

Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma

A research on the comparison of additive manufacturing technologies

Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK *¹ , Serkan KILIÇTEK ² , Serkan GÖK ³ , Necdet YAKUT ⁴ 

¹İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34295, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Aydın Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, 34295, İstanbul, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 14.02.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 24.04.2023

Öz

Eklemeli imalat yöntemi bilgisayar ortamında tasarımı gerçekleştirilen bir parçanın, herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmadan doğrudan üretilmesini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. İşlemin pratikliği sayesinde; tasarım özgürlüğü, ürünü kişiselleştirme imkanı, düşük atık miktarı, karmaşık şekilli yapıların hızlı bir şekilde oluşturulması ve seri üretimden önce ürünün hızlı prototiplemesini sağlayan gelecekte ismini ve etkisini daha çok hissedeceğimiz üretim yöntemlerinin başında gelmektedir. Çalışma kapsamında; eklemeli imalat yöntemleri, kullanılan malzemeler ve günümüzde trend olan uygulamaları kapsamlı olarak incelenmiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinin; havacılık, biyomedikal, otomotiv ve yapı sektörlerindeki yenilikçi uygulamaları tartışılmıştır. Eklemeli imalat alanında kullanılan metal, polimer, seramik ve kompozit malzemeler ile ilgili mevcut gelişmelerde çalışmada sunulmuştur. Bununla birlikte makalede katmanlı imalat yönteminin geliştirilmesinin ve yaygınlaştırılmasının önündeki engellere de değinilmiştir. Yapılan çalışmada, eklemeli imalat alanında yapılan geliştirmeler, yöntemin avantajları ve önündeki engeller ele alınmış ve gelecekteki uygulama alanları ile ilgili genel bir bakış açısı ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, Hızlı prototipleme, Katmanlı imalat, 3D yazıcı

Abstract

The additive manufacturing method is an innovative production method that enables a part designed in a computer environment to be produced directly without the need for any mold. Thanks to the practicality of the process; freedom of design, possibility of customizing the product, low waste amount, rapid creation of complex shaped structures and rapid prototyping of the product before mass production are among the production methods whose name and influence we will feel more in the future. In this paper emphasizes additive manufacturing methods, materials used and trending applications. Additive manufacturing methods; Innovative applications in aerospace, biomedical, automotive and construction sectors are discussed. Current developments related to metal, polymer, ceramic and composite materials used in additive manufacturing are presented in the study. In addition, the obstacles to the development and dissemination of the additive manufacturing method are also mentioned in the article. In paper, the improvements made in the field of additive manufacturing, the advantages of the method and the obstacles in front of it were discussed and an overview of the future application areas was presented.

Keywords: Additive manufacturing, Layered manufacturing, Rapid prototyping, 3D printing

* Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK; dilsadakgumus@aydin.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Katmanlı imalat ya da diğer adıyla eklemeli imalat teknolojisi, CAD programları yardımıyla oluşturulan modellerin katman katman yazdırılarak nesnelerin üretilmesi olarak tanımlanmaktadır (Vafadar vd., 2021). İlk olarak 1980 yılında “3B System” şirketi “Stereolitografi” (Stereolithography-SLA) yöntemini geliştirerek ticarileştirmiştir. Buradaki amaç daha çok hızlı prototipleme işleminin gerçekleştirilmesi idi. Bu yöntemin ardından 1990 yılının ilk yarısında “Helysis” şirketi lamine nesne imalatı yöntemini geliştirmiş ve bunu takiben birçok katmanlı imalat yöntemi ortaya çıkmaya devam etmiştir. Katmanlı imalat yöntemleri, geleneksel üretim metotları ile üretilmesi zor ya da üretilmeyecek ürünlerin tek aşamalı olarak hızlı bir şekilde üretilmesine olanak kılmaktadır. Bu da tasarımcılara ve mühendislere fazlasıyla özgürlük imkanı sağlamaktadır. Bu teknoloji parça sayısından bağımsız olarak montaj süresini azaltmış, maliyeti düşürmüş ve malzeme sarfiyatını minimuma indirgemiş veya tamamen ortadan kaldırılmıştır (Özkan, 2019). Ayrıca yöntem müşteri talebini açık şekilde karşılayabilecek ürünler üretilbilir, depolama ihtiyaçlarını ortadan kaldırabilir ve özellikle kritik parçalar için teslim süresini en aza indirgeyebilmektedir (Wohlers vd., 2014).

Katmanlı (eklemeli) imalat herhangi bir kalıp, kesici takım ya da hat kurulumu olmadan doğrudan tasarımdan ürüne geçişini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. Bu durum da ara işlemlere ihtiyaç duyulmadan istenilen parçanın tek seferde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Üretimin kolaylığı, istenilen parçanın tek seferde elde edilmesi, katmanlı imalat makinelerin kontrolünün diğer üretim araçlarına göre daha kolay olması, birçok sektörde katmanlı üretim yöntemlerinin kullanılmasını cazip kılmaktadır. Günümüzde birçok sektörde katmanlı (eklemeli) imalat ile üretim yöntemleri uygulanmaktadır.

2. Katmanlı imalat teknolojileri

2. Additive manufacturing technology

Birçok ülkenin endüstri şirketleri çeşitli katmanlı imalat cihazlarını ve yöntemlerini tanıtmıştır. Katmanlı imalat yöntemleri sınıflandırılırken farklı parametreler göz önünde tutulmuştur. Buna bağlı olarak üretim sırasında gerçekleşen kimyasal ve fiziksel olaylara göre; kimyasal, termofiziksel, sıvı jet, katı jet ve ultrasonik süreç yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır (Guo vd., 2013). Günümüzde ise katmanlı imalat yöntemleri başlangıç malzemesine göre; sıvı, filament, toz ve katı levha olarak ayrılmaktadır (Kruth vd., 1998). Çoğu zaman bu sınıflandırma sadece sıvı, katı ve toz şeklinde yapılmaktadır (Sürmen vd., 2019). Katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması ve kullanılan teknolojileri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Katmanlı imalat teknolojileri

Table 1. Additive manufacturing technology

Başlangıç malzemesi	Kategori	Yöntem	Üretim teknolojisi	Malzeme	Güç kaynağı
Sıvı	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal enerji
	Polimerize	Fotopolimerizasyon	SLA	Fotopolimer, Seramik	UV
		Malzeme püskürtme	DLP	Fotopolimer, Wax	Projeksiyon
Katı	Yapışık objeler	Sac laminasyon	PJ	Kağıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer ışını
			LOM		
Toz	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	PA, Polimer	Yüksek-güçlü lazer ışını
			DMSL SLM EBM	Metal tozu, Seramik tozu	Yüksek-güçlü lazer ışını
	Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu,	Elektron ışını
					Termal enerji

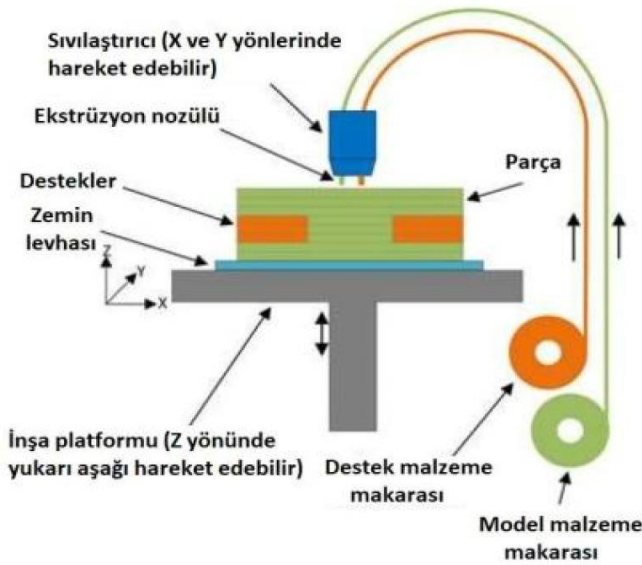
2.1. Eriyik biriktirme (yığma) ile modelleme

2.1. Fused deposition modelling-FDM

Piyasada birçok çeşidinin bulunması, maliyetinin düşük olması, kolay kullanımı, sıcak erime ve yapışma özelliklerinin iyi olmasından dolayı en yaygın olarak kullanılan 3B baskı teknolojisidir. Bu yöntemde baskı malzemesi olarak çoğunlukla polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadiyen stiren (ABS), Polikarbonat (PC) ve karbon fiber katkılı polimer filamentler tercih edilmektedir (Zhang vd., 2020). Bu yöntemin çalışma prensibi, makaraya sarılmış filamentin ucu ekstrüzyonda bulunan yuvaya takılmakta ve filamentin nozulun çıkış noktasına doğru hareket ettirilmesi esasına dayanır. Nozul çıkış noktasında filament camsı geçiş sıcaklığına ulaşana kadar ısıtılmaktadır. Yeterli sıcaklığa ulaştığında ise filament basım tablası üzerine daha önceden G kodları belirlenmiş şekli elde edebilmek için katman katman dökülmektedir.

Geleneksel polimer işleme teknikleri ile FDM yöntemi kıyaslandığında yöntemin oldukça yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir (Nabipour vd., 2020). FDM yöntemi kısıtlı malzeme kullanıma sahip olan bir prostestir (Perez vd., 2014). Bu kısıtlı kullanımı ortadan kaldırmak için ikinci bir nozul kullanılarak farklı malzemeleri sisteme beslemek mümkün olabilmektedir. Ayrıca çift nozul sayesinde farklı renklerde filamentler seçilerek renkli parça üretimleri de gerçekleştirilebilmektedir (Baca vd., 2020). Özellikle çift nozul kullanılan FDM teknolojisinde karmaşık parçaların üretimi daha kolay olmaktadır. Karmaşık parçalar oluşturulurken destek parçalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu destek parçaları suda veya solvent içerisinde çözülebilen malzemelerden imal edilmiş filamentlerden basılmaktadır. İkinci nozulun en önemli işlemlerinden birisi de bu destek parçalarını yazdırmaktır (Sürmen vd., 2019).

Eriyik biriktirme yöntemi ile üretilen parçalar üstün mekanik, kimyasal ve termal özelliklere sahip olmaktadır. Bu yöntemin önemli avantajları kullanım kolaylığı, uygun maliyeti ve çevre dostu olmasıdır. Baskı hızının düşük olması, metal malzemeler için pek uygun olmaması ve yüzey çözünürlüğünün düşük olması da yöntemin dezavantajları olarak ortaya çıkmaktadır (Dudek, 2013). Şekil 1'de FDM teknolojisinin şematik şekline yer verilmiştir.



Şekil 1. FDM yönteminin şematik gösterimi (Özer, 2020)

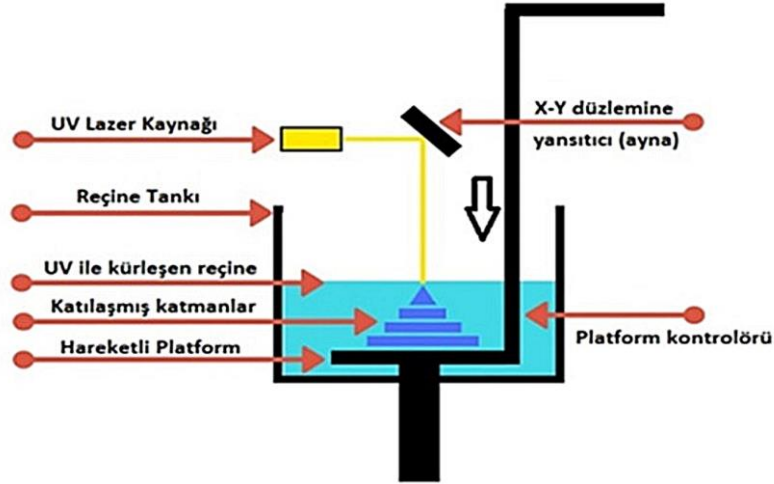
Figure 1. Schematic representation of the FDM method (Özer, 2020)

2.2. Stereolitografi

2.2. Stereolithography-SLA

Ticarileştirilmiş ilk katmanlı imalat yöntemi olan SLA bu alandaki en yaygın yöntemlerdendir. Oda sıcaklığında sıvı formunda bulunan fotopolimer reçinenin (ışığa duyarlı) kontrollü bir ışık kaynağı ile katılaştırılması prensibine dayanmaktadır (Jin vd., 2018). Katılaştırma işlemi klasik katmanlı imalat mantığına uygun olarak katman katman birikerek yapılmaktadır. Baskı tabakası üzerine dökülen fotopolimer reçine lazer ışını aracılığı ile katılaştırılmaktadır. Her bir tabaka lazer ışınları ile katılaştırıldıktan sonra yenisi inşa

edilmekte ve son katmanın da eklenmesi ile nihai ürün oluşturulmaktadır (Melchels vd., 2010). SLA yönteminde kullanılan fotopolimer reçinenin oldukça esnek bir yapıya sahip olması yöntemin önemli avantajlarının başında gelmektedir. Reçine sayesinde yapışma daha kolay gerçekleşmektedir. Ayrıca reçine, içerisine farklı metal veya seramik tozlarının eklenmesine izin vererek kompozit bir yapının oluşmasını sağlar. Bu avantajlarının yanı sıra atık malzeme oluşturmadan karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan verir. UV dayanımlarının düşük olmasından dolayı güneş ışınlarına maruz kaldığı zaman mekanik özelliklerinde düşüş ve görsel anlamda değişim görülebilmesi ise yöntemin dezavantajları olarak bilinmektedir (Cuchet vd., 2017). Şekil 2’de SLA yönteminin şematik şekli gösterilmektedir.



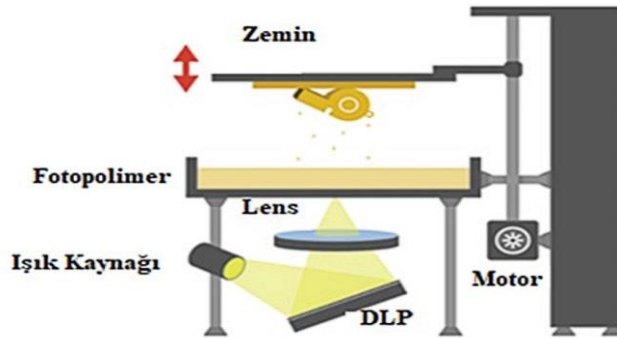
Şekil 2. SLA yönteminin şematik gösterimi (Sürmen vd., 2019)

Figure 2. Schematic representation of the SLA method (Sürmen et al., 2019)

2.3. Dijital ışık işleme

2.3. Digital light processing-DLP

DLP ve SLA yöntemleri aynı gruba ait katmanlı imalat yöntemi olsa da iki yöntem arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bu iki baskı teknolojisinin çalışma prensipleri temelde birbirine çok benzese de pratikte kullanılan ışık kaynakları farklıdır. SLA yönteminde güç kaynağı olarak lazer ışını kullanılmakta iken DLP yönteminde projektör kullanılmaktadır (Santoliquido vd., 2019). DLP yönteminde projektör genel olarak reçine havuzunun altında konumlanmaktadır. Reçine bu yöntemde tek bir seferde kürleştirilmektedir. Bu durum daha hızlı baskı hızı sağlamaktadır. SLA yönteminde ise kürleştirme işlemi lazer ışınının geçtiği bölgelerde gerçekleşmekte ve buna bağlı olarak lazer ışını istenilen geometrik şekil doğrultusunda hareket etmektedir. DLP yöntemi ile kaliteli ürünlerin basılması projektörün basım hacmi ve çözünürlüğü ile doğrudan ilişkilidir. DLP yönteminde bazı durumlarda projektörün konumu değiştirilebilmekte ve bu değişikliğe bağlı olarak; aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı şeklinde tanımlanabilmektedir. Projektör basılacak olan nesneye aşağıdan ışık gönderiyorsa aşağıdan yukarı, yukarıdan ışık gönderiyorsa da yukarıdan aşağı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3’te DLP yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



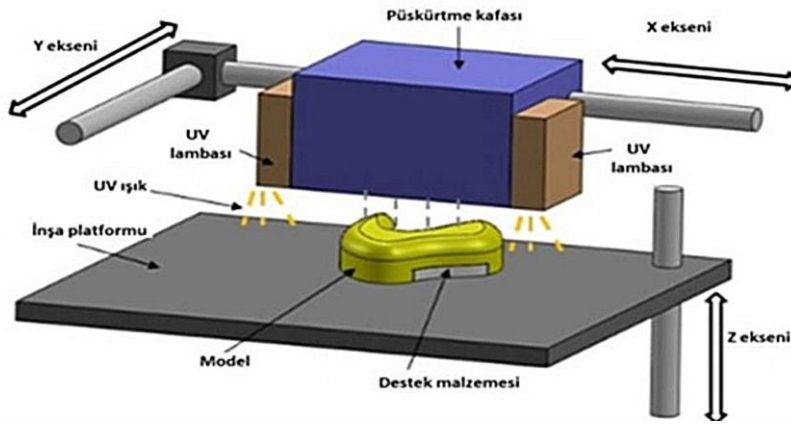
Şekil 3. DLP yönteminin çalışma prensibi (Santoliquido vd., 2019)

Figure 3. Working principle of DLP method (Santoliquido et al., 2019)

2.4. Çoklu püskürtme

2.4. Polyjet-PJ

PJ yöntemi, akrilik bazlı fotopolimerlerin baskı tabakasına püskürtülmesi esasına dayanmaktadır. Baskı tabakasına yerleştirilmiş olan UV kaynakları yardımıyla da püskürtülen fotopolimer reçine kürleşmektedir. Bu işlem tıpkı diğer katmanlı imalatlarda olduğu gibi en son şekil oluşana kadar katman katman devam etmektedir (Wong vd., 2012). PJ yöntemi ile aynı anda birden fazla ürünü hızlı bir şekilde basılabilmektedir. Bu sayede basılan ürünlerin farklı bölgelerinde farklı mekanik özellikleri elde etmek mümkün olur. Aynı zamanda karmaşık şekilli parçaların üretimi için de oldukça ideal bir yöntem olduğu literatürde yer almaktadır. Şekil 4'te Polyjet yönteminin şematik şekli gösterilmiştir.



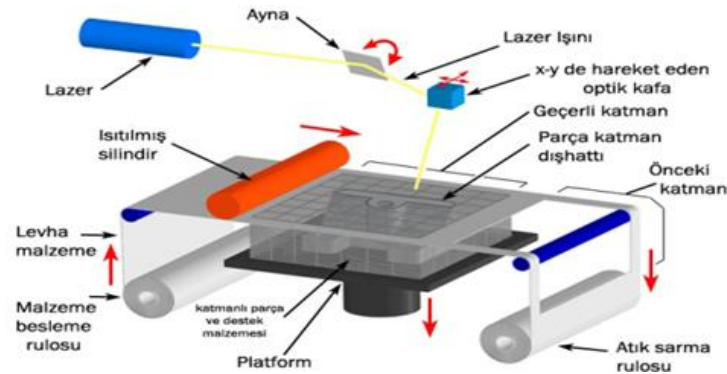
Şekil 4. Polyjet yönteminin şematik şekli (Udroiu vd., 2017)

Figure 4. Schematic figure of the polyjet method (Udroiu et al., 2017)

2.5. Lamine nesne imalatı

2.5. Laminated object manufacturing-LOM

LOM teknolojisi parça üretmek için hem ekleme hem de çıkarma işlemlerinin birlikte yapıldığı bir yöntemdir. Temel mantık diğer katmanlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi ürünün katman katman oluşturulması prensibine dayanmaktadır. LOM yönteminde malzemeler levha biçiminde kullanılmaktadır. İlk aşamada katmanlar birbirine termal bir yapıştırıcı kullanarak ısı ve basınç yardımı ile yapıştırılmaktadır. Daha sonra malzeme karbondioksit lazer yardımı ile önceden CAD programında belirlenen geometrik şekle göre kesilmekte ve son ürün elde edilene kadar işlem tekrarlanmaktadır (Fraizer vd., 2014). Bu yöntemde metaller, kompozitler ve kağıt malzemeler kullanılabilir (Krznar vd., 2014). LOM yönteminin düşük maliyetli olması, süreç boyunca deformasyon ve faz değişiminin ortaya çıkmaması, büyük parçaların kolaylıkla işlenmesi ve destek parçalara ihtiyaç duyulmaması bu teknolojinin avantajlarıdır. Kompleks parçaların üretiminin zorluğu, atık malzeme oluşumu ve malzemenin mekanik özelliklerinin yöne bağlı olması ise yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır (Udroiu vd., 2014). Şekil 5'te LOM yönteminin çalışma prensibine yer verilmiştir.



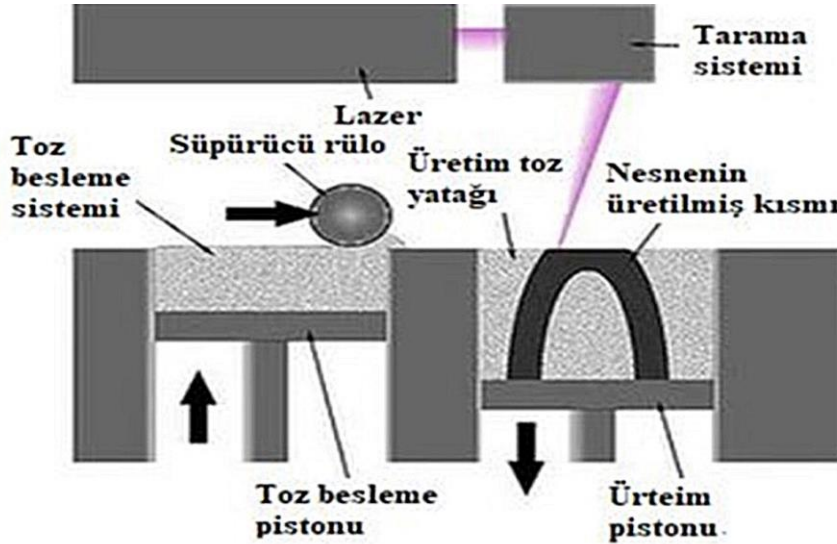
Şekil 5. LOM yönteminin çalışma prensibi (Özkan, 2019)

Figure 5. Working principle of LOM method (Özkan, 2019)

2.6. Seçmeli lazer sinterleme

2.6. Selective laser sintering-SLS

SLS teknolojisi toz malzemelerin kullanıldığı ve güçlü lazer ışını kullanımı gerektirdiğinden pahalı bir katmanlı imalat yöntemidir. Bu işlem sırasında tozlar tamamen eritilmemektedir. Yüksek güçlü karbondioksit lazer ışını kullanılarak tozlar sinterlenir ve birbirleriyle birleşmeleri sağlanır. İlk katmanın meydana gelmesinin ardından toz odasında bulunan tozlar, oluşturulmuş olan katman üzerine dökülür ve tekrar lazer ışını kullanılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem diğer katmanlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi nihai ürün elde edilene kadar devam etmektedir (Udroiu vd., 2014). SLS yönteminde birçok farklı polimer, metal, seramik malzeme türleri ve kombinasyonları kullanılabilir. Şekil 6’da SLS yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



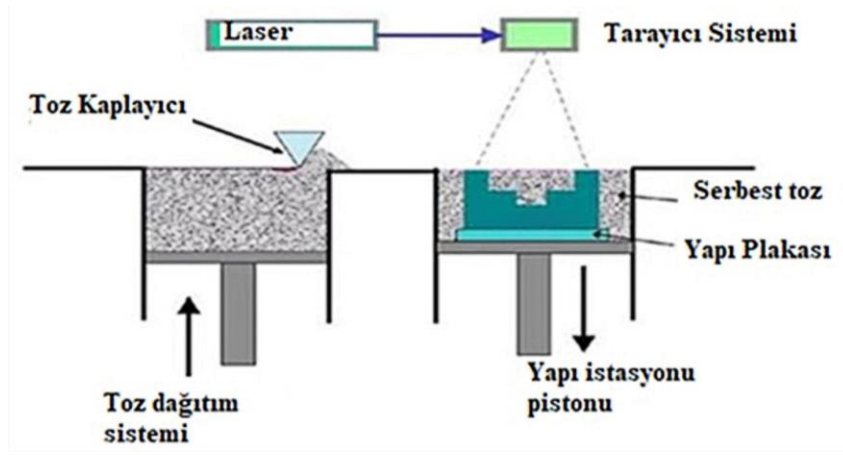
Şekil 6. SLS yönteminin çalışma prensibi (Singh vd., 2016)

Figure 6. Working principle of SLS method (Singh et al., 2016)

2.7. Direkt metal lazer sinterleme

2.7. Direct metal laser sintering-DMSL

DMSL yöntemi mühendislik uygulamaları ve endüstride kullanımı giderek yaygınlaşan önemli bir katmanlı imalat metodudur. Bu yöntem sayesinde geliştirilme aşamasındaki prototipler hızlı şekilde üretilebilmekte ve aynı zamanda geleneksel yöntem ile üretilemeyen hasarlı formlar yeniden inşa edilebilmektedir (Badiru vd., 2014). Ayrıca bu yöntem ile 3B data verilerinden yararlanılarak işlevsel metal parçalar üretilebilmektedir. Üretilen metal parçaların mekanik özellikleri döküm ile üretilmiş parçalar ile kıyaslanabilecek nitelikte olmaktadır (Dupláková vd., 2018). DMSL teknolojisi, çok ince metalik toz katmanlarının bir lazer ışını yardımı ile eritilmesi temeline dayanmaktadır. Öncelikle ürünün 3B CAD modeli katmanlar şeklinde kesilir ve ardından iş parçası katmanın üzerine istiflenir. Lazer ışını da istenilen geometri doğrultusunda metal tozlarını ergitir ve işlem tamamlanmış olur. Dikkat edilmesi gereken en önemli unsur ürünün basım süresi boyunca taban platformuna bir destek yapısı ile doğru pozisyonda sabitlenmesidir. Bu yöntemde bir katmanın minimum kalınlığı 20 mikron olmalıdır (Dupláková vd., 2018). DMSL yönteminin mühendislik uygulamalarında öne çıkmasının sebepleri; üretilen parçalarda yüksek mukavemet ve tokluk değerleri, üretim süresinin kısa ve maliyetinin düşük olması, düşük malzeme tüketimi ve parçanın direkt olarak müşteriden gelen 3B CAD verilerinden üretilebilmesidir. İlk yatırım maliyetinin yüksek olması, yüksek enerji kaynağının kullanılması, parça boyutunun kullanılan ekipmana göre belirlenmesi ve üretim sonrasında bitirme işlemlerine ihtiyaç duyulması ise yöntemin olumsuz yönleri olarak sıralanabilir. Şekil 7’de DMSL yönteminin şematik şekline yer verilmiştir.

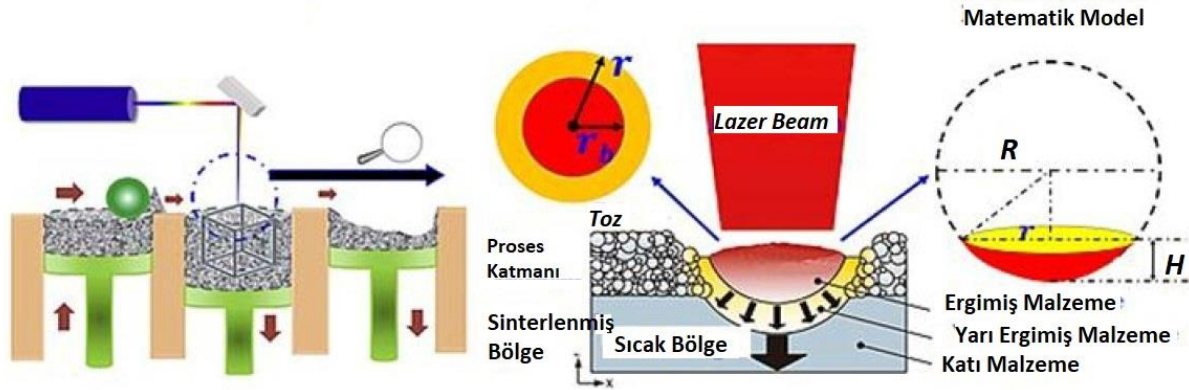


Şekil 7. DMLS yönteminin şematik şekli (Dupláková vd., 2018)
Figure 7. Schematic of the DMLS method (Dupláková et al., 2018)

2.8. Seçmeli lazer ergitme

2.8. Selective laser melting-SLM

SLM yöntemi, SLS yönteminden türetilmiş bir prosestir. Tek farkı, SLS yönteminde parçayı oluşturmak için sinterlenen tozlar bu yöntemde tamamen eritilmektedir. Bu şekilde oldukça iyi mekanik özellikler elde edilmektedir. SLM teknolojisinin çok büyük enerjilere ihtiyaç duymasından ötürü kontrol edilmesi oldukça zordur. Bu da parçada deformasyona neden olabilmektedir. SLM yöntemi ile DMLS yöntemi birbirlerine oldukça benzemektedir. Çoğu kaynakta bu iki teknolojinin eş anlamda kullanıldığı da görülmektedir. Bu teknolojiler Avrupa'da yaygın olarak SLM, ABD'de ise DLMS olarak bilinmektedir (Patterson vd, 2017). Fakat aralarında önemli bir fark bulunmaktadır. SLM sistemleri özellikle polimer kaplı tozlarla kullanılmakta iken DMLS sistemleri ise kaplamasız metal tozlarının kullanılmasına olanak sağlayan bir tekniktir (Mover vd, 2015). Genel olarak yöntemde titanyum, paslanmaz çelik, kobalt ve krom tozları kullanılmaktadır. Titanyumun yaygın kullanımından dolayı medikal ve havacılık sektörlerinde tercih edilen bir katmanlı imalat yöntemidir (Guo vd., 2013). Şekil 8'de SLM yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



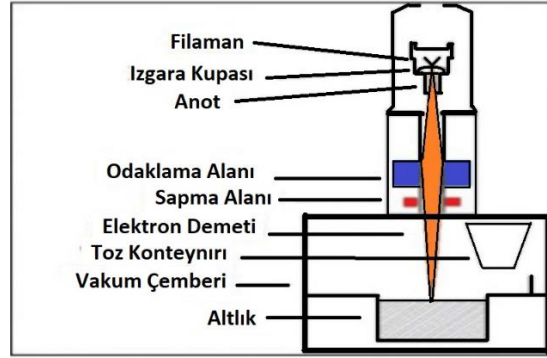
Şekil 8. SLM yönteminin çalışma prensibi (Liu vd., 2017)
Figure 8. Working principle of SLM method (Liu et al., 2017)

2.9. Elektron ışınli ergitme

2.9. Electron beam melting-EBM

EBM yöntemi DMLS yöntemine teknik olarak oldukça benzemektedir. Tek farkı, bu yöntemde güç kaynağı olarak lazer ışınları yerine elektronların kullanılmasıdır. Kullanılan tozlar vakum ortamında elektronlar vasıtasıyla ergitilmektedir (Chua vd., 2014). Bu yöntemde elektron tabancaları, ışın tabancası, plazma elektronu gibi çeşitli ekipmanlara ihtiyaç duyulabilmektedir. EBM teknolojisinde daha çok metal tozları ve filamentler kullanılmakla birlikte en yaygın kullanılan malzeme titanyumdur. Yöntemin en çok karşılaşılan sorunu ise yüksek ısıdan kaynaklanmaktadır. EBM teknolojisinde elde edilmek istenen geometrik şekle göre

tozlar birbirine yapıştırılır ve katman oluşturulur. İlk katmanın elde edilmesinin ardından tozların bulunduğu platform kademe kademe aşağı doğru hareket ettirilir ve yeni tozlar eklenerek bir sonraki katman meydana getirilir. Bu işlem parça oluşturulana kadar devam ettirilir (Negi vd., 2019). Şekil 9’da EBM yönteminin örnek bir şekli gösterilmiştir.

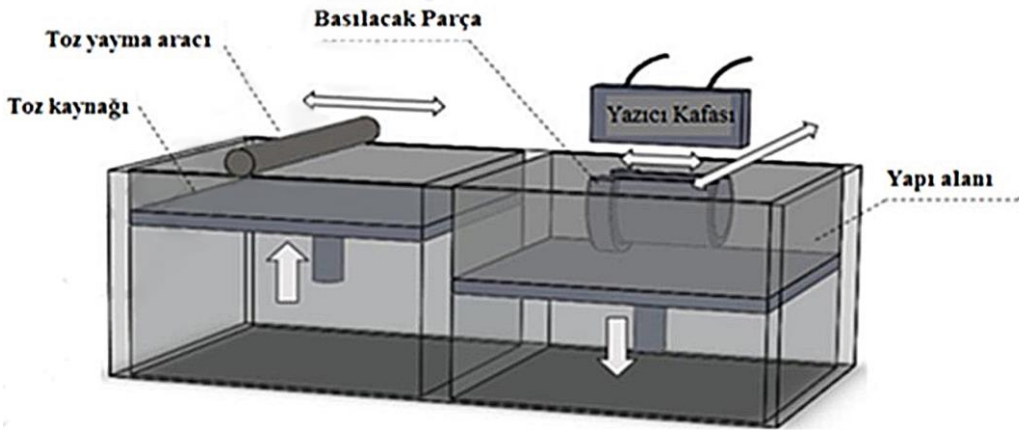


Şekil 9. EBM yönteminin şematik şekli (Santoliquido vd., 2019)
Figure 9. Schematic of the EBM method (Santoliquido et al., 2019)

2.10. Bağlayıcı (Yapıştırıcı) püskürtme

2.10. Binder jetting-BJ

Bağlayıcı püskürtme teknolojisi ilk olarak 1990 yılında MIT tarafından geliştirilmiş ticari bir 3B baskı yöntemidir. Kum, cam, polimer ve metal türü malzemeler işlenebilmektedir. BJ yöntemi ile ürün elde edilmek istendiğinde takip edilmesi gereken adımlar; baskı, kütleme, toz temizleme, sinterleme, süzme, tavlama ve bitirme olarak sıralanmaktadır. Bu adımlar BJ yöntemini diğer katmanlı imalat yöntemlerinden ayırmaktadır (Ziaee vd., 2019). Bu teknolojiye katmanlar arası birleştirmenin sağlanabilmesi için tozun üzerine yapıştırıcı püskürtülmektedir. Böylece ilk katman meydana getirilmiş olmaktadır. Bir katman bittikten sonra step motoru yardımı ile elektrikli kızılötesi ısıtıcın altına doğru hareket ettirilir ve fazla yapıştırıcı uzaklaştırılır. Daha sonra yazıcı tabanı aşağı doğru hareket ettirilir ve yeni toz tabakası eşit bir şekilde katman üzerine yayılır. Bu işlem ürün elde edilinceye kadar tekrarlanarak devam ettirilir (Ziaee vd., 2019). Şekil 10’da BJ yönteminin şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 10. BJ yönteminin şematik gösterimi (Ziaee vd., 2019)
Figure 10. Schematic representation of the BJ method (Ziaee et al., 2019)

3. Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler

3. Materials used in additive manufacturing technologies

Katmanlı imalat teknolojilerinin gelişmesindeki en önemli katkılardan birisi de kullanılan malzeme yelpazesinin artmasıdır. Günümüz imalat yöntemlerinde farklı malzemeler kullanılabilir ve bu durum üretilebilecek ürün çeşitliliğini olumlu yönde etkilemektedir (Mazzanti vd., 2019). Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde parça yüzeyinden malzeme kaldırılarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilirken, katmanlı

imalat yöntemlerinde ise bu durumun tam tersi olarak imalat işlemi malzemenin katman katman artırılması şeklinde gerçekleşmektedir (Diksu, 2021). Toz veya tel biçimindeki malzemeler, istenen parçayı oluşturmak için bir ısı kaynağı yardımı ile sinterlenmekte veya camsı geçiş sıcaklığına kadar ısıtılarak eritilmektedir. Erime ile eş zamanlı olarak önceden oluşturulmuş model bilgisayar ortamından aktarılarak nozul sayesinde katman katman ortaya çıkmaktadır (Brandl vd., 2011). Gelişen katmanlı imalat teknolojisi sayesinde birçok farklı malzeme bu yöntemlere entegre edilebilmektedir. Ancak en yaygın olarak kullanılan katmanlı imalat teknolojisi malzemeleri; polimerler, metal ve alaşımları, biyomalzemeler, kompozitler, seramikler, yapı malzemeleri ve akıllı malzemeler şeklinde sıralanabilmektedir (Bhatia vd., 2021).

3.1. Polimerler

3.1. Polymer

Polimer malzemeler kolay şekillendirilebilme, hafiflik, düşük maliyet, iyi mekanik özellikler ve aynı zamanda farklı katmanlı imalat yöntemlerine kolay entegre olabilmelerinden dolayı 3B baskı teknolojisinde en yaygın ve temel olarak kullanılan malzemelerdir (Ngo vd., 2018). Katmanlı imalat yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan polimer çeşitleri PLA (poliaktik asit), ABS (akrilonitril bütadien stiren), PC (polikarbonat), PET (polietilen tereftalat), ASA (akrilonitril stiren akrilat), PA (nylon), HIPS (yüksek darbe dayanımlı polistiren), TPC (termoplastik polyester elastomer) ve PEEK (polieter eter keton)'dır (Wojtyła vd., 2017). ABS polimeri kolay kullanılabilir olması, iyi mekanik özellikleri ve uygun maliyetli olmasından dolayı oldukça popüler bir malzemedir (Swetham vd., 2017). ABS polimeri amorf yapıya sahip olmaları ve tam bir erime noktaları olmadıkları için camsı geçiş sıcaklığı olan 105°C'nin altında bir değerde kullanılmaktadır. Mekanik özelliklerinin en iyi olduğu sıcaklık aralığı ise -20°C ila 80°C'dir (Margi vd., 2022). PLA da tıpkı ABS gibi 3B baskı teknolojisinde en çok kullanılan polimer malzemelerdendir. PLA, şeker kamışı, nişasta gibi doğal malzemelerden üretildiği için aynı zamanda biyobozunur malzeme olarak da bilinmektedir. PLA'nın kimyasal yapısına bakıldığında, di-ester ve laktik asit olmak üzere iki farklı monomerden meydana gelmektedir.

PLA yapısal olarak incelendiğinde ise yarı kristal ve amorf yapılara sahip olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak 55°C camsı geçiş sıcaklığına ve 180°C ergime sıcaklığına sahiptir. PLA geleneksel polimer malzemeler ile kıyaslandığında iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir (Swetham vd., 2017). Polimer malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı katmanlı imalat yöntemleri Fused Deposition Modelling (FDM), Stereolithography (SLA) ve Laminated Object Manufacturing (LOM) olarak sıralanmaktadır (Margi vd., 2022).

3.2. Metaller ve alaşımları

3.2. Metals and alloys

Metal ve alaşımları, polimer malzeme grubundan sonra katmanlı imalat teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan diğer malzeme grubunu oluşturmaktadır. Katmanlı imalatta kullanılan metal ve alaşımları özellikle prototip üretim, araştırma ve küçük ölçekli üretimlerde tercih edilmektedir. Bu kapsamda metal ve alaşımlarının kullanılması sayesinde kompleks geometriye sahip ürünler kolay bir şekilde basılabilmektedir (Duda vd., 2022). Titanyum, alüminyum, çelik, nikel, bakır, altın ve bronz gibi birçok metal ve alaşımları katmanlı imalat yöntemlerinde kullanılmaktadırlar. Çelikler birçok üretim yönteminde olduğu gibi katmanlı imalatta da yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle östenitik paslanmaz çelik ve takım çelikleri bu alanda kendilerine önemli bir yer edinmiştir (Özsolak, 2022). Çoğu metal malzemeye kolay erişim sağlanabilmektedir. Fakat polimerlere göre düşük baskı hızına sahip olup maliyetleri yüksektir. 3B baskı metal yazıcıları lazer ya da elektron ışını gibi metali eritebilecek bir kaynağa ihtiyaç duymaktadırlar. Bu yöntemlerde toz veya tel şeklinde malzemeler kullanılmaktadır. Eriyen metal katman katman biriktirilerek ürün elde edilmektedir (Duda vd., 2022).

3.3. Kompozitler

3.3. Composites

Kompozit, en az iki ya da daha fazla, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin, makro seviyede bir araya gelmesiyle birlikte oluşan yeni ve daha üstün özellikteki malzeme demektir. Bu malzemeler uzay, biyomedikal, elektronik, spor malzemeleri, otomotiv gibi çok geniş alanlarda kullanılmaktadırlar (Bhatia vd., 2021). Kompozit malzemeler kendisini oluşturan malzemelerle kıyaslandığı zaman daha iyi mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. 3B yazıcıları sayesinde basılabilen kompozitlerin düşük maliyeti, kolay

şekillenebilmesi ve özelleştirilebilmesinden dolayı katmanlı imalatta kullanılabilirliği artmaktadır (Singh vd., 2020). Katmanlı imalat yöntemlerinde polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler kullanılabilir (Bourell vd., 2017).

Polimer matrisli kompozitler (PMK), içerisine takviye fazı olarak partiküller, fiberler, metallerin ve seramiklerin katılması ile elde edilen kompozit çeşididir. PMK'ler katmanlı imalat yöntemlerinde filament şeklinde kullanılmaktadırlar. Kompozit filamentlerin en önemli özellikleri; boyutsal stabilite, sert, ısıya dayanıklı ve yüksek yüzey kalitesidir (Bourell vd., 2017). Metal matrisli kompozitler (MMK), katmanlı imalat yöntemi ile üretilirken partikül şeklinde veya lif şeklinde bulunmaktadırlar. Özellikle partikül (toz) şeklinde olan MMK üretiminde sinterleme sıcaklığına ulaşabilmek için lazer ya da elektron ışın kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır (Bourell vd., 2017). Seramik matrisli kompozitler, özellikle biyomalzemelerin üretiminde önemli bir yer kaplamaktadır. Polimer içerisine seramiklerin katılması ya da seramik partiküllerinin karıştırıcı yardımıyla homojenleştirilmesi sonucu elde edilmektedirler. Katmanlı imalat teknolojisi ile üretilen kompozit malzemelerin oluşturulması için yaygın olarak Fused Deposition Modelling (FDM), Stereolithography (SLA), Direct Ink Writing (DIW), Laminated Object Manufacturing (LOM), Liquid Deposition Modelling (LDM), Selective Laser Sintering (SLS) ve Composite-Based Additive Manufacturing (CBAM) yöntemleri kullanılmaktadır (Bhatia vd., 2021).

3.4. Seramikler

3.4. Ceramics

Seramik malzemeler sert, kırılğan, ısı ve korozyona karşı yüksek dirence sahip olan malzeme türü olarak tanımlanmaktadır (Smith, 1986). Katmanlı imalat teknolojisinde seramikler, bulamaç bazlı, çamur bazlı ve toz bazlı olarak kullanılmaktadır. Bulamaç bazlı seramikler sıvı ya da yarı-sıvı yapı içerirken toz bazlı seramikler ise partikül yapı içermektedirler. Katmanlı imalat teknolojisi ile üretilen seramikler uzay, sağlık ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Bhatia vd., 2021). Seramik malzemeler 3B baskı teknolojisinde Ink Jet, Powder Bed Fusion ve Stereolithography üç ana yöntemi ile ön plana çıkmaktadır (Singh vd., 2020). Bu yöntemler dışında Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Laminated Object Manufacturing (LOM) ve Fused Deposition Modelling (FDM) teknikleri ile de üretilebilmektedir (Bhatia vd., 2021).

3.5. Biyomalzemeler

3.5. Biomaterials

Sağlık sektöründeki ürünlerin ihtiyaçlarını karşılayabilmek katmanlı imalat yöntemleri bu alanda da kritik bir öneme sahiptir. Yapılan araştırmalar, son yıllarda bu alandaki 3B baskı teknolojisinin kullanımının arttığını göstermektedir. Bu artışın en önemli nedenleri; baskı hassasiyeti, baskı hızı, karmaşık parçaların üretilebilmesi, düşük maliyet ve malzeme israfının azalması olarak belirtilmektedir (Bhatia vd., 2021). Katmanlı imalatın gelişmesi, tıp alanına da olumlu bir şekilde yansımaktadır. Bu sayede medikal ekipmanlar, yapay organ üretim çalışmaları ve implant malzemelerinde büyük ilerlemeler meydana gelmiştir ve ilerlemeye de devam etmektedir. Özellikle organ bağışında donör bağışçı sayısının az olması ve diğer medikal sorunları da göz önüne alındığında yapay organ üretimleri bu aşamada oldukça önem arz etmektedir (Yan vd., 2018). 3B baskı teknolojisinde metal, polimer ve seramik malzemeler kullanılmaktadır. Metal malzemeler, ortopedik ve diş implantları gibi kalıcı ürünleri hazırlamak için tercih edilmektedir. Bu alanda kullanılan metal malzemeler paslanmaz çelikler, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarıdır. Katmanlı imalat ile üretilen implantlar, geleneksel yöntemlerle üretilmiş implantlar ile karşılaştırıldığında daha küçük taneli olduğu ve buna bağlı olarak da daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Doğal ve sentetik polimer malzemeler öncelikli olarak tıbbi modellerin hazırlanmasında kullanılmaktadır. En sık kullanılanlar polimer malzemeler PLA, ABS, PC, PA, PVA ve PCL'dir. Mükemmel uyumluluğa sahip olan bu polimerler aynı zamanda hücre yapışmasını da desteklemektedirler. Ancak kolay deforme olmaları ve zayıf mekanik özelliğe sahip olma gibi dezavantajları da mevcuttur. Seramik malzemelerden HA (hidroksil apattit) ve TCP (tri kalsiyum fosfat), yüksek biyo uyumlulukları ve stabil fizikokimyasallıkları nedeniyle katmanlı imalatta yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte kolay şekillendirilebilir ve renklendirilebilir olmaları nedeni ile de 3B baskı teknolojilerinde tercih edilmektedirler (Yan vd., 2018). Biyomalzemelerde yaygın olarak kullanılan katmanlı imalat yöntemleri; Stereolithography (SLA), Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Binder Jetting (BJ), Polyjet (PJ), lazer destekli veya desteksiz 3B biyo yazıcılar olarak sıralanabilmektedir (Bhatia vd., 2021).

3.6. Yapı malzemeleri

3.6. Construction materials

Yapı sektörünün önemli malzemelerinden biri olan betonun katmanlı imalat yöntemlerine entegre edilmesi ile inşaat alanında da 3B baskı teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha hızlı prototip üretimi, daha az insan gücü ve malzeme sarfiyatı sağlanmaktadır (Bhatia vd., 2021). Beton karışımın içeriği, 3B baskının sürecince ve yapının performansında önemli bir rol oynamaktadır. Yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan katmanlı imalat teknolojisi tipik bir eriyik yığıma yöntemine benzemektedir. Kullanılan beton veya çimento üst üste inşa edilirken, alt katmanlar da üst katmanları taşımaktadır. Böylece istenen yapı meydana gelmektedir (Shakor vd., 2019). Beton malzemenin özelliklerini artırmak için yapısına kum, çimento, mikrofiber ve silika gibi birçok takviye edici eklenmektedir. Böylece katmanlı imalat teknolojisiyle kompleks yapılar daha kolay elde edilebilmektedir. Yapı malzemelerinde kullanılan katmanlı imalat yöntemleri Binder Jetting (BJ) ve Fused Deposition Modelling (FDM)'dir (Bos vd., 2016).

3.7. Akıllı Malzemeler

3.7. Intelligent materials

Akıllı malzemeler renk, şekil ve boyut gibi özelliklerini, belli bir süre boyunca dışarıdan aldıkları sıcaklık, ısı ve gerilime bağlı olarak değiştirebilen malzemeler olarak bilinmektedir. Bu tür malzemeler yeteneklerine göre şekil hafızalı, kendi kendini temizleyebilen, kendi kendine çalışabilen ürünler olarak da tanımlanabilmektedir (Falahati vd., 2020). Akıllı malzemeler 3B baskı teknolojisinde basılarak genellikle biyomedikal uygulamalarında, titreşim kontrollerinde, robotik çalışmalarında, kardiyovasküler stentlerde ve kontrollü ilaç taşıyıcı sistemlerinde kullanılmaktadırlar (Falahati vd., 2020). Akıllı malzemelerin katmanlı imalat teknolojileri ile üretimi yapılırken polimerler, nikel-titanyum alaşımları ve kompozit gibi farklı malzemeler tercih edilebilmektedir (Meier vd., 2011). Günümüzde, akıllı malzemeleri 3B baskı teknolojisi ile üretebilmek için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler Digital Light Processing (DLP), Selective Laser Melting (SLM), Digital Projection Printing (DPP), Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modelling (FDM), Inkjet Printing, Stereolithography (SLA) ve Electron Beam Melting (EBM) olarak sıralanabilir (Gardan, 2019).

4. Katmanlı imalat teknolojilerinin uygulama alanları

4. Application areas of additive manufacturing technologies

Katmanlı imalat teknolojisinde polimer, metal ve seramik malzemeler başta olmak üzere birçok malzeme grubu kullanılabilir. Bu malzemeler arasında en yaygın olarak polimer ve metal malzeme grupları başı çekmektedir. Katmanlı imalat yöntemlerinde kullanılan malzemelerin sayısının artmasıyla birlikte yöntemlerin endüstrideki kullanım alanları genişlemeye devam etmektedir. Bu teknoloji özellikle tıp, dişçilik, konstrüksiyon, uzay ve havacılık alanında kendisine önemli bir yer edinmiştir (Vafadar vd., 2021). 3B yazıcı fiyatlarının düşmesiyle birlikte, seri imalattan önce prototip oluşturmada, belli parçaların onarılmasında ve küçük çaplı üretimlerde neredeyse her sektörde evlerin, okulların ve atölyelerin çoğunda kendine yer edinmiştir.

4.1. Havacılık sektöründe katmanlı imalat uygulamaları

4.1. Additive manufacturing practices in the aviation industry

Havacılık uygulamaları için katmanlı imalat teknolojileri genellikle; doğrudan dijital baskı (DDB), hızlı kalıplama, hızlı prototip oluşturma ve onarım için kullanılmaktadır. DDB, uçakta kullanılacak mukavemeti yüksek parçaların üretimini ifade etmektedir. Bu tür parçalar; nozullar, yanma odaları gibi önemli olanlar ile kirişler, armatürler ve diğer aksesuarlar gibi daha az önemli olan parçalardır. Günümüzde katmanlı imalatın havacılık sektöründe birçok uygulaması bulunmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak Şekil 11'de TWI (The Welding Institute) şirketinin beş eksenli LMD (Lazer Metal Biriktirme) sistemi ile IN718 helikopter motoru yanma odası üretimi gösterilmektedir.



Şekil 11. TWI şirketine ait IN718 helikopter motoru yanma odası üreten LMD yazıcısı (Najmon vd., 2019)

Figure 11. LMD printer producing IN718 helicopter engine combustion chamber from TWI company (Najmon et al., 2019)

Başka bir firma anten tutucu aparatlarının ağırlığını azaltmak için katmanlı imalat uygulamalarından olan SLS yöntemini kullanmıştır. Üretilen anten tutucunun malzemesi olarak alüminyum alaşımı seçilmiş ve böylece ağırlık yüksek miktarda düşürülmüştür (Najmon vd., 2019). Boeing'in 787 Dreamliner uçağında maliyetleri oldukça azaltacak, titanyum parça basımında katmanlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Başka bir firma, DMLS yöntemini kullanarak 248 parçalı kompleks yapıyı tek seferde basmıştır (Najmon vd., 2019). Yine havacılık sektöründen bir firma ses altı ve ses üstü aralıkta uçakların şiddetli gerilimlerine dayanacak şekilde tasarlanmış kompakt, tek parçalı bir akış ölçüm cihazı üretmek için DMLS yöntemini kullanmıştır.

Titanyum alaşımından oluşan türbin kanatları ve yapısal uçak gövdesi bileşenlerinin üretimi için katmanlı imalat yöntemlerinden olan FDM yöntemi kullanılmaktadır. Uçakların mekanik ve yapısal bileşenleri genellikle metalden yapılırken, diğer bağlantılar ve iç aksesuarlar hem ağırlıktan hem de maliyetten tasarruf etmek için genellikle metal dışı malzemelerden yapılmaktadır. Boeing 777 uçağındaki polimer malzemeden yapılan koltuk işaretleri FDM yöntemi ile üretmiştir. Havacılık sektöründe önemi gittikçe artan insansız araç sistemlerinin mühendislik parçalarını üretmek için SLS teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca SLS yöntemi ile yapılan başka bir uygulama da İHA'nın kontrol panelinin muhafazasının üretiminde kullanılmasıdır (Najmon vd., 2019). Havacılık uygulamalarında katmanlı imalat yöntemlerinin kullanıldığı diğer bir alan kalıplamadır. Bu yöntemle yapılan kalıp ile Airbus A320 modelinin kapı menteşelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir (Liu vd., 2017). Bu uygulama Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. Airbus A320 kapı menteşesi (Najmon vd., 2019)

Figure 12. Airbus A320 door hinge (Najmon et al., 2019)

Havacılık sektöründe katmanlı imalatın diğer bir uygulaması da hızlı prototiplemedir. Genel olarak, SLA veya FDM gibi polimer bazlı eklemeli imalat uygulamaları, prototip testi için yeterli mukavemette ve üretilecek modelin tasarımına uygun test araçlarının üretilmesinde kullanılmaktadır. Böylece polimerin hızlı prototiplenmesi ile fiziksel özellikleri ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellerini doğrulamak için üretimi ve maliyeti fazla olan metallerin testlerde kullanılması azaltılarak hem maliyet hem de işçilik konusunda tasarruf sağlanmaktadır (Najmon vd., 2019). PolyJet yöntemi, İHA uygulamaları için hızlı bir şekilde prototip oluşturmak ve çeşitli kanat tasarımlarını test etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. NASA, katmanlı imalat yöntemlerini kullanarak yeni uçak modellerinin prototipleri yapmaktadır (Najmon vd., 2019). Şekil 13'te gösterildiği gibi Airbus, yapısının %90'ı plastik PA tozundan üretilen küçük boyutlu insansız hava aracının üretimini katmanlı imalat yöntemiyle 8 haftada tamamlamıştır. Katmanlı imalat yöntemleri ile pahalı parçaların, hurdaya ayrılıp değiştirilmesi yerine onarılması sağlanarak maliyet tasarrufu gerçekleştirilmektedir (Walachowicz vd., 2017). Bu yöntemler ile yapılan onarımların geleneksel yöntemlere göre daha estetik olduğu görülmüştür.



Şekil 13. Airbus'ın ürettiği dünyanın ilk katmanlı imalat uçağı (Najmon vd., 2019)

Figure 13. The world's first additive manufacturing aircraft produced by Airbus (Najmon et al., 2019)

4.2. Medikal sektörde katmanlı imalat uygulamaları

4.2. Additive manufacturing applications in the medical industry

Katmanlı imalat yöntemleri medikal sektörde; hastalık modelleme, tıbbi ekipman üretimi, dişçilik, deri mühendisliği ve teçhizat üretimi uygulamalarında da geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yöntem hassas dental uygulamalarında; diş köprüleri, implantlar ve kuronlar üretmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra çene implantları, kalça, diz ve omuz protezleri uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır (Özer vd., 2020). Günümüzde bire bir yapay organ üretilmesine de ameliyat öncesinde doktorlar çektikleri MR'lar yardımı ile ameliyat edilecek bölgenin 3 boyutlu topografik haritasını oluşturulmaktadır. Bu harita 3B yazıcılar yardımı ile somut objeler haline getirilerek baskısı alınmaktadır. Bozuk diş anatomisi için kullanılan diş hizalayıcılar, diş hekimliğinde 3B baskının en çok kullanıldığı alanlardır. Böylelikle dental alanında 3B baskı daha az maliyetle kontrollü bir tedavi imkanı sunmaktadır. Herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmadığı için üretim hızı daha yüksek olmaktadır. Katmanlı imalatın diş anatomisindeki uygulanabilirliğine bir örnek Şekil 14'te gösterilmiştir.

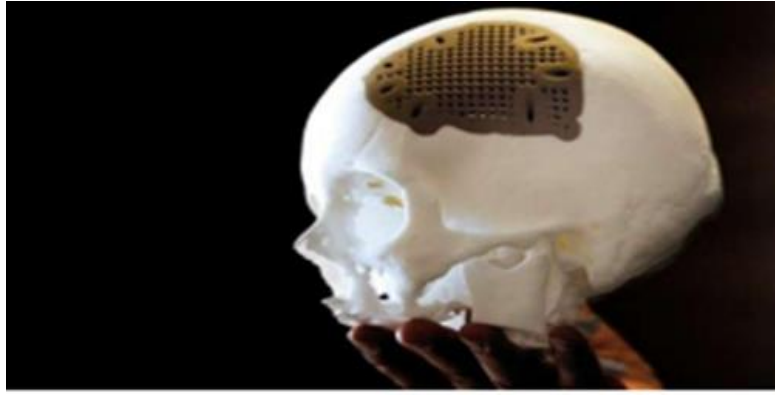


Şekil 14. Katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş diş-çene iskeleti (Özer vd., 2020)

Figure 14. Tooth-jaw skeleton produced by the additive manufacturing method (Özer et al., 2020)

Medikal implant sektöründe katmanlı üretimin 2025 yılına kadar 0,27 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. 3 boyutlu baskı ile oluşturulan ürünler; tasarım, üretim ve maliyet açısından geleneksel implant yöntemlerinden daha iyi performans göstermektedir. Silikon kalp kapakçıkları, karbon yapay retina, diş protezi, implantlar, özelleştirilmiş mikro gözenekli kemikler, PEEK köprücük kemiği implantı, kulak ve çene gibi pek çok alanda uygulanmaktadır. Medikal uygulamalarda biyo-uyumluluğu açısından en çok kullanılan malzeme titanyumdur (Çelebi vd., 2017). Şekil 15'te biyo-uyumlu parça örneği verilmiştir.

SLA yöntemi ortodonti uygulamalarıyla beraber kalp damar hastalıklarının tedavisinde, doku, beyin cerrahisi, omurga cerrahisi uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 16'da SLA yöntemi ile üretilmiş olan ortodonti uygulaması gösterilmiştir.

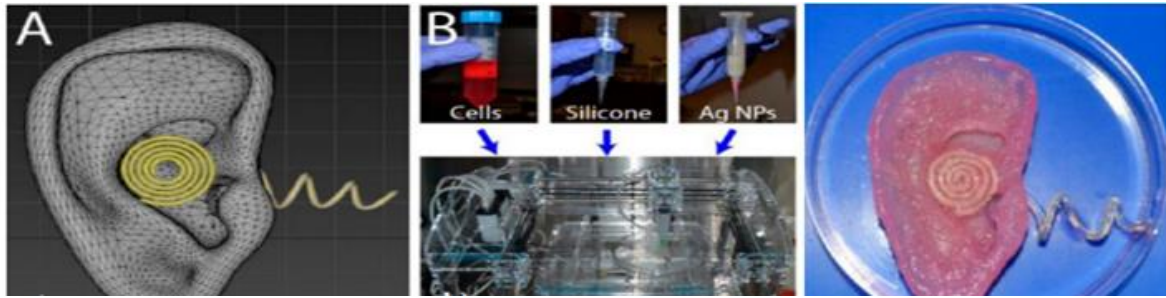


Şekil 15. Katmanlı imalat ile üretilen biyo-uyumlu parça (Çelebi vd., 2017)
Figure 15. Biocompatible part produced by additive manufacturing (Çelebi et al., 2017)



Şekil 16. SLA yöntemi ile üretilmiş cerrahi kılavuz örneği (Çelik vd., 2017)
Figure 16. Example of a surgical guide produced by the SLA method (Çelik et al., 2017)

DLP yöntemi gözenekli, oyuk yapıların basılmasında SLA yöntemi ile karşılaştırıldığında, çok daha karmaşık şekilli parçalarda kullanılabilir olduğu bilinmektedir. DLP projektör lensleri, küçük ve karmaşık parçaların daha detaylı ve yüksek kalitede basılabilmesi için değiştirilebilmektedir. SLM yöntemi, polimerlerin işlenmesi dışında; Ni, Al ve Ti gibi implant uygulamalarında biyo-uyumluluğu yüksek malzemelerin şekillendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Çelik vd., 2017). FDM yöntemi, daha çok polimer malzeme uygulamalarında kullanılan ve herhangi bir kalıba ihtiyaç duymayan katmanlı imalat yöntemlerindedir. Şekil 17’de Princeton ve Johns Hopkins Üniversiteleri tarafından katmanlı imalat yöntemi ile üretilen yapay kulak CAD modeline yer verilmiştir.



Şekil 17. Katmanlı imalat ile üretilen yapay kulak CAD modeli (Çelebi vd., 2017)
Figure 17. Artificial ear CAD model produced by additive manufacturing (Çelebi et al., 2017)

Katmanlı imalat yöntemi tanı test kiti, ventilatörler (solunuma yardımcı tıbbi cihaz), maske ve yüz siperlikleri başta olmak üzere geneli polimer malzeme içerikli tıbbi kişisel ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca tüm dünyada etkili olan ve etkisi günümüzde de devam eden COVID- 19 salgınından korunmak için katmanlı imalat yöntemleri ile üretilen maske ve kişisel ekipmanlar kullanılmaya devam etmektedir. Bu ekipmanlardan bazıları Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş yüz siperlikleri (Vafadar vd., 2021)
Figure 18. Face shields produced by the additive manufacturing method (Vafadar et al., 2021)

4.3. Yapı sektöründe katmanlı imalat uygulamaları

4.3. Additive manufacturing practices in the building industry

Yapı sektöründeki katmanlı imalat üretimleri, Dr. Behrokh Khoshnevis'in Nasa çalışmaları kapsamında, Güney Kaliforniya Üniversitesi'nde yaptığı araştırmalar sonucunda başlamıştır (Çalışkan vd., 2020). Günümüzde yapı alanında bu yöntemin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Örnek bir uygulamaya Şekil 19'da yer verilmiştir.



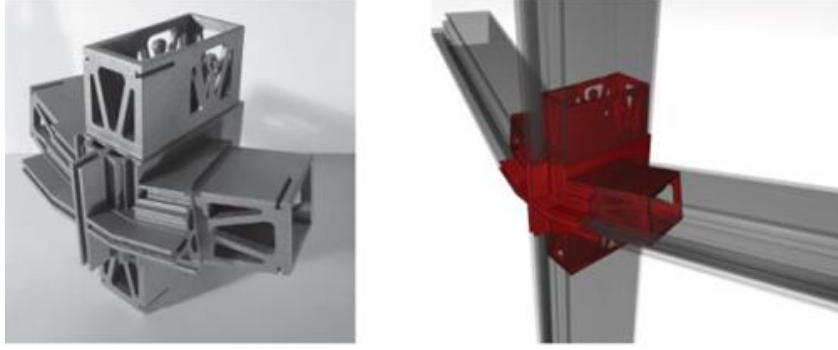
Şekil 19. Kontur üretimi sistemi, vinç uygulaması (Çelik vd., 2017)
Figure 19. Contour generation system, crane application (Çelik et al., 2017)

Yapı sektöründe katmanlı imalat yönteminin uygulanabilirliği için kullanılan malzeme ve oluşturulan kontur önem arz etmektedir. Günümüzde farklı konturda yapılar üretmek için birçok bilim insanı ve şirketler ar-ge süreci yürütmektedir. Yapılan yoğun çalışmalar sonucunda birçok farklı üç boyutlu yazdırılabilir malzemeler, kompozit karışımlar, farklı teknolojik makineler ve nozul modelleri geliştirilmiştir (Çalışkan vd., 2020). Örnek bir uygulaması Şekil 20'de gösterilmektedir.



Şekil 20. İtalya'da kerpiç malzeme kullanılarak katmanlı imalat ile üretilen köy evi (Çalışkan vd., 2020)
Figure 20. Village house produced with additive manufacturing using mud brick material in Italy (Çalışkan et al., 2020)

Yapı sistemlerinde özellikle metal parçaların üretiminde SLS ve DMLS yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile yapılan çalışmalar daha çok alüminyum ve polimer malzemeler üzerinden ilerlemektedir. Şekil 21’de DMLS yöntemi ile üretilmiş olan parçaya yer verilmiştir.



Şekil 21. DMLS yöntemi ile üretilmiş cephe bileşeni (Çelik vd., 2017)
Figure 21. Facade component produced by DMLS method (Çelik et al., 2017)

Yapı sektöründeki FDM teknolojisi daha çok dekoratif ve yapının korunması amacıyla polimer panellerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknoloji yapılan bazı çalışmalarda, karmaşık iç geometriye sahip panellerin ve profil çalışmalarının, ısı yalıtımı sağlaması, ısı köprüsü probleminde çözüm üretmesi amacıyla kullanılmıştır (Çalışkan vd., 2020). Örnek bir uygulama Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 22. FDM teknolojisi ile üretilmiş cephe bileşeni (Çalışkan vd., 2020)
Figure 22. Facade component designed with FDM technology (Çalışkan et al., 2020)

Yapı sektöründe kullanım alanı bulan diğer bir katmanlı imalat uygulaması da LENS ve EBM uygulamalarıdır. Bu yöntemlerle daha çok metal yapıların oluşturulması sağlanmaktadır. Ayrıca “Tel Ark Katmanlı İmalatı” olarak bilinen WAAM yönteminde metal tel eritilerek üretim gerçekleştirilmektedir (Çelik vd., 2017). Bu yöntem ile üretilen metal bir köprü Şekil 23’te gösterilmektedir.

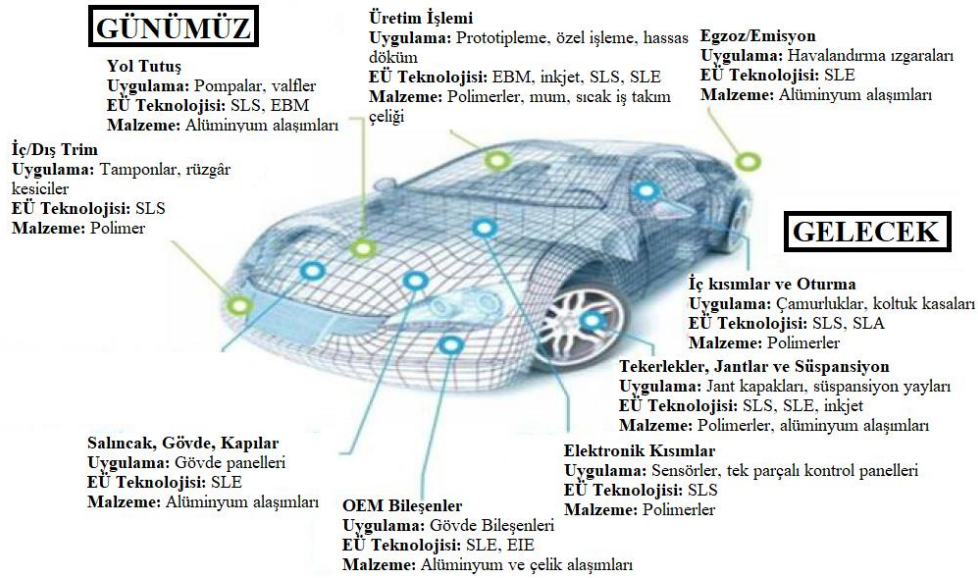


Şekil 23. WAAM katmanlı imalat sisteminde üretilen metal köprü (Çelik vd., 2017)
Figure 23. Metal bridge fabricated on the WAAM additive manufacturing system (Çelik et al., 2017)

4.4. Otomotiv sektöründe katmanlı imalat uygulamaları

4.4. Additive Manufacturing Applications in the Automotive Industry

Katmanlı imalat teknolojileri karmaşık ve hafif yapıları oluşturma üstünlükleri nedeni ile otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Bu teknoloji, otomotiv sektöründe özellikle yapısal kompozit bileşenler, motor vanaları ve turboşarj türbinlerinin üretilmesinde kullanılmaktadır (Özer vd., 2020). Şekil 24'te katmanlı imalatın otomotiv sektöründeki uygulama alanları gösterilmiştir. 2011 yılında Kor firması, Ecologic Urbee otomobil modelini tanıtmıştır. Bu otomobilin en ilgi çekici yanı gövdeyi oluşturan tüm parçaların katmanlı üretim teknolojilerinden EBM yöntemiyle imal edilmiş olmasıdır. Otomobilin fazla ağırlık oluşturan ve maliyeti arttıran karmaşık parçaları bu yöntem ile performansı yüksek ve maliyeti düşük bir Şekilde üretilmiştir.



Şekil 24. Otomotiv sanayisinde katmanlı üretim uygulamaları (Özer, 2020)

Figure 24. Additive manufacturing applications in the automotive industry (Özer, 2020)

5. Tartışma ve sonuçlar

5. Discussion and conclusions

Üretim hatlarının değiştiği ve bilginin dijital olarak aktarıldığı çağımızda endüstrinin dördüncü devrimi (Endüstri 4.0) ile katmanlı imalatın geniş çapta yayılacağı tahmin edilmektedir. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor, detaylı ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesini sağlayan, üretim hattına ve kalıba ihtiyaç duymayan, işlem süresini kısaltarak zamandan ve malzemeden tasarruf sağlayan katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı otomotiv, havacılık, eğitim, sağlık, gıda ve eğlence gibi birçok farklı alanda giderek yaygınlaşmaktadır.

Katmanlı imalat yöntemleri özellikle prototip doğrulaması, özel parça imalatı ve ara işlem gerektiren parçaların tek seferde basılmasında yaygın bir Şekilde kullanılmaktadır. Ancak, tezgahların maliyetleri ve küçük boyutları, hammadde olarak kullanılan metal tozlarının “gaz atomizasyonu” benzeri tekniklerle ve haliyle yüksek maliyette temini, bu yöntemlerin otomotiv, beyaz eşya gibi çok ağır rekabetin olduğu sektörlerde yaygın olarak kullanılmasına engel oluşturmaktadır. Havacılık malzemeleri nispeten pahalı olduğu için katmanlı imalat uygulamaları sıklıkla bu sektörde kendine yer bulmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ve imalat alanında geleneksel yöntemlerin beklentilere karşılık verememesi katmanlı imalat yöntemlerini akademik alanda ve şirketlerin ar-ge birimleri tarafından araştırılan popüler konulardan birisi haline getirmiştir. Bu yenilikçi ve devrimci imalat yöntemlerinin önündeki en büyük engellerden birisi malzemelerin oluşturduğu sınırlamadır. Sınırsız tasarımın ürüne dönüştürülebildiği bu yöntemlerde sadece belirli malzemelerle üretim gerçekleştirilmektedir. Kullanılan malzemelerdeki sınırlamalar ve yöntemlerin hala pahalı olması bu teknolojinin geniş kitlelerce ve seri üretimde kullanılmasını sınırlandırmaktadır.

Malzeme bilimindeki gelişmeler, teknolojik çalışmalaradaki ilerlemeler ve sektörlerdeki talepler göz önüne alındığında katmanlı imalat yöntemlerinin; medikalden, inşaat sektörüne; makineden, elektronik sektörüne ve

dolayısıyla uzay-havacılık, otomotiv, bilişim, gıda, onarım ve daha birçok alanda geleneksel imalatın yerini alacak yenilikçi ve devrimci bir yöntem olarak geleceğe emin adımlarla ilerlemektedir. Katmanlı imalat yöntemleri şimdiden geleneksel ve yüksek teknoloji sektörlerini etkilemekte ve endüstriyel dönüşümün bir parçası olduğunu göz önüne sermektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Birinci yazar araştırma konusunun seçiminde, araştırma kurgusunun oluşturulmasında, literatür araştırması ve makalenin son yazım aşamalarında, ikinci yazar katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler ve literatür araştırması aşamalarında, üçüncü yazar katmanlı imalat teknolojilerinin uygulama alanları aşamasında, dördüncü yazar katmanlı imalat teknolojilerinin sınıflandırılmasında ve makalenin son yazım aşamalarında katkı sunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Baca, D., & Ahmad, R. (2020). The impact on the mechanical properties of multi-material polymers fabricated with a single mixing nozzle and multi-nozzle systems via fused deposition modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9-10), 4509-4520. <http://doi.org/10.1007/s00170-020-04937-3>
- Badiru, A. B., Valencia, V. V., & Liu, D. (2017). *Additive manufacturing handbook: Product development for the defense industry* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119106>
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2021). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209-225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659-681. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- Brandl, E., Palm, F., Michailov, V., Viehweger, B., & Leyens, C. (2011). Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire. *Materials and Design*, 32(10), 4665-4675. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.062>
- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2017). *3D printing and additive manufacturing: Principles and applications of rapid prototyping* (5th ed.). World Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.1142/10200>
- Cuchet, C., Muster, A., Germano, P., & Perriard, Y. (2017). *Soft magnets implementation using a stereolithography-based 3D printer*. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (ss. 1-5). Sydney: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056301>
- Çalışkan, C. İ., & Arpacioğlu, Ü. (2020). Yapı üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 1117-1136. <https://doi.org/10.17482/uumfd.696952>

- Çelebi, A., Tosun, H., & Önçağ, A. Ç. (2017). Hasarlı bir kafatasının üç boyutlu yazıcı ile imalatı ve implant tasarımı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 27-35.
- Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107-121.
- Diksu, S. (2021). *Eklemeli imalat teknolojisi eriyik biriktirme modelleme yöntemi için kompozit ABS filament üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Duda, T., & Raghavan, L. V. (2016). 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>
- Dudek, P. (2013). FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(4), 1415-1418. <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0186>
- Dupláková, D., Hatala, M., Duplák, J., Radchenko, S., & Steranka, J. (2018). Direct metal laser sintering–Possibility of application in production process. *SAR Journal*, 1(4), 123-127. <https://doi.org/10.18421/SAR14>
- Falahati, M., Ahmadvand, P., Safaee, S., Chang, Y. C., Lyu, Z., Chen, R., & Lin, Y. (2020). Smart polymers and nanocomposites for 3D and 4D printing. *Materials Today*, 40, 215-245. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.06.001>
- Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917-1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Gardan, J. (2019). Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(1), 1-18. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1518016>
- Gökhan, Ö. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.626011>
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 215-243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
- Jin, J., Yang, J., Mao, H., & Chen, Y. (2018). A vibration-assisted method to reduce separation force for stereolithography. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 793-801. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.052>
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals*, 47(2), 525-540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)
- Krznar, M., & Dolinsek, S. (2010). *Selective laser sintering of composite materials technologies*. 2010 21st International DAAAM Symposium (ss. 1527-1529). DAAAM: Vienna.
- Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J. (2017). Laser additive manufacturing: Aerospace applications of laser additive manufacturing. In H. Cain (Ed.), *Aerospace applications of laser additive manufacturing* (s. 351-371). Woodhead. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>
- Mazzanti, V., Malagutti, L., & Mollica, F. (2019). FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. *Polymers*, 11(7), 1094. <https://doi.org/10.3390/polym11071094>
- Meier, H., Haberland, C., & Frenzel, J. (2011). *Innovative developments in design and manufacturing: Advanced research in virtual and rapid prototyping* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203859476>
- Melchels, F. P., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>
- Mower, T. M., & Long, M. J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science Engineering: A*, 651, 198-213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.068>
- Nabipour, M., Akhoundi, B., & Bagheri Saed, A. (2020). Manufacturing of polymer/metal composites by fused deposition modeling process with polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(21), 48717. <https://doi.org/10.1002/app.48717>

- Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Additive manufacturing for the aerospace industry. In C. Gifford, & A. Akeh (Eds.), *Review of Additive Manufacturing Technologies and Applications in the Aerospace Industry* (ss. 7-31). Matthew Deans. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>
- Negi, S., Nambolan, A. A., Kapil, S., Joshi, P. S., Karunakaran, K. P., & Bhargava, P. (2020). Review on electron beam based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), 485-498. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2019-0182>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Özkan, D.Ç. (2019.) Hızlı prototipleme teknolojisinin gelişimi, çeşitleri ve imalat sektöründe sağladığı avantajlar. *Mühendis ve Makine*, 3(1), 34-41.
- Özsolak, O. (2019). Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*. 3(1), 9-14.
- Patterson, A. E., Messimer, S. L., & Farrington, P. A. (2017). Overhanging features and the SLM/DMLS residual stresses problem: review and future research need. *Technologies*, 5(2), 15. <https://doi.org/10.3390/technologies5020015>
- Santoliquido, O., Colombo, P., & Ortona, A. (2019). Additive manufacturing of ceramic components by digital light processing: A comparison between the “bottom-up” and the “top-down” approaches. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(6), 2140-2148. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.044>
- Shah, M., Patel, D. R., & Pande, S. (2022). Additive manufacturing integrated casting- A review. *Materials Today: Proceedings*, 62(13), 7199-7203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.413>
- Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., & Malek, S. (2019). Review of emerging additive manufacturing technologies in 3D printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment*, 4, 85. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085>
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2020). 3D Printing of polymer composites: A short review. *Material Design & Processing Communications*, 2(2), 97. <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>
- Smith W. F. (1986). *Principles of materials science and engineering* (1st ed.). Elsevier. <https://stars.library.ucf.edu/scopus1980/168/>
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Swetham, T., Reddy, K. M. M., Huggi, A., & Kumar, M. N. (2017). A critical review on of 3D printing materials and details of materials used in FDM. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 3(2), 353-361.
- Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 343-353. <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>
- Udroiu, R., & Braga, I. C. (2017). *Polyjet technology applications for rapid tooling*. 2017 21st Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference (MATEC) (ss. 1-6). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711203011>
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, 11(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- Walachowicz, F., Bernsdorf, I., Papenfuss, U., Zeller, C., Graichen, A., Navrotsky, V., & Kiener, C. (2017). Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing. *Journal of Industrial Ecology*, 21(1), 203-215.
- Wohlers, T., & Caffrey, T. (2014). *Wohlers report 2014: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. <https://wohlersassociates.com/2014contents.htm>

- Wojtyła, S., Klama, P., & Baran, T. (2017). Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and Nylon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), 80-85. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1285489>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 1-10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, 4(5), 729-742. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- Zhang, X., Fan, W., & Liu, T. (2020). Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications*, 21, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>
- Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.