a particle-free metal ink as a binder precursor," *Materials and Design*, vol. 147, pp. 146-156, 2018.
- [68] J.A. Gonzalez, J. Mireles, Y. Lin, and R.B. Wicker, "Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology," *Ceramics International*, vol. 42, pp. 10559-10564, 2016.
- [69] H. Miyanaji, N. Momenzadeh, and L. Yang, "Effect of printing speed on quality of printed parts in binder jetting process," *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 1-10, 2018.
- [70] M. Ziaee and N.B. Crane, "Binder jetting: A review of process, materials, and methods," *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 781-801, 2019.
- [71] W. King, A.T. Anderson, R.M. Ferencz, N.E. Hodge, C. Kamath, and S.A. Khairallah, "Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory," *Materials Science and Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 957-968, 2015.
- [72] W. King, A.T. Anderson, R.M. Ferencz, N.E. Hodge, C. Kamath, S.A. Khairallah, and A.M. Rubenchik, "Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges," *App. Phys. Rev.*, vol. 2, Dec 2015, Art. no. 041304.
- [73] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, and B. Kieback, "Powders for powder bed fusion: a review," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 4, pp. 383-397, 2019.
- [74] A.A. Martin, N.P. Calta, S.A. Khairallah, J. Wang J., P.J. Depond, A.Y. Fong, V. Thampy, G.M. Guss, A.M. Kiss, K.H. Stone, C.J. Tassone, J.N. Weker, M.F. Toney, T.V. Buuren, and M.J. Matthews, "Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing," *Nature Communications*, vol. 10, Apr 2019, Art. no. 1987.
- [75] A.T. Sutton, C.S. Kriewall, M.C. Leu, and J.W. Newkirk, "Powder characterisation techniques and effects of powder characteristics on part properties in powder-bed fusion processes," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 1, pp. 3-29, 2017.
- [76] A. Dass and A. Moridi, "State of art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design," *Coatings*, vol. 9, no. 7, June 2019, Art. no. 418.
- [77] W. Li, J. Zhang, X. Zhang, and F. Liou, "Effect of optimizing particle size on directed energy deposition of functionally graded material with blown pre-mixed multi-powder," *Materials Letters*, vol. 13, pp. 39-43, 2017.
- [78] M.A. Melia, H.D.A. Nquyen, J.M. Rodelas, and E.J. Schindelholz, "Corrosion properties of 304 stainless steel made by directed energy deposition additive manufacturing," *Corrosion Science*, vol. 152, pp. 20-30, 2019.
- [79] J.C. Haley, B. Zheng, U.S. Bertoli, A.D. Dupuy, J.M. Schoenung, and E.J. Lavernia, "Working distance passive stability in laser directed energy deposition additive manufacturing," *Materials and Design*, vol. 161, pp. 86-94, 2019.
- [80] J.C. Haley, J.M. Schoenung, and E.J. Lavernia, "Modelling particle impact on the melt pool and wettability effects in laser directed energy deposition additive manufacturing," *Materials Science & Engineering A*, vol. 761, June 2019, Art. no. 138052.

- [81] M.M. Hou. (2021, Jan 3). *Mitsubishi heavy industries to expand DED metal 3D printing line* [Online]. Available: <https://3dprint.com/276434/mitsubishi-heavy-industries-to-expand-ded-metal-3d-printing-line/>.
- [82] Mitsubishi Heavy Industries Group. (2021, Jan 3). *Directed Energy Deposition AM System* [Online]. Available: <https://www.mhi-machinetool.com/en/products/detail/lamda.html>.
- [83] Dassault Systemes. (2021, Jan 3). *3D Printing-Additive, Introduction to 3D printing-additive process* [Online]. Available: <https://make.3dexperience.com/processes/directed-energy-deposition>.
- [84] A. Huckstepp. (2021, Jan 3). *Digital Alloys' guide to metal additive manufacturing – Part 9, Directed Energy Deposition (DED)* [Online]. Available: <https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>.
- [85] S.K. Parupelli and S. Desai, “A comprehensive review of additive manufacturing (3D printing) : Processes, applications and future potential,” *Amerikan Journal Applied Sciences*, vol. 16, no. 8, pp. 244-272, 2019.
- [86] K.V. Wong and A. Herhandez, “A review of additive manufacturing,” *International Scholarly Research Notices*, vol. 2012, Aug 2012, Art. no. 208760.
- [87] C.K. Chua, S.M. Chou, and T.S. Wong, “A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 14, pp. 146-152, 1998.
- [88] B.G. Mekonnen, G. Bright, and A. Walker, “A study on state of the art technology of laminated object manufacturing (LOM),” *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future Lecture Notes in Mechanical Engineering*, In: Mandal D.K., Syan C.S. Ed., New Delhi, India: Springer, 2016, pp. 207-216.
- [89] İ. Karagöz, “An effect of mold surface temperature on final product properties in the injection molding of high-density polyethylene materials,” *Polym. Bull.*, vol. 78, pp. 2627-2644, 2021.
- [90] İ. Karagöz, “Bilgisayar destekli programlar kullanılarak hazırlanmış döküm kalıbı ve ürün tasarımının polimer kompozit malzemedeki üretilmesi,” *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, c. 5, s. 2, ss. 346-352, 2018.
- [91] İ. Karagöz, “Hardness change due to carburization time and material thickness during heat treatment of SAE 8620 (21NiCrMo2) plates,” *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 748-754, 2019.