

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

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

YENİ NESİL ÜRETİM TEKNOLOJİSİ: FDM İLE EKLEMELİ İMALAT

NEW GENERATION PRODUCTION TECHNOLOGY: ADDITIVE MANUFACTURING VIA FDM

Yazarlar (Authors): Ümit Gencay Başçı^{ID*}, Rıdvan Yamaoğlu^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Başçı Ü.G., Yamaoğlu R., “Yeni Nesil Üretim Teknolojisi : FDM ile Eklemeli İmalat” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 5(2): 339-352, (2021).

DOI:10.46519/ij3dptdi.838281

Derleme Makale/ Review Article

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

YENİ NESİL ÜRETİM TEKNOLOJİSİ: FDM İLE EKLEMELİ İMALAT

Ümit Gencay Başçı^a , Rıdvan Yamanoglu^a 

^aKocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kocaeli, Türkiye

*Sorumlu Yazar: umitbasci72@gmail.com

(Geliş/Received: 09.12.2020; Düzeltme/Revised: 16.03.2021; Kabul/Accepted: 07.07.2021)

ÖZ

Eklemeli imalat geleneksel malzeme üretim tekniklerine göre sahip olduğu birçok avantaj nedeniyle son yıllarda hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır. Bu avantajlardan bazıları, kalıba gerek kalmadan üretime izin vermesi, gerektiği kadar hammadde kullanılması, kişiye özgü ürün üretimi ve stok maliyetlerinin azaltılmasıdır. ISO/ASTM 52900 standardına göre yedi farklı eklemeli imalat teknolojisi mevcuttur. Eklemeli imalat teknolojilerinde metal, polimer, seramik ve mum olmak üzere bu yedi teknolojiye uygun olarak geliştirilmiş malzemeler kullanılabilir. Polimer esaslı malzemeler söz konusu olduğunda malzeme ekstrüzyonu eklemeli imalat teknolojileri arasında en fazla kullanılır. Malzeme ekstrüzyonu ticari olarak Fused Depositin Modelling (FDM)/Eriyik Yığıma Modelleme (EYM) ve Fused Filament Fabrication (FFF) olarak adlandırılmaktadır. EYM teknolojisi başta hızlı prototipleme ve ürün geliştirme alanlarında olmak üzere, havacılık, otomotiv, beyaz eşya, tekstil, sağlık ve eğitim sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ve PLA (Polylactic Acid) gibi polimer malzemelerin yanında PEKK (Polyetherketoneketone), PEI (Polyetherimide) ve PPSU (Polyphenylsulfone) gibi polimerlerin de kullanımına izin vermesi nedeniyle EYM teknolojisi üstün özelliklerin tercih edildiği endüstriyel alanlarda da kullanılabilir. Bu çalışmada endüstride kullanımı hızla yaygınlaşmakta olan EYM teknolojisi ve uygulama alanları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat. Malzeme Ekstrüzyonu. FDM. FFF. EYM.

NEW GENERATION PRODUCTION TECHNOLOGY: ADDITIVE MANUFACTURING VIA FDM

ABSTRACT

Additive manufacturing has become widespread rapidly in recent years due to its many advantages over conventional material production technologies. Some of these advantages are production without the need for molds, use of the required amount of raw materials, customized production, and reduction of inventory costs. Seven different additive manufacturing technologies are available according to the ISO/ASTM 52900 standart. In additive manufacturing technologies, materials developed in accordance with these seven technologies, including metal, polymer, ceramic and wax can be used. In terms of polymer based materials, the most widely used techniwue among additive manufacturing technologies is material extrusion. Material extrusion is commercially called Fused Deposition Modelling (FDM) and Fused Filament Fabrication (FFF). FDM technology is widely used in rapid prototyping and product development, aviation, automotive, white goods, textile, healthcare and education industries. Thanks to the use of polymers such as PEKK (Polyetherketoneketone), PEI (Polyetherimide) and PPSU (Polyphenylsulfone) in addition to common polymers such as ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) and PLA (Polylactic Acid) FDM Technologies can also be preferred in applications where superior properties are required. In this study, detailed information was given about FDM technology and its application areas, which are rapidly becoming widespread in industry.

Keywords: Additive Manufacturing. Materials Extrusion. FDM. FFF.

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojileri, konvansiyonel talaşlı imalat teknolojilerinin tersine üç boyutlu bilgisayar destekli (3B BDT) veriden fiziksel parçanın tabaka tabaka ve ihtiyaç duyulduğu kadar malzemenin kullanılması ile imal edilmesidir[1]. Eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımı ile, fiziksel parçalar konvansiyonel yöntemlerdeki üretim sınırlamaları olmaksızın tek aşamada imal edilebilmektedir. Birden fazla alt parçadan oluşan ürünün montajlı bir şekilde imalat edilmesi eklemeli imalat teknolojileri ile mümkün olmaktadır. Bu sayede üretim ve işçilik süreleri azaltılarak üretim maliyetleri düşürülebilmektedir[2]. Parça tasarımı doğrudan imalat mümkün olduğundan stok için üretim yerine, talep geldiğinde imalatın yapılması mümkündür. Tam zamanında imalatın yapılabilmesi stok maliyetlerinin düşürülmesine neden olmaktadır[3]. Üretime yardımcı direkt ve endirekt kalıp ve fiyestürlerin imal edilebilmesi üretim hızlarını arttırmakta ve maliyetlerini düşürmektedir[4-6].

Eklemeli imalat teknolojileri ISO/ASTM' ye göre yedi ayrı katagoriye ayrılmaktadır[7]. Bu teknolojilerden birisi de Malzeme Ekstrüzyonu' dur. Malzeme ekstrüzyonu, 1988 yılında Crump tarafından patentlenmiş ve 1990 yılında FDM/EYM (Eriyik Yığıma Modelleme) adı altında ticarileştirilmiştir[8]. O yıllardan günümüze kadar EYM teknolojisi, ürün geliştirme, kavramsal, fonksiyonel prototipler ve az adetli parçaların imalatında kullanılmıştır. Sahip olduğu avantajlar nedeniyle, eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımları havacılık[9], otomotiv[10], tasarım, sağlık ve eğitim alanlarında hızla yaygınlaşmaktadır[11].

EYM teknolojisi, filament şeklindeki polimerik malzemenin sıcak bir nozül' den geçirilerek viskoz hale getirilmesi ve 3B BDT veri kesitine göre hareket ettirilmesi ile parçanın katmanlı olarak imal edilmesine dayanmaktadır[12]. EYM teknolojisinde parça katmanlı olarak imal edildiğinden parçanın geometrisine bağlı olarak farklı yüzey pürüzlükleri ve basamaklı görünüme sahip parça elde edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü uygulamaya göre hem estetik görünümü hem de parça mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. EYM teknolojisinde üretilen parçanın özelliklerini etkileyen, ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, tabaka kalınlığı, parça oryantasyonu, destek yapısı ve üretim hacminin sıcaklığı gibi proses parametreleri mevcuttur. Düzgün yüzeyli ve yüksek mukavemetli parçaların üretimi için bu parametrelerin kullanılan malzemeye göre optimize edilmesi gerekmektedir. EYM teknolojisinin diğer bir özelliği de parça özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesidir. Bu nedenle parçanın kullanım yerine göre parça üretim oryantasyonu dikkatli bir şekilde seçilmelidir[13].

EYM teknolojisinde ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ve PLA (Polylactic Acid) başta olmak üzere PEKK (Polyetherketoneketone), PEI (Polyetherimide), PPSU (Polyphenylsulfone) ve PC (Polycarbonate) gibi yüksek mukavemet ve ısı dayanımının gerekli olduğu malzemeler kullanılabilmektedir. Bu malzemelerin kullanımı ile endüstriyel alanda teknolojinin kullanımı hızla yaygınlaşmıştır[14]. Son yıllarda malzeme teknolojilerinin gelişmesi ile EYM teknolojilerinde kompozit filamentler de kullanılmaya başlamıştır. Farklı takviye malzemeleri ile üretilen kompozit malzemelerin EYM teknolojisi ile parça haline dönüştürülmesi ile, kompleks sensörler, mikro akışkan cihazlar, akıllı giysiler, 4D akıllı sistemler[8], rejeneratif tıp alanında kullanılmak üzere iskele (scaffold) yapıları ve kişiye göre dozajlaması ayarlanmış ilaçların imal edilmesi mümkün olmuştur[15]. 2016 senesinde üç boyutu EYM teknolojisi ile üretilmiş SPRITAM tabletleri US Food and Drug Administration (FDA) kullanılabilir onayını almıştır[8].

2005 yılında açık kaynak kodlu Rep Rap ve FAB@home projesinin ortaya çıkması ile masa üstü hobi amaçlı ucuz EYM cihazları üretilmiştir. 2008 yılında MakerBot firmasının kurulması ile PLA ve ABS filament kullanan, ev ve ofis ortamlarında parça imalatı yapabilen, EYM yazıcıların seri imalatına geçilmiştir. Ucuz EYM yazıcıların piyasaya sürülmesi teknolojinin yakından tanınmasına ve yaygınlaşmasına sebep olmuştur[16].

EYM teknolojisinin endüstriyel uygulamalar ve az adetli imalatın yanı sıra evlere kadar girmiş olması teknolojinin gelişimini tamamladığı anlamına gelmemektedir. Konvansiyonel yöntemlerin yerini alabilmesi için hem teknolojinin hem de kullanılan farklı malzemelerin geliştirilmesi, maliyetlerin düşmesi ve üretim hızlarının artırılması gerekmektedir. Yakın gelecekte bu problemlerin aşılması ve

teknolojinin otomasyona uygun olması nedeniyle geleceğin akıllı fabrikalarında üretim istasyonları olarak kullanılabilme olasılıklarını arttırmaktadır.

2. EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ

Eklemeli imalat, üç boyutlu datadan malzemenin tabaka tabaka eklenerek, fiziksel objenin imal edilmesine dayalı üretim teknolojilerine verilen gelen isimdir[17]. Eklemeli imalat teknolojileri International Organization for Standardization (ISO)/American Society for Testing and Materials (ASTM) 52900:2015' e göre yedi kategoride sınıflandırılmaktadır[7].

- Bağlayıcı Püskürtme
- Direk Enerji Biriktirme
- Malzeme Ekstrüzyonu
- Malzeme Püskürtme
- Toz Yatağında Ergitme
- Plaka Tabakalaştırma
- Havuz Fotopolimerizasyonu

Eklemeli imalat teknolojileri, kullanılan malzemelere göre de polimer, metal, seramik, mum imalat yöntemleri olarak da sınıflandırılmaktadır[18]. Eklemeli imalat teknolojilerinin konvansiyonel imalat teknolojilerine göre birçok avantajları mevcuttur. Bu avantajlarından bazıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir[7].

- Tasarımın doğrudan imal edilebilmesi
- İlave işleme ya da üretim maliyeti olmadan parçanın imal edilebilmesi
- Kompleks iç yapıya sahip olan tasarımın elde edilebilmesi
- Latis yapısına sahip ya da içi boş hafif parçaların imal edilebilmesi
- İlave işlem gerektirmeden net şekilli son ürünün doğrudan üretilebilmesi
- Malzeme kayıplarını minimuma indirerek minimum atıkla imalatın yapılabilmesi
- Ürün geliştirme süresini kısaltılarak, markete giriş hızının arttırılabilmesi
- Çok çeşitli parçaların daha küçük üretim alanlarında imal edilebilmesi
- Talep anında üretimin yapılabilmesine izin verilmesi
- Mükemmel ölçeklendirilebilirlik

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanı sıra, teknolojinin hala gelişmekte olması nedeniyle aşağıda belirtilmiş olan dezavantajları da mevcuttur;

- Yüksek hacimli imalatlara göre (örneğin plastik enjeksiyon kalıplama) maliyeti yüksektir,
- Teknolojiye uygun malzemeler ile imalat yapıldığından renk, malzeme ve yüzey işleme seçenekleri sınırlıdır,
- Diğer imalat yöntemlerine göre toleransları düşüktür. Üretim sonrası parça ek işleme gerektirebilir (Örneğin, talaşlı imalat, parlatma ve boya vb.)[18].

Eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan EYMM 1988 yılında Crump tarafından patentlenmiş ve sonrasında 1990'ların başında Sytratasys markası altında ticari olarak üretilmeye başlanmıştır[8]. 2005 senesinde açık kaynak kodlu RepRap ve FAB@Home projesinin ortaya çıkması ile masa üstü, hobi amaçlı ucuz FDM yazıcıların yaygınlaşması sağlanmıştır. 2008 senesinde Bre Pettis, Adam Mayer ve Zach Hoeken Simith MakerBot firmasını kurmuşlardır. Bu firma üretmiş olduğu masaüstü FDM yazıcılar PLA, ABS filament malzeme kullanımıyla ofis ve ev ortamlarında parça imalatı yapılabilmektedir. Tüm bu gelişmeler EYM teknolojisinin diğer teknolojilere göre daha yaygınlaşmasına ve kullanım alanlarının artmasına sebep olmuştur[16].

2.1. Eriyik Yığılma Modelleme (EYM)

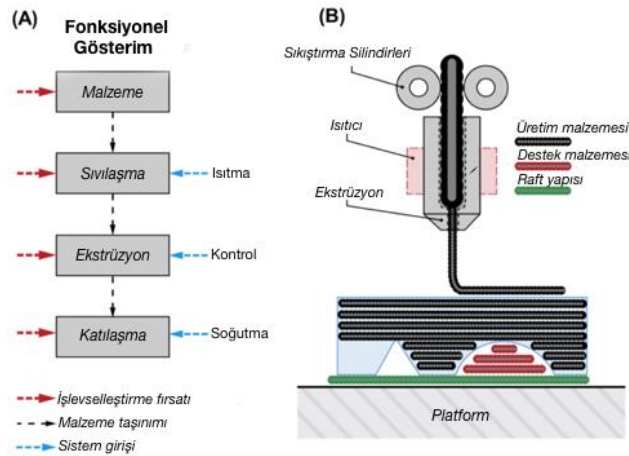
(EYM), ASTM' nin eklemeli imalat teknoloji sınıflandırma gruplarından biri olan Material Extrusion (MEX) sisteminin ilk ticari ismidir. Aynı yöntem, Fused Flament Fabrication (FFF) teknolojisi olarak

da adlandırılmaktadır[1, 19]. FDM ve FFF teknolojisinin Türkçe karşılığı Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) olarak verilmektedir.

EYM teknolojisinin tekno-ekonomik olarak birçok faydası mevcuttur. Bu faydalar arasında, diğer teknolojilere göre uygulama kolaylığı, uygulamaya göre düşük maliyetli oluşu, ölçeklendirilebilme özelliğinin oluşu, çoklu üretim kafalarının kullanımı ile fiziksel olarak büyük parçaların üretimine izin vermesi, kullanılan hammaddenin uygulamaya göre hazırlanabilmesi, ucuz malzemelerin yanında yüksek mühendislik malzemelerinin de üretimde kullanılabilirliğidir. EYM teknolojisi, malzeme mühendisliği, ileri imalat, medikal araştırmalar, fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesi gibi araştırma alanlarında kullanılmaktadır. EYM teknolojisinin avantajlarının yanında aşağıda belirtilmiş olan dezavantajları da mevcuttur[12, 19].

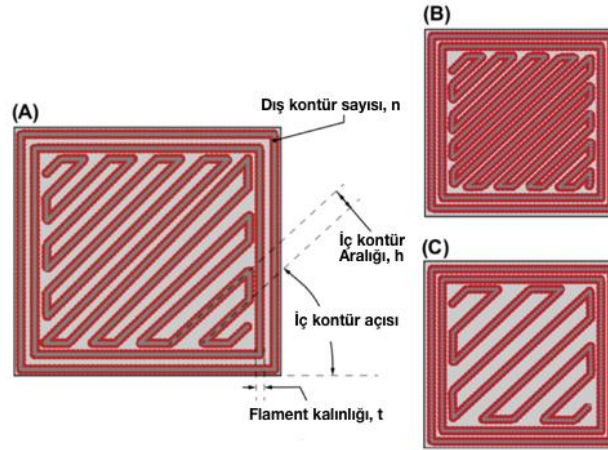
- Üretimdeki parça oryantasyonuna bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülüğü,
- Desteksiz bölgelerin üretim zorlukları ve parça içi boşlukların varlığı,
- Problemsiz parça üretimi için gerekli olan takım yolunun geliştirilme zorluğu,
- Parçanın içerdiği iç hataların tahribatsız olarak belirlenmesindeki zorluk,
- Lamine yapıdan kaynaklanan mukavemet problemleri[19],

EYM teknolojisi, filament şeklindeki polimerik malzemenin XYZ kartezyen koordinatlarına sahip bir hareketli sisteme bağlı bir ekstrüderden geçirilirken ergitilerek viskoz hale getirilmesi ve bu sayede eriyen plastik malzemenin bir program dahilinde üretilen fiziksel parçanın daha önceden dilimlenmiş kesiti üzerinde geometrik olarak gezdirilerek o anki tabakanın üretilmesi ve tabaka üretimi sonrası platformun seçilen tabaka kalınlığı kadar aşağı indirilerek bir sonraki tabakanın imal edilmesi ile devam eden bir imalat yöntemidir. İmalat, üretim platformu üzerindeki dilimlenmiş BDT verisinin tüm tabakalarının üretimini tamamlanması ile son bulur. Sistemin şematik olarak gösterimi Şekil 1' de verilmiştir[8, 12, 19].



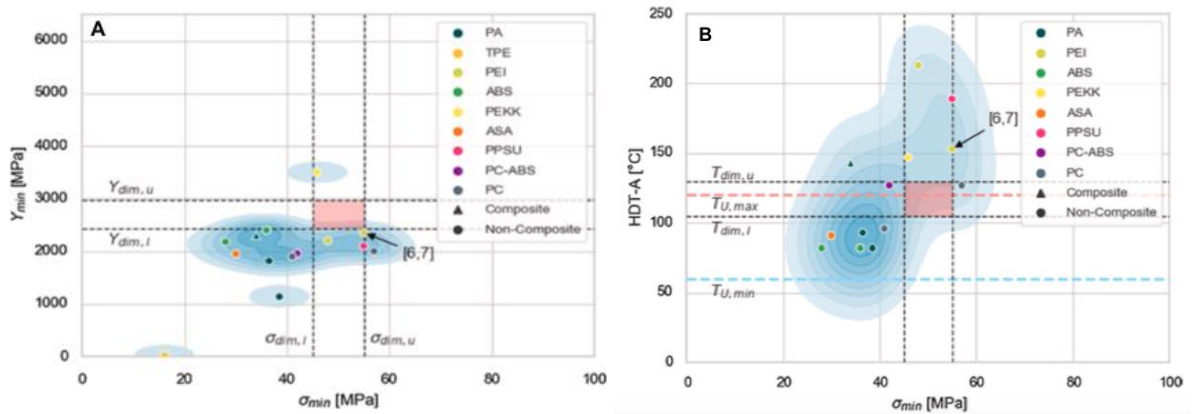
Şekil 1. EYM mimarisi A) Sistemin çalışma şekli B) Sistem uygulamasının şematik gösterimi[19].

Üretilen parçanın geometrisine bağlı olarak, tabaka kalınlığının seçimi, parçanın üretim platformu üzerine konumlandırılması, parçanın platform üzerindeki oryantasyonu, takım yollarının seçimi ve parçanın desteklenmesi gereken bölgelere destek verilmesi, problemsiz, yüksek mukavemetli ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip parçanın üretimi için gerekli olan parametrelerdir. Üretim esnasında ekstrüde edilecek malzemenin uygun ekstrüzyon sıcaklığının seçimi, ekstrüzyon hızı, kafanın hareket hızı, üretilen tabakanın kalitesi ile alakalı olduğundan uygun bir şekilde ayarlanması gerekmektedir[1, 8]. Şekil 2' de EYM sistemi için çıkarılmış olan tipik bir takım yolunun şematik gösterimi verilmiştir. Takım yolunun belirli stratejilere göre seçimi ile parçanın içerisi belirli oranlarda boşluklu olarak imal edilebilmektedir. Bu sayede fonksiyonel olmayan sadece gösterim amaçlı parçalar içi boşluklu olarak üretilerek malzeme tasarrufu sağlanabilmektedir[8].



Şekil 2. Takım yolu stratejisi A) Takım yolu değişkenleri B) Yoğun takım yolu C) Boşluklu takım yolu[19].

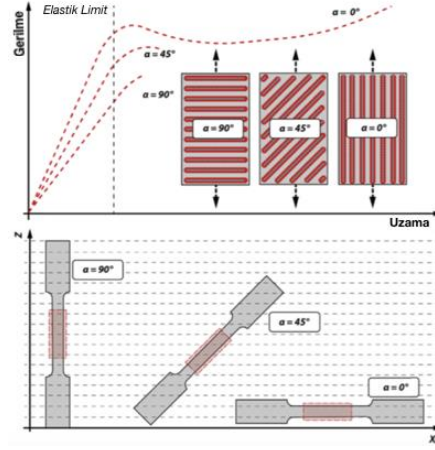
Üretim parametrelerinin malzemeye göre uygun bir şekilde seçilmemesi, parça tabakalarının düzgün üretilmemesi, tabakaların birbirlerine iyi bağlanmaması, yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması, yapı içerisinde boşlukların oluşması ve bu nedenlerden dolayı düşük mukavemete sahip olan parça imalatına neden olabilmektedir[19]. Piyasada ticari olarak satılan endüstriyel EYM makinelerinde malzemeye göre parametre seçimlerinin doğru olarak yapılmasını sağlayan özel programlar mevcuttur. Bu programların satıcı firmalar tarafından makine ile birlikte verilmesi, kullanıcının yapacağı, bilinçsiz parametre seçimleri nedeniyle ortaya çıkacak üretim problemlerini ortadan kaldırmaktadır[10]. Endüstriyel EYM sistemlerinin hobi amaçlı açık kaynak kodlu masaüstü yazıcılardan daha pahalı olmasının sebepleri; daha kontrollü bir makine alt yapısına sahip olmaları, üretimin daha kontrollü ve kapalı bir sistemde yapılması ve kontrol yazılımlarının daha gelişmiş olması nedeniyledir. Bu sebeplerden dolayı, endüstriyel EYM sistemleri, düşük maliyetli, hobi amaçlı EYM sistemlerinden daha düzgün yüzeyli, daha mukavemetli parçaların imalatına izin vermektedir. Ayrıca ucuz sistemler, ABS, PLA gibi sadece genel amaçlı birkaç polimer malzemenin kullanımına izin verirken, endüstriyel sistemler, daha yüksek sıcaklık, kimyasal dayanım, alev geciktirici, özelliklere sahip ileri mühendislik malzemelerinin (ABS, PC, PEI, PEKK, PPSU vb.) kullanımına olanak sağlamaktadır[1, 10, 14]. Şekil 3’ de endüstriyel EYM sistemlerinde kullanılmakta olan malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir[10].



Şekil 3. EYM malzeme özellikleri A) Çekme ve akma mukavemeti B) Çekme mukavemeti ve ısı dayanımı[10].

Şekil 3a’ da EYM teknolojisinde kullanılan malzemelerin akma mukavemeti ile çekme mukavemetinin değişimi ve Şekil 3b’de çekme mukavemeti ile mukavemetlerini koruyabildikleri maksimum kullanım sıcaklıkları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ABS malzemenin çekme mukavemeti yaklaşık 30MPa ve kullanım sıcaklığı 60⁰ C iken PEI malzemenin çekme mukavemeti 50MPa ve kullanım sıcaklığı 215⁰ C’dir [10].

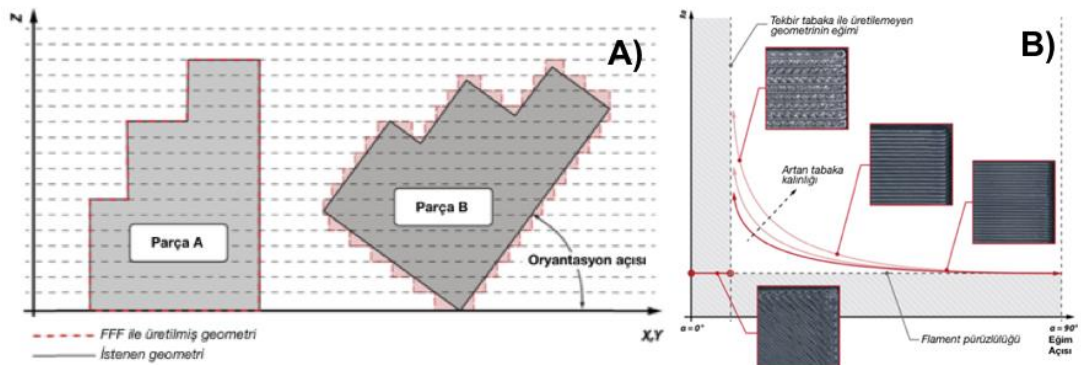
EYM sistemlerinin tabakalı imalat doğasından kaynaklı diğer bir özelliği de, üretilen parçanın anizotropiye sahip olmasıdır[10]. Anizotropi; parçanın mekanik özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesi anlamına gelmektedir. Anizotropi nedeniyle üretim platformu üzerinde parça konumlandırılmasının seçimi parçanın uygulamada maruz kalacağı mekanik özellik yönüne göre seçilmelidir[12, 13]. Şekil 4’ de farklı oryantasyonlarda üretilmiş olan parçaların mekanik özelliklerinin değişimi grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4. Parça oryantasyonunun parça mukavemetine etkisi[19].

Parçanın üretim tabaka yönünün parçanın maruz kalacağı çekme yönüne paralel olması, bu yönde daha fazla çekme dayanımı ve süneklığe sahip olması anlamına gelmektedir. Bunun tersi olarak üretim tabakalarının çekme yönüne dik olması parçanın bu yönde en düşük mekanik özellikleri göstermesine neden olacaktır. Bunun sebebi uygulanan yükün tabakalar arasındaki bağlanma mukavemeti tarafından taşınmasıdır. Tabakalar arası herhangi bir boşluk ve zayıf bağlanma çentik etkisi gibi davranarak gerilim yoğunluğunun artması ve çatlak ilerlemesi sonucunda parçanın düşük yüklerde deforme olmasına neden olacaktır. Tabakaların çekme yönüne 45° olarak üretilen parçalarda ise, paralel ve dik olduğu durumda elde edilen mukavemetler arasında bir çekme mukavemeti elde edilecektir[13, 19].

EYM teknolojisinde parça oryantasyonunun tabakalı imalat nedeniyle yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi çok fazladır. Yüzey pürüzlülüğü parçanın estetik özellikleri üzerinde etkili olduğu gibi mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Parçanın geometrisine göre üretim öncesi platform üzerinde konumlandırılması görsel olarak tabakalı imalat nedeniyle ortaya çıkacak basamaklanma etkisini minimum seviyede olacak şekilde seçilmelidir. Şekil 5a’ da parça konumlandırılmasının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi verilmiştir[19].



Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler A)Parça oryantasyonu B)Eğim açısı ve tabaka kalınlığı [19].

Şekil 5a’ da köşeli geometriye sahip olan parça, üretim tablasına paralel konumlandırıldığında kendi geometrisine uygun bir konumlandırma yapılmış olduğu için yüzeyinde en düşük basamaklanma

görülmektedir (Parça A). Bunun yerine üretim tablasına açılı bir şekilde konumlandırıldığında ise tabakalı üretim nedeniyle üretilen parça yüzeyinde daha fazla basamaklı bir görünüm elde edilmekte ve bu durum da parçanın yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır (Parça B). Tipik olarak lineer yüzey pürüzlülüğü R_a , parçanın platforma göre konumlandırma açısı α , tabaka kalınlığı L_t ve yüzey oryantasyonu ile alakalıdır. Üst tarafa gelecek yüzeyler üretim platformuna paralel konumlandırılırsa ($\alpha=0^\circ$) parça yüzeyindeki basamak görüntüsü minimum olacaktır. Şekil 5b' de yüzey pürüzlülüğünün parça konumlandırma açısı ile değişimi verilmiştir. Şekil 5b' de parçanın üretim platformu ile olan açısı $\alpha=0^\circ$ ve 90° olması durumunda üst yüzeyde minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmektedir. α değerinin sıfır ve 90° den farklı olması ve tabaka kalınlığının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı parça, kullanım yerine ve beklenen görsel özelliklere göre minimum yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesini sağlayacak şekilde üretim platformunda konumlandırılmalıdır[13, 19].

Parça dış yüzey pürüzlülükleri belirli geometrilere kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu durumda parçanın uygulama yerine göre belirli görsel özellikleri sağlaması için bir takım yüzey işlemleri uygulanabilmektedir. Yüzeyler beklentiye göre, zımpara, parlatma, macunlama, astar boya, son boya ve vernikleme işlemlerine tabi tutulabilmektedir. Mekanik yüzey işlemlerinin yanı sıra, aseton banyosuna daldırma, kimyasal buhar ile yüzeyi çözümler polimerik parçaların yüzey pürüzlülükleri azaltılabilmektedir. Bu sayede tasarımın görsel prototipi elde edilmekte ve dış ortamlara karşı polimer malzemenin de korunması sağlanarak üretilen parçanın kullanım ömrü artırılabilir [20, 21].

2.2. EYM Teknolojisinin Kullanım Alanları

Eklemeli imalat teknolojilerinin kompleks tasarımların üretimine izin vermesi ve bu sayede hafif, aynı anda birkaç özelliğe ve yüksek spesifik mukavemete sahip parçaların imal edilebilmesi, özellikle yakıt tüketimi ve emisyon özelliklerinin azaltılmasının önemli olduğu havacılık sanayiinde kullanımlarını yaygınlaştırmaktadır. Havacılık sektöründe yüksek mukavemetli ve performanslı yapısal parçalara daha çok ihtiyaç duyulduğundan öncelikli olarak bu alanda metal eklemeli imalat teknolojileri yaygınlaşmıştır. Bu teknolojilerin yanı sıra, ürün geliştirme ve test amaçlı parçaların imalatında polimer eklemeli imalat teknolojileri de kullanılmaktadır. Günümüzde PEKK, PPSU ve PEI gibi alev geciktirici, yüksek sıcaklık, kimyasal dayanım ve alüminyuma yakın mukavemet özellikleri gösteren malzemelerin EYM teknolojisi ile üretilebilmeleri nedeniyle, uçakların havalandırma kanalları, elektrik bağlantı parçaları ve kabin içi plastik parçaları EYM teknolojisi ile üretilebilmektedir. Hatta bu parçalar için uçuş sertifikası alınmış olup seri imatları da EYM teknolojisi ile yapılmaktadır[8]. Polimer esaslı malzemeden uçak parçalarının üretimine dair ilk uygulama; 2015 sonlarında Airbus'ın yeni A350XWB model uçağında kullanılmak üzere bazı polimerik parçaların Belçika'da kurulmuş olan Materialize firması tarafından eklemeli imalat ile üretilmesidir. 2015 ortalarında, Airbus firması ilk kez, A350XWB model uçakta Stratasys EYMM sistemi ile 1000 adet uçan parçanın üretiminin yapıldığını duyurmuştur. 2016 senesinde, şirket A350XWB model uçak parçaları için ULTEM 9085 malzemenin uçan parçaların imalatı için standart hale getirildiğini açıklamıştır. 2017 başlarında, Etihad Airways Engineering, Avrupa Havacılık Güvenlik Kurumundan (EASA) hava taşıtlarının iç kısımlarında üç boyutlu yazıcı ile üretilen parçaların tasarımı ve kullanımı için onay almıştır ve EASA sertifikasyonu altında Etihad Havayolları uçaklarının tamirinde ve yeni uçakların imalatında üç boyutlu yazıcılar ile üretilen parçaları kullanmaya başlamıştır[9].

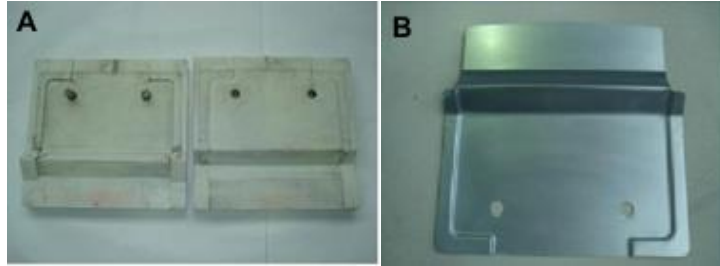
Havacılık endüstrisinde yüksek mukavemetleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle karbon ve aramid takviyeli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan alüminyum kalıplar yerine EYM teknolojisi ile ULTEM 1010 malzemeden üretilmiş otoklav sıcaklığına dayanabilen şekillendirme kalıpları kullanılabilir. Bu sayede kalıp imalat süreleri bir hayli kısaltılabilmekte ve imalat maliyetleri düşürülebilmektedir. Kompozit malzemeden içi boş parçaların imalatında da yine EYM teknolojisinden yararlanılmaktadır. EYM ST-130TM çözülebilir malzemeden master modelin üretimi sonrasında parça üzerine fiber takviyeli kompozit malzemenin sarılması ve sonrasında çözücü malzeme ile destek malzemesinin uzaklaştırılarak içi boş kompozit malzemelerin üretimleri mümkün olmaktadır[9]. Bu yöntem güzel bir örnek Formula 1 SAE motorunun EYM teknolojisi ile üretimi sonrasında sıcaklık dayanımının artırılması için üzerine karbon fiber kompozit uygulaması ile kompleks parçanın içi boş olarak ısıya ve basınca dayanıklı kompozit

malzemeden üretilmesidir. Bu parça üretim sonrası motor üzerinde test edilmiş ve kullanıma uygun olduğu görülmüştür(Şekil 6)[8].



Şekil 6. Kompozit parça imalatı için EYM yazıcı ile üretilen Formula SAE motor hava giriş parçası[8].

Endüstriyel pazarda ürün maliyetlerinin artması, ürün geliştirme sürelerinin kısalması daha kaliteli farklı ürünlere olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu ihtiyaçların karşılanması, daha hızlı, daha ucuz ve daha kaliteli olan malların üretimi ile sağlanabilmektedir. Bu anlamda rekabetin sağlanması konvansiyonel yöntemler yerine ürün geliştirme süresinin kısalması ve yeni ürün çeşitliliğinin artmasına katkıda bulunan eklemeli imalat sistemlerinin ürün geliştirme süreçleri ve üretimde kullanılması ile mümkün olmaktadır[8]. Bu durumda EYM sistemleri ile hızlı kalıp ve yardımcı ekipmanların üretimi öne çıkmaktadır. Şekil 7’ de FDM teknolojisi ile, Polycarbonate (PC) malzeme kullanılarak sac şekillendirme kalıbı üretilmiş ve sonrasında çelik sacdan basılmış otomobil bagaj kapağı kilit bağlantı braketinin üretilmiş hali gösterilmektedir. PC malzemeden EYM teknolojisi ile üretilmiş kalıp ile 35 adet parça basılabilmektedir. Bu sayede çelik malzemeden üretilen sac şekillendirme kalıbı için üretim zamanından kazanç sağlanarak ürün geliştirme süresi kısaltılmıştır[5].



Şekil 7. EYM yönteminin sac şekillendirme kalıplarında kullanımı A) PC malzemeden üretilmiş alt ve üst kalıp parçası B) Çelik sacdan basılmış kilit bağlantı braketinin üretilmiş hali[5].

EYM teknolojisinin diğer bir uygulama örneği, silikon kalıplama için master model imalatında EYM den üretilmiş parçaların kullanılmasıdır. Silikon kalıplama, enjeksiyon kalıplamanın hızlı bir versiyonudur. Enjeksiyon kalıplamadan çok daha hızlı sürelerde ve düşük maliyetler ile parçanın silikon kalıbı hazırlanarak içerisine uygulamaya göre farklı özelliklerde dökülebilen çift komponentli poliüretan malzemenin kullanımı ile az adetli plastik parça imalatı yapılabilmektedir[8, 22]. Silikon kalıplamanın diğer bir uygulaması da silikon kalıp içerisine döküm mumu dökülmesi ve bu sayede elde edilen mum modelin hassas döküm yöntemi ile istenilen metal alaşımından üretilmesidir[23]. EYM teknolojisinin üretime yardımcı takım ve fikstürlerde kullanılması fikstürlerin hafifletilmesi ile üretimde çalışan işçinin yorulması ile ortaya çıkan iş gücü kaybının azaltılmasına ve bu sayede üretim maliyetlerinin düşürülmesine neden olmaktadır[8]. Hassas döküm sektöründe, mum modellerin hazırlanmasında kullanılan metal kalıplar CNC yöntemi ile uzun süreler ve yüksek maliyetler ile üretilmektedir. Az adetli döküm parçalarda mum yerine ABS malzeme kullanılarak hassas dökümde kullanılacak master modeller imal edilebilmekte ve otoklavlarda yakılarak uzaklaştırılabilmektedir. Bu sayede metal kalıp maliyetine katlanmak yerine 3B BDT verisinden master model imalatı yapılarak hassas döküm ile metal parçalar imal edilebilmektedir[4].

1990’ lı yıllarda EYM teknolojisinin endüstrileşmesinden bu yana otomotiv sektöründe kullanılan plastik parçaların tasarım ve testlerinde bu teknoloji hızlı prototipleme amaçlı kullanılmaktadır. Özellikle otomobilin plastik enjeksiyon ile üretilen parçaları, tasarım sonrası EYM sistemi ile

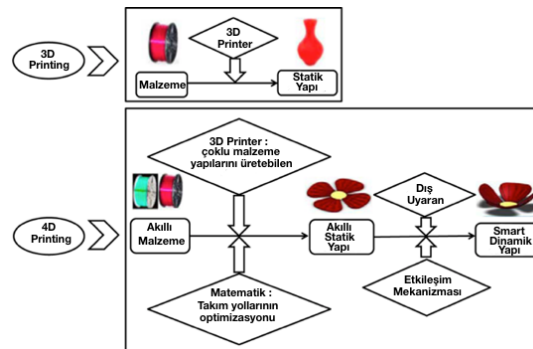
üretilmekte, ergonomi ve estetik açıdan test edilip tasarım onayı aldıktan sonra plastik enjeksiyon kalıplarının üretimine başlanmaktadır. Bu sayede tasarım hataları engellenmekte, ürün geliştirme süreleri kısalmakta ve rekabet gücü arttırılmaktadır[24]. Otomotiv sektöründe hizmet veren plastik parça üreticileri EYM yazıcıların yakın gelecekte plastik parçaların seri imalatın da kullanılabilmesini beklemektedirler. Ancak, günümüzdeki EYM sistemleri ile üretilen plastik parçalar, otomotiv endüstrisinde kullanılan plastiklerin seçim kriterlerini belirleyen VDA 232-201 standardının gerektirdiği, sıcaklık dayanımı ve mekanik özellikleri sağlayamadığından ayrıca üretilen parçaların mekanik özellikler açısından anizotropiye sahip olması nedeniyle seri imalat uygulamalarında kullanılamamaktadır. Bunun yerine prototip ve ürün geliştirme uygulamaları için parça imalatında kullanılabilir[10].

Son yıllarda EYM malzemelerde partikül ve fiber takviyeli kompozit malzemelerin kullanılmaya başlaması ile EYM teknolojisinin farklı alanlarda da kullanımları mümkün olmaktadır. Kompozit malzemelerin geliştirilmesi ile özellikle, sensör ve filtreleme, rejeneratif tıp alanında iskele üretimi, yeni tip ilaç dozajlamasının kontrol edilebildiği ilaç tabletlerinin üretimi gibi alanlarda EYM teknolojisi kullanılmaktadır. Polimerik malzemelerin içerisine grafen, karbon fiber, karbon nano tüp, karbon karası gibi iletken malzemeler karıştırılarak kompozit malzeme haline getirilmesi, üretilen parçaların düşük akımlar altında kullanılmasını sağlamaktadır. Bu sayede üretilen parçaların farklı ortam değişikliklerinde değişik özellikler göstermesi yoluyla ortamdaki değişkenlerin ölçülebildiği sensörler geliştirilmiştir. Bu sensörlerin kullanılmasıyla, ortamdaki kimyasal uçucu miktarı (örneğin aseton), çok eksenli yük değişimlerinin ölçümü, 70⁰ C ye kadar su ve ortam sıcaklığının ölçümleri mümkün olmaktadır[8]. Rejeneratif tıp alanında dokunun belirli bir mukavemete sahip olması, hücreler ile uyumu ve belirli bir poroziteye sahip iskele yapısı, EYM yazıcılar ile üretilebilecek biyomalzemelerin, biyoaktifcam, kalsiyumfosfat, trikalsiyomfosfat, hidroksiapatit veTiO₂ gibi biyolojik olarak bozunabilir ve kemik yapısına yakın özelliklerdeki malzemeler ile takviye edilmesi ile elde edilmektedir. Bu malzemelerin EYM teknolojisi ile iskele olarak üretilmesi sonrasında hücre ekilmesi ile yapay dokular imal edilebilmektedir[8, 15].

Yeni nesil tedavi yöntemlerinde tedavi amaçlı vücuda verilen ilacın gerektiği kadar verilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla EYM teknolojisi ile vücutta bozulabilen biyomalzemelere eklenen ilaç karışımları ile hazırlanan tabletler ile kişiye ve hastalığa özel dozajlanması kontrol edilebilir tabletler üretilebilmektedir[25]. Prasad ve Smyth in 2016 senesinde üç boyutu EYM teknolojisi ile üretmiş oldukları SPRITAM tabletleri US Food and Drug Administration (FDA) kullanılabilir onayı almıştır.

EYM teknolojisinin diğer bir uygulama alanı kompleks mikro-akışkan kontrol cihazlarının üretimidir. PLA/CNT (Carbon nanotube) kompozit malzemeden üretilen mikro-akışkan cihazlar yağ ve suyun akışının kontrolünde kullanılmaktadır. Mikro akışkan kontrol cihazlarında EYM teknolojisinin diğer bir uygulama örneği; Chudobova ve arkadaşlarının 2015 senesinde, Kataoka ve arkadaşlarının 2014 senesinde, EYM teknolojisi ile ürettikleri mikro akışkan chip'i methicillin dirençli Staphylococcus Aureus (Bakteri) ve influenza hemagglutinin (Virüs)' ün belirlenmesinde kullanılmalarıdır.

Son yıllarda akıllı malzemelerin eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılması ile dışarıdan verilen bir uyaran ile şekil değiştiren ya da farklı değişiklikler gösteren 4D parçalar üretilebilmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. 4D EYM teknolojisinin karakteristiği[8].

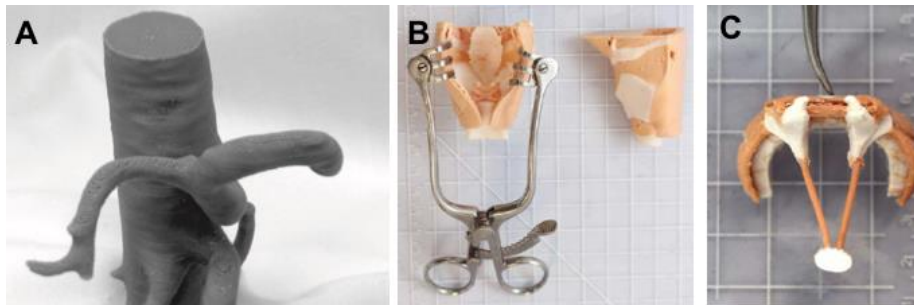
Bu alanda akıllı malzeme olarak geliştirilmiş EYM'e uygun termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. 4D EYM parçalar, soft robotik uygulamalar için aktüatörler, kontrollü ardışık katlama sistemleri ve kendi kendine gelişen yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Zhuo ve arkadaşlarının 2015 senesinde, Leist ve arkadaşlarının 2017 senesinde yaptıkları çalışmalarda EYM ile üretilmiş PLA ve naylon parçaların şekil hafıza etkisine sahip olduklarını göstermişlerdir. PLA filament kullanılarak EYM ile üretilmiş plastik kupa içerisine sıcak su döküldüğünde şekil hafıza etkisi gözlemlenmiştir. Bu uygulamaya diğer güzel bir örnek de, PLA dan üretilmiş 4D akıllı giysi uygulamalarıdır[8].

Eklemeli imalat teknolojilerinin, kişiye özel az adetli imalat, kompleks tasarımların imal edilebilirliği gibi faydalarının görülmesi tekstil ve moda sektöründe eklemeli imalat teknolojilerinin yaygınlaşmasına neden olmuştur. Bu sayede 3D tasarım programlarında tasarlanmış kompleks desenler ve düğümler EYM teknolojisi ile üretilerek giysi yada giysinin bir bölümü olarak üretilmektedir[8, 26]. 2014 senesinde Danit Peleg dünyadaki ilk EYM teknolojisi ile üretilmiş giysi koleksiyonunu oluşturmuştur. 2018 yılındaki "The Birth of Venus" isimli defilede konvansiyonel tekstil ve EYM teknolojisi ile üretilmiş parçaların birleştirilmesi yöntemiyle üretilmiş giysileri tanıtmıştır. 3D printer ile TPU esnek malzemeden üretilen desenler farklı amaçlar için konvansiyonel tekstiller içerisinde kullanılarak farklı özelliklere sahip giysiler üretilmektedir (Şekil 9)[27].



Şekil 9. EYM ile üretilmiş tekstil örnekleri A) The Birth of Venüs koleksiyonu için üretilmiş ceket B)Sweatshirt C)Yelek [27].

Günümüzde, sorgulama, düşünme ve uygulamaya dayalı modern eğitim tekniklerinin faydalarının anlaşılması ile bilgi ve anlatıma dayalı eğitim teknikleri yerlerini modern eğitim tekniklerine bırakmaktadır. Özellikle uygulamalı eğitimlerin geçerli olduğu mühendislik, mimarlık ve tıp alanında bir organ, damar ya da sistemin anlaşılabilmesi için 3B modellerinin eklemeli imalat teknolojileri ile üretimi ve üzerinden uygulamalı olarak anlatımı ve cerrahi uygulamaların planlanması mümkün olmaktadır[28]. Bu sayede eğitimin etkinliğinin artırılması ve cerrahi operasyonların başarılı geçme olasılığı bir hayli artmaktadır. Şekil 10'da bu amaçla üretilmiş anatomik modellerin EYM teknolojisi ile üretilmiş halleri görülmektedir.



Şekil 10. EYM teknolojisi ile üretilmiş anatomik modeller A) karın aort damarı[29] B) Kıkırdak ve kas dokusunu içeren gırtlak C) Ses telleri[11].

Şekil 10a' da karın aort damarı, Şekil 10b'de gırtlak bölgesindeki kıkırdak ve kas dokusu ve Şekil 10c' de ses tellerinin anatomik modelleri verilmiştir. Bu modeller hem eğitim hem de ameliyat planlaması için kullanılabilir[11, 29].

3. SONUÇLAR

Ekleme imalat teknolojilerinin sahip oldukları avantajlar nedeniyle kullanımları hızla artmaktadır. ISO/ASTM 52900'e göre yedi kategoriye ayrılan teknolojilerden biri malzeme ekstrüzyon teknolojisidir. EYM teknolojisi malzeme ekstrüzyon teknolojisinin ticari ismidir. Polimer eklemeli imalat teknolojileri arasında en yaygınlaşmış olan teknolojilerden birisi EYM teknolojisi. EYM teknolojisi polimerik bir filamentin sıcaklık altında ekstrüze edilmesi ile fiziksel modelin tabaka tabaka imal edilmesi esasına göre çalışmaktadır. EYM teknolojisi ile, mukavemetli ve görsel açıdan yüzey pürüzlülüğü düşük olan parçaların üretilmesi; parça oryantasyonu, uygun destek yapısının verilmesi, ekstrüzyon ve üretim platformu sıcaklığı, imalat hızı ve tabaka kalınlığının doğru seçimi ile mümkün olmaktadır. Tabakalı imalat nedeniyle parçanın basamaklı yüzey görünümü ve yüzey pürüzlülüğü parça oryantasyonu ile doğrudan alakalıdır. Parçanın yüzey pürüzlülüğü düşük ve görsel açıdan düzgün görünüm eldesi için parça geometrisine bağlı olarak, platform üzerinde parçanın doğru bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Bazı geometrilere tabakalı imalat nedeniyle parça yüzeyinde basamakların görülmesi kaçınılmazdır. Görsel kaygıların önemli olduğu uygulamalarda üretim sonrası parçaların yüzeylerinin mekanik olarak zımparalanması, macun ile doldurulması, parlatılması, boya, vernik ve farklı metalik kaplamalar ile kaplanması mümkündür. Mekanik parlatmanın yanı sıra, aseton banyosu ve kimyasal olarak çözücü bir buharla parçanın yüzey pürüzlülüğü azaltılabilmektedir. EYM teknolojisinden diğer bir dezavantajı; tabakalı imalat nedeniyle mekanik açıdan anizotropinin görülmesidir. Bu nedenle mekanik mukavemetin beklendiği fonksiyonel parçalarda mekanik mukavemetin beklendiği yöne göre parça üretim oryantasyonu belirlenmelidir.

EYM teknolojisi, 1990 senesinde ticarileşmesinden günümüze kadar birçok sektörde ürün geliştirme amaçlı kullanılmaktadır. Bu sektörler; otomotiv, havacılık, mimari, mühendislik, tıp ve eğitimidir. Ürün geliştirme dışında üretime yardımcı direkt, endirekt kalıp ve fikstürlerin imalatında da kullanılabilmektedir. EYM yöntemiyle, hassas döküm ve silikon kalıplama için master modellerin imalatı mümkün olmaktadır. Bu sayede master model için kalıp imalatı gerekli olmadığı için hem maliyet hem de zaman tasarrufu sağlanabilmektedir. Üretimi hızlandıran yardımcı ekipman ve fikstürlerin metal malzemeler yerine EYM teknolojisi ile dayanıklı plastik malzemelerden üretilmesi ağırlık avantajı sağladığı için üretimde çalışan iş görenlerin daha az yorulması ile üretim verimliliğinin artırılmasını sağlamaktadır. Çelik malzemeden üretilen sac şekillendirme kalıp insertlerinin metal malzeme yerine EYM teknolojisi ile üretilmesi maliyet, zaman ve ürün geliştirme sürelerinin kısaltılmasını sağlamaktadır.

Otomotiv endüstrisinde EYM teknolojisinden ürün geliştirme sürelerini kısaltılması, markaların rekabet güçlerini arttırmaktadır. EYM teknoloji ile üretilen polimerik malzemeler, otomotivde kullanılan plastik malzemelerin seçim kriterlerini belirleyen VDA-232-201 standardını sağlayamadığından seri imalat da kullanılamamaktadır.

EYM teknolojilerinde PEKK, PEI ve PPSU gibi yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemete sahip olan malzemelerin kullanılabilmesi havacılık sektöründe uygulama alanlarını arttırmıştır. 2015 senesinde Airbus'ın EYM teknolojisi ile üretilen parçalara uçuş sertifikasını alması, üretilen parçaların uçakların seri ve yedek parça imalatlarında kullanılmasını sağlamıştır. Havacılık sektöründe yüksek spesifik mukavemetleri nedeniyle aramid ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler yapısal parçaların imalatında kullanılmaktadır. Bu parçaların şekillendirilmesinde CNC ile üretilmiş metal şekillendirme kalıpları kullanılmaktadır. Bu kalıpların yüksek sıcaklığa dayanıklı ULTEM 9085 malzeme kullanılarak EYM yöntemi ile üretilmesi mümkündür. Bu sayede kalıp imalat süresi azaltılarak maliyet kazancı sağlanmıştır.

EYM yöntemi ile çözülebilir ST-130TM malzemeden üretilen master modelin üzerine karbon fiber malzemelerin sarılmasıyla kompozit malzemenin şekillendirilmesi sonrasında ST-130TM malzemenin çözülebilir bir kimyasal içerisinde uzaklaştırılarak içi boş kompleks kompozit parçaların imalatı mümkün olabilmektedir. Bu yöntemle yüksek sıcaklık ve mukavemetin gerekli olduğu yerler için kompozit malzemeler çok hızlı bir şekilde ve düşük maliyetler ile üretilmektedir.

Son yıllarda partikül ve fiber takviyeli kompozit malzemelerin EYM sistemlerinde kullanılabilmesi, yüksek mukavemetli ve farklı özelliklere sahip parçaların üretimine izin vermektedir. Filament malzemeye eklenen grafen, karbon nanotüp ve karbon karası gibi iletken malzemeler FDM teknolojisi ile üretilen parçaların düşük voltaj uygulamalarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede farklı ortamların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sensörler üretilmektedir.

EYM teknolojisinde kullanılan filament malzemelere biyoaktif takviye malzemelerin eklenmesi ile rejeneratif tıp alanında kullanılmak üzere iskele yapıları üretilmektedir. İskele yapıları hücre ekilmesi ile yapay organ ve dokuların üretimi mümkün olmaktadır. Yeni nesil tedavi yöntemlerinde kişiye ve hastalığa göre ilaç dozajlaması önemli bir konudur. Biyolojik olarak vücutta çözünebilen EYM malzemeleri içerisine eklenen ilaçların dozaj kontrollü tabletler şeklinde üretilmeleri mümkündür. 2016 senesinde üç boyutlu EYM teknolojisi ile üretilmiş SPRITAM tabletleri US Food and Drug Administration (FDA) kullanılabilir onayı almıştır.

Akıllı malzemelerin EYM teknolojisi ile şekillendirilmesi, kompleks 4D sensörlerin üretimine olanak sağlamaktadır. Bu sayede dışarıdan verilen bir uyarana karşı şekil ya da özellik değiştirebilen sensörler imal edilebilmektedir. Bu özelliğin kullanılabilirdiği diğer bir alan akıllı giysiler olarak karşımıza çıkmaktadır. EYM teknolojisinin diğer bir uygulama alanı tekstil ve moda sektörüdür. 3B tasarım programı ile geliştirilmiş örgü ve düğüm yöntemleri TPU esnek filamentler kullanılarak EYM yöntemi ile üretilip konvansiyonel yöntemler ile üretilmiş giysilerin bir parçası olarak kullanılabilir. Bu sayede farklı tasarımlara ve özelliklere sahip olan akıllı giysiler geliştirilmiştir.

Günümüzde bilgi ve anlatıma dayalı eğitim yerine, öğrencilerin araştırdığı, sorguladığı ve uygulayarak öğrendiği modern eğitim teknikleri geliştirilmiştir. Özellikle uygulamanın etkin olduğu, mühendislik, tasarım ve tıp alanlarındaki eğitimlerde EYM teknolojileri ile üretilen, sistem, organ ve dokuların kullanılması hızla yaygınlaşmaktadır. Ayrıca tıp alanında kişilere ait CT tarama yöntemi ile elde edilmiş, organ ve dokuların 3B anatomik modellerinin EYM yöntemi ile imal edilebilmesi hasta üzerinde yapılacak olan cerrahi operasyonun doğru bir şekilde planlamasını sağlamaktadır. Bu sayede yapılacak olan cerrahi operasyonun başarı olasılığı arttırılmaktadır.

EYM teknolojilerinde ve kullanılan malzemelerdeki gelişmeler ve gelecekte elde edilecek ilerlemeler bu teknolojilerin hayatımızı daha kolaylaştırması anlamına gelmektedir. EYM teknolojisinin otomasyona uygun olması ve teknolojinin yakın gelecekte seri imalatta da kullanılabilir hale getirilmesi; tasarımdan direkt dijital imalatı mümkün kılacaktır. Bu sayede EYM teknolojisi, akıllı fabrikaların vazgeçilmez üretim teknolojilerinden birisi haline gelecektir.

KAYNAKLAR

1. Daminabo, S., Goel S., Grammatikos S.A., Nezhad H.Y., Thakur V.K., "Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems", *Materials Today Chemistry*, 16, 100248, pages 1-23, 2020.
2. Jiang, J., Lou J., Hu G., "Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes", *Virtual and Physical Prototyping*, 14(4): pages 308-315, 2019.
3. Najmon, J.C., S. Raeisi, A. Tovar, "Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry", Froes F., Boyer R., *Additive manufacturing for the aerospace industry*, pages 7-31, Elsevier, 2019.
4. Singh, S., Singh R., Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review, *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), pages 123-143, 2016.
5. Durgun, I., "Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool", *Rapid Prototyping Journal*, 21(4), pages 412-422, 2015.
6. Başcı, U.G., Ymanoğlu R., "Eklemeli Metal İmalat Teknolojileri İçin Metal Tozu Üretim Yöntemleri", *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, pages 219-227, 2019.

7. Tofail, S.A., Koumoulos E.P., Bandyopadhyay A., Bose S., O'Donoghue L., Charitidis C., "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities", *Materials Today*, 21(1), pages 22-37, 2018.
8. Sathies, T., Senthil P., Anoop M.S., "A review on advancements in applications of fused deposition modelling process", *Rapid Prototyping Journal*, 26(4), pages 669-687, 2020.
9. Gasman, L., "Additive aerospace considered as a business", Froes F., Boyer R., *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, pages 327-340, Elsevier, 2019
10. Wiese, M., Thiede S., Herrmann C., "Rapid manufacturing of automotive polymer series parts: A systematic review of processes, materials and challenges", *Additive Manufacturing*, 36,101582, pages 1-13, 2020.
11. Smith, M.L., Jones F.X.j., "Dual-extrusion 3D printing of anatomical models for education", *Anatomical Sciences Education*, 11(1), pages 65-72, 2018.
12. Ngo, T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D., "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", *Composites Part B*, 143, pages 172-196, 2018.
13. Dizon, J.R.C., Esperajr A.H.,Chen Q., Advincola R. C., "Mechanical characterization of 3D-printed polymers", *Additive Manufacturing*, 20, pages 44-67, 2018.
14. Das, A., Chatham C. A., Fallon J. J., Zawaski C. E., Gilmer E. L., Williaös C. B., Bortner M. J., "Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers", *Additive Manufacturing*, 34, 101218, pages 1-21, 2020.
15. Corcione, C.E., Gervaso F., Scalera F., Padmanabhan S. K., Madaghiele M., Montagna F., Sannino A., Licciulli A., Maffezzoli A., "Highly loaded hydroxyapatite microsphere/PLA porous scaffolds obtained by fused deposition modelling", *Ceramic International*, 45(2), pages 2803-2810, 2019.
16. Balletti, C., Ballarin M., Guerra F., "3D printing: State of the art and future perspectives", *Journal of Cultural Heritage*, 26, pages 172-182, 2017.
17. EN ISO/ASTM 52900:2017, Standart, "Additive Manufacturing, in General Principles-Terminology", 2017.
18. Başcı U.G., Ymanoğlu R., "Eklemeli Metal İmalat Teknolojileri Ve Uygulama Alanları", *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, pages 307-314, 2020.
19. Leary M., "Material Extrusion", *Design for Additive Manufacturing*, Elsevier, pages 223-268, 2020.
20. Chohan, J.S., Singh R., "Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications", *Rapid Prototyping Journal*, 23(3), pages 495-513, 2017.
21. Lalehpour, A., Janeteas C., Barari, "Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, pages 1505-1520, 2018.
22. Kuo, C., "Fabrication of modeling platform for fused deposition modeling using vacuum casting", *Materials Science & Engineering Technology*, 44(11): pages 922-926, 2013.
23. Lee, C. W., Chua C.K., Cheah C. M., Tan L. H., Feng C., "Rapid investment casting: direct and indirect approaches via fused deposition modelling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23, pages, 93-101, 2004.
24. Chua, C.K., Wong C. H., Yeong W. Y., "Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing", pages 1-213, Academic Press, Elsevier, 2017.
25. Long, J., Hamideh G., Jun L., Craig B., Ali S., "Application of fused deposition modelling (FDM) method of 3D printing in drug delivery", *Current Pharmaceutical Design*, 23(3), pages 433-439

26. Chakraborty, S., Biswas M. C., "3D printing technology of polymer-fiber composites in textile and fashion industry: a potential roadmap of concept to consumer", *Composite Structures*, 248, 112562, pages 1-14, 2020.
27. Sun L., "3D printing technologies: current applications, future trends and challenges", Yip J., *Latest Material and Technological Developments for Activewear*, pages 139-151, Woodhead Publishing, Elsevier, 2020.
28. Szulżyk-Cieplak, J., Duda A., Sidor B., "3D printers–new possibilities in education", *Advances in Science and Technology Research Journal*, 8(24), pages 96-101, 2014.
29. Torres, K., Staskiewicz G., Sniezynski M., Drop A., Maciejewski R., "Application of rapid prototyping techniques for modelling of anatomical structures in medical training and education", *Folia Morphologica*, 70(1), pages 1-4, 2011.