




EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME

Gökhan ÖZER^{1,*} 

¹Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi (ALUTEAM), Haliç Kampüsü, 34445, Beyoğlu, İstanbul, TÜRKİYE

ÖZET

Ekleme üretim, bir 3B CAD modelinin, malzemenin tabakalar halinde birleştirilerek fiziksel bir parçaya dönüştürüldüğü üretim işlemidir. Ekleme üretim son yıllarda oldukça önem kazanmış ve gelecekte daha çok hayatımızda rol alması beklenen son derece önemli bir teknolojidir. Ekleme üretim, günümüzde otomotiv, havacılık, uzay, sağlık-inşaat sektörleri, enerji gibi alanlarda devrim yaratmış bir yöntemdir. Dolayısıyla, ekleme üretim teknolojisini anlayabilmek günümüz için oldukça stratejik bir konudur. Bu çalışmada, ekleme üretime ait genel bilgi verilmiş ve günümüzde en fazla ticari olarak kullanılan ekleme üretim yöntemleri anlatılmıştır. Çalışmada ayrıca, ekleme üretimin kullanım alanlarından bahsedilerek, gelecekteki potansiyeli değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ekleme üretim (EÜ), Üretim yöntemleri, Ekleme üretim yöntemleri, Ekleme üretimin kullanım alanları, Ekleme üretimin geleceği

A REVIEW ON ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

ABSTRACT

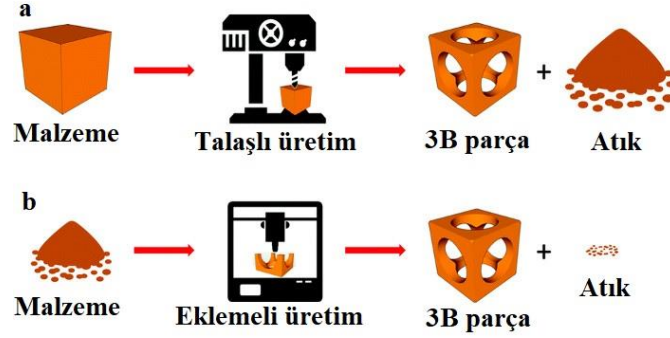
Additive manufacturing is a manufacturing process in which a 3D CAD model is combined into the layer by layer and converted into a physical part. Additive manufacturing has gained considerable importance in recent years and is an extremely important technology that will play a role in our lives in the future. Additive manufacturing is a revolutionary method in the automotive, aerospace, health and construction sectors, energy and more. Therefore, understanding of additive manufacturing technology is a very strategic issue for today. In this study, general information about additive manufacturing is given and the most commercially used additive manufacturing methods are explained. Then, the usage areas of additive manufacturing are mentioned and its future potential is evaluated.

Keywords: Additive manufacturing (AM), Manufacturing technologies, Additive manufacturing methods, Additive manufacturing applications, Future of additive manufacturing.

1. GİRİŞ

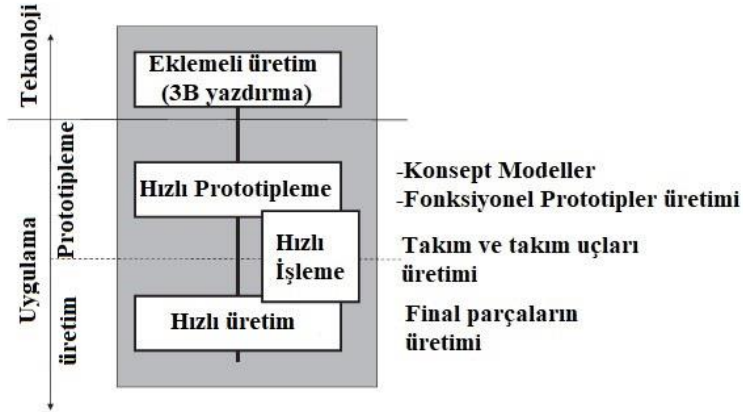
Ekleme üretim yöntemi, geleneksel talaşlı üretim yöntemlerinden (Şekil 1 (a)) farklı olarak, katmanların birbiri üzerine dizilmesiyle istenilen şeklin üretilmesi yöntemidir (Şekil 1 (b)). Bu nedenle aynı zamanda katmanlı üretim olarak da adlandırılır. Ekleme üretim terimi, voksel (bir pikselin 3 boyutlu karşılığı) denilen hacim elemanlarını birleştirerek otomatik olarak parça üreten tüm üretim teknolojilerini kapsayan genel bir terimdir. Ekleme üretimle, 3 boyutlu olan CAD modeli, başka tür bir model olan üçgen kafesli bir modele (Stereolithography-STL, STL bugünlerde 3B baskı uygulamaları için en yaygın format olmasına rağmen son yıllarda AMF veya 3MF gibi başkaları da ortaya çıkmıştır) dönüştürülür [1], [2]. Model, özel yazılımlarla katmanlara ayrıştırıldıktan sonra üç boyutlu yazıcı yardımıyla katman katman bir parçaya dönüştürülmektedir. Ekleme üretim sayesinde, tasarımda oldukça kolaylık sağlanmakta ve üretimi oldukça zor olan parçalar kısa sürede rahatlıkla üretilmektedir. [3-7].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, Tel.: +90 (212) 521 81 00, e-posta / e-mail: ozergokhan@gmail.com
Geliş / Received: 27.09.2019 Kabul / Accepted: 06.01.2020 doi: 10.28948/ngumuh.626011



Şekil 1. Üretim teknolojileri [8]

Eklemeli üretim teknolojileri iki ana uygulama bölümüne ayrılmaktadır; “hızlı prototipleme” ve “hızlı üretim”. Hızlı prototipleme, eklemeli üretimin prototip, model veya maket yapımını kapsarken hızlı üretim terimi ise, final parça ve ürünlerin üretilmesini göstermektedir. Takımların, takım uçlarının, masterların ve benzerlerinin üretimine ise “hızlı işleme” adı verilmektedir. Buradaki “hızlı” kelimesi görecelidir; tipik olarak birkaç saat içinde parçaların üretilmesini göstermekle birlikte kullanılan yöntemin tipine ve aynı anda üretilen parçaların boyutuna, sayısına ve karmaşıklığına bağlı olarak bu süre önemli ölçüde değişebilmektedir. Aslında “hızlı” kavramı bu teknolojinin felsefesini yansıtmaktadır [9]. Şekil 2’ de eklemeli üretim teknolojilerinin basit yapısı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2. Eklemeli üretim teknolojilerinin basit yapısı ve alt kategorileri [10]

Eklemeli Üretimin Kısa Tarihçesi

Eklemeli üretim düşüncesi çok eskilere dayanmasına rağmen ilk ortaya çıkan sistemin 1987 yılında SL (stereolitografi) olarak bilinen plastik işleme tekniğinin ticarileşmesi ile başladığı bilinmektedir. Proses dünyada ticari olarak üretilen ilk eklemeli üretim sistemidir. 1990’lı yıllar ise eklemeli üretim teknolojileri için dönüm noktası olmuştur. Kaynaştırıcı Biriktirme Modeli (Fused Deposition Modelling-FDM), Katı Zemin Kurlama (Solid Ground Curing-SGC) ve Katmanlı Malzeme Üretimi (Laminated Object Manufacturing-LOM) gibi yöntemler aynı yılda ticarileşmiştir (1991). Bu yöntemlerden kısa bir süre sonra Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi geliştirilmiştir. 1994 yılında Alman firması EOS, Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) teknolojisine dayanan M160 makinesini tanıtmış ve 1995 yılında M250 makinesini üretmiştir [11, 12].

Geçtiğimiz 20 yılda eklemeli üretim teknolojilerindeki gelişmeler oldukça hızlanmıştır. Mevcut teknolojiler gelişmeye devam ederken, Direkt Metal Lazer Ergitme (DMLM) gibi önemli yeni teknolojiler geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir. 2002 yılında Doğrudan Metal Biriktirme (DMD-Direct metal Deposition) sistemlerinin satışına başlamıştır. 2016 yılının başlarında, neredeyse her hafta yeni bir teknoloji, yeni bir ürün, yeni bir malzeme ya da yeni bir uygulama ortaya çıkmıştır. Zaman geçtikçe bu sistemler daha güvenilir ve daha verimli hale gelmiş, uygun malzeme çeşitliliği önemli ölçüde artmıştır [13-15].

Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Avantajları

Eklemeli üretim teknolojilerinin benzersiz avantajı bulunmaktadır;

EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME

- Üretim süreçlerini ve maliyeti azaltır,
- Ürün iyileştirmesini hızlandırır,
- Özel ürünler üretilebilir,
- Hızlı modelleme olanağı sağlar,
- Çok zor şekilli parçalar üretilebilir,
- Tasarımdaki süreleri düşürür,
- Tasarım ile üretimin arasındaki uyumu sağlar,
- Ürünün işlevsel olarak optimize edilmesine olanak sağlar (soğutma kanalları gibi),
- Üretim makinalarının sayısını azaltır,
- Daha kısa teslimat süreleri, daha düşük stok ihtiyacına olanak verir,
- Tasarım serbestliği sağlar,
- Hiçbir kalıba ihtiyaç duymaz,
- Az malzeme harcar, atık miktarını azaltır,
- Lojistiği kolaylaştırır [16-18].

2. EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Eklemeli üretim teknolojilerinde birçok üretim tekniği olduğundan bir ana grup altında toplanması mümkün değildir. ASTM F42 standardına göre eklemeli üretim teknolojileri 7 alt gruba ayrılmaktadır (Tablo 1) [19].

Tablo 1. ASTM Kategorisine göre eklemeli üretim teknolojilerinin sınıflandırılması [19].

ASTM Kategorisi	Çalışma prensibi	Örnek teknoloji	Avantajları
Yapıştırıcı Püskürtme	Parçacıklar birbirine yapıştırılarak katman katman inşa edilir.	• 3B mürekkep püskürtme (inkjet) teknolojisi	• Destek/altlık içermez, • Tasarım özgürlüğü sağlar, • Yüksek baskı hızı vardır, • Nispeten düşük maliyetlidir.
Direkt Enerji Biriktirme	Odaklanmış ısı enerjisi biriktirme esnasında malzemeleri eritir.	• Lazer Biriktirme, • Lazer Şekillendirme, • Elektron Işını, • Plazma Ark Ergitme.	• Tane yapısının yüksek derecede kontrolü mümkündür, • Yüksek kaliteli parçalar üretilebilir.
Malzeme Ekstrüzyonu	Malzeme, seçici olarak bir nozül veya orifisten (ağız) dışarı itilir.	• Ergiyik Yığılma Modelleme, • Ergiyik Filament Fabrikasyonu, • Ergiyik Katman Modelleme.	• Yaygın kullanımlıdır, • Ucuzdur, • Tamamen işlevsel parçalar oluşturabilir.
Malzeme Püskürtme	İnşa malzemesinin damlacıkları biriktirilir.	• 3B inkjet teknolojisi, • Direkt Mürekkep Yazdırma.	• Yüksek damlacık biriktirme doğruluğu vardır, • Düşük atık oluşturur, • Çoklu malzeme parçaları üretilebilir, • Çok renkli parçalar üretilebilir.
Toz Yataklı Birleştirme	Isı enerjisi, toz yatağındaki inşa malzemesinin küçük bir bölgesini birleştirir.	• Elektron Işın Ergitme, • Direkt Metal Lazer Sinterleme, • Seçici Lazer Sinterleme/Ergitme.	• Nispeten ucuz bir teknolojidir, • Geniş malzeme seçenekleri mevcuttur.
Plaka Tabakalaştırma	Malzemelerin sac/folyoları yapıştırılmıştır.	• Tabakalı Malzeme Üretimi, • Ultrason Birleştirme/Ultrason Eklemeli Üretim.	• Hızı yüksektir, • Düşük maliyetlidir, • Malzeme taşıma kolaylığı vardır.
Havuz Fotopolimerizasyonu	Bir havuzdaki sıvı polimer ışıkla sertleştirilir.	• SLA, • Dijital Işık İşleme.	• Büyük boyutlu parçalar üretilebilir, • Mükemmel boyutsal hassasiyet sağlar, • Mükemmel yüzey ve detaylar sağlar.

G. Özer

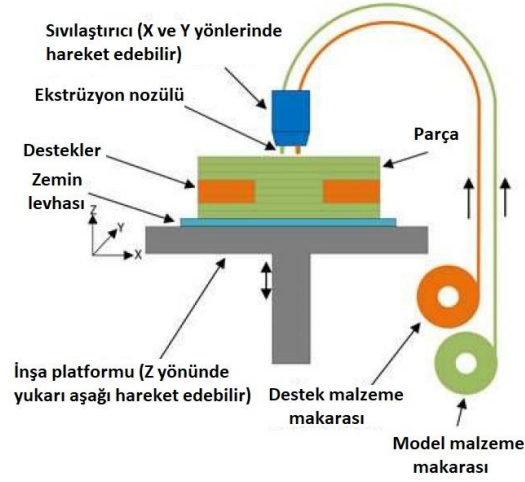
Yapıştırıcı Püskürtme	<ul style="list-style-type: none"> Sınırlı mekanik özelliklere sahip kırılğan parçalar üretilir, Son işlem gerektirebilir. 	<ul style="list-style-type: none"> Polimerler Seramikler Kompozitler Metaller Hibrit malzemeler 	Çok yönlü (küçükten büyüğe) X=<4000 Y=<2000 Z=<1000
Direkt Enerji Biriktirme	<ul style="list-style-type: none"> Yüzey kalitesi düşüktür, Metaller/metal tabanlı hibrit malzemelerle sınırlıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> Metaller Hibrit malzemeler 	Çok yönlü X=600-3000 Y=500-3500 Z=350-5000
Malzeme Ekstrüzyonu	<ul style="list-style-type: none"> Basamaklı yüzey oluşturur, Ayrıntılar için uygun değildir. 	<ul style="list-style-type: none"> Polimerler Kompozitler 	Küçükten ortaya X=<900 Y=<600 Z=<900
Malzeme Püskürtme	<ul style="list-style-type: none"> Destek malzemesi gereklidir, Fotopolimerler ve termoset reçineler gereklidir. 	<ul style="list-style-type: none"> Polimerler Seramikler Kompozitler Hibrit malzemeler Biyolojik malzemeler 	Küçük X=<300 Y=<200 Z=<200
Toz Yataklı Birleştirme	<ul style="list-style-type: none"> Nispeten yavaşdır, Yapısal bütünlük eksikliği vardır, Boyut sınırlamaları mevcuttur, Yüksek güç gereklidir. 	<ul style="list-style-type: none"> Polimerler Seramikler Kompozitler Metaller Hibrit malzemeler 	Küçük X=200-300 Y=200-300 Z=200-350
Plaka Tabakalaştırma	<ul style="list-style-type: none"> İşlem sonrası son işlemler gerekebilir, Sınırlı malzeme kullanılabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> Polimerler Seramikler Metaller Hibrit malzemeler 	Küçük X=150-250 Y=200 Z=100-150
Havuz Fotopolimerizasyonu	<ul style="list-style-type: none"> Sadece fotopolimerlerle sınırlıdır, İnşa işlemi yavaştır, Pahalı bir yöntemdir. Fotopolimerlerin düşük mekanik özellikleri vardır. 	<ul style="list-style-type: none"> Polimerler Seramikler 	Orta X<2100 Y<700 Z<800

Bu bölümde ticari açıdan en önemli eklemeli üretim teknolojileri ile bunların birleştirme ilkeleri, katman şekillendirme yöntemleri ve malzemeleri hakkında genel bilgi verilecektir.

2.1. Ergiyik Biriktirme/Yığıma Modelleme Tekniği (EBM)

Şekil 3’de yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. Bu teknoloji, günümüzün en çok satılan eklemeli üretim teknolojisidir. Bu yöntemde, nozülünden sıkılan bir plastik filament (tel) malzemesinin tabaka tabaka biriktirilmesi ile doğrudan bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinden fiziksel bir parça oluşturulur. Yöntemin en önemli üstünlüğü çok çeşitli malzemeler üretilebilmesi, maliyet düşüklüğü, seri üretime uygunluğu, malzemelerin geri dönüştürülebilir olması ve çevreye zararsız olmasıdır. Bu yöntemle, PLA ve ABS gibi birçok çeşit plastik oldukça sık olarak kullanılmaktadır. [20, 21, 28].

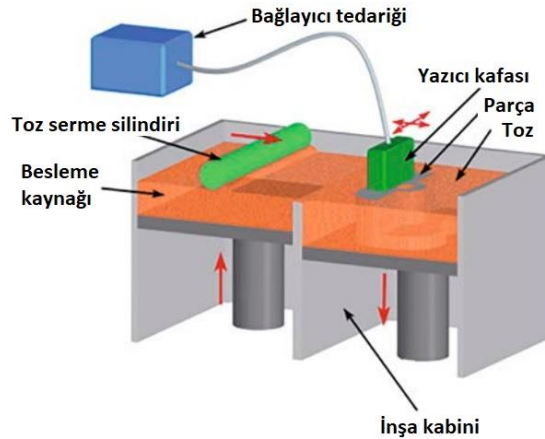
EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME



Şekil 3. EBM yöntemi (şematik) [20]

2.2. 3 Boyutlu (3B) Yazıcı

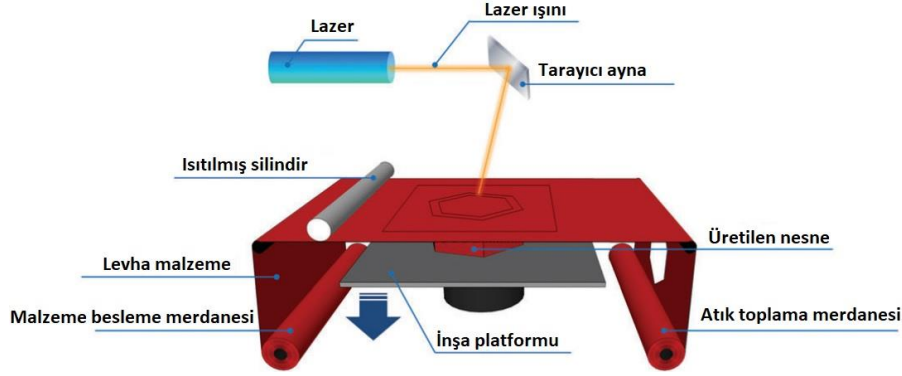
Şekil 4'de yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. Bu yöntemde, serilen gevşek tozun üzerine bağlayıcı püskürtülerek tozların birbirine bağlanması sağlanır. İşlem parça oluşturulana kadar katman katman devam eder. Bu yöntemle çok renkli parçaların üretilmesi mümkün olmaktadır. Genellikle kompozit tozlar kullanılır. Seramik tozlar kullanılıyorsa, yaşı sıkıştırılmalar oluşturulabilir ve daha sonraki işlem adımlarında sinterlenebilir. Destek yapıları gerektirmez [22].



Şekil 4. 3B Yazıcı (şematik) [22]

2.3. Tabakalı Parça Üretimi (TPÜ)

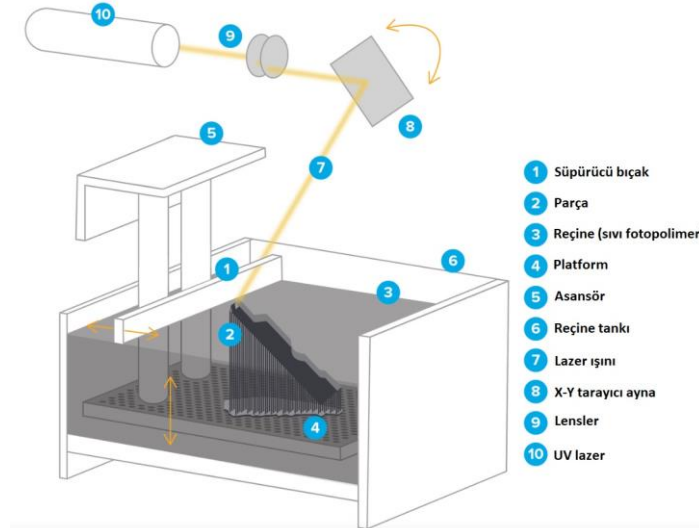
Şekil 5'de yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. Bu yöntemle, lamine malzemelerin (tabaka halinde bulunan bileşenler) kesilmesi ve yapıştırılması şeklinde parça üretilir. Besleme merdanesinden gelen malzeme, ısıtılmış silindir yardımıyla önceki katmanın üstüne yapıştırılır. Lazer ile her katmanda parçanın dış hatları kesilir. Fazla malzeme çıkarıldığında, birincinin üstüne ikinci bir tabaka yüklenir ve işlem devam eder. Kâğıt, metal, plastik, vb. olabilen malzemenin türüne bağlı olarak, her bir tabaka yapıştırıcılar ile öncekine bağlanmaktadır. İşlem, 3B parça oluşturulana kadar birçok kez tekrarlanır. Bu yöntemle, polimer kompozitler, seramikler, kâğıtlar ve metal kaplı bantlar gibi çok çeşitli malzemeler üretilebilmektedir [67]. Büyük boyutlu parçalar üretilebilir ve çevreye zarar vermeyen bir yöntemdir [23, 24].



Şekil 5. TPÜ yöntemi (şematik) [23]

2.4. Stereolitografi (SLA)

Şekil 6'da yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. SLA yöntemi, oda sıcaklığındaki fotopolimer (sıvı halde) reçine tabakasının ultraviyole lazer ışını yardımıyla kürleştirilmesi mantığına dayanmaktadır. SLA teknolojisi diğer yöntemlere göre hızlıdır. Dolayısıyla fonksiyonel parçalar daha hızlı üretilebilmektedir. Üretim maliyetleri düşüktür. Diğer yöntemlerle üretilmesi zor olan yüzeyleri son derece detaylı karmaşık şekilli parçalar bu yöntemle üretilebilmektedir. Çok farklı malzemelerle üretim yapmak mümkündür. SLA yöntemi, karmaşık nanokompozitler üretmek için etkili bir yöntemdir [67]. Fakat kullanılan reçine (hammadde) ve cihazlar daha maliyetlidir [26-28].

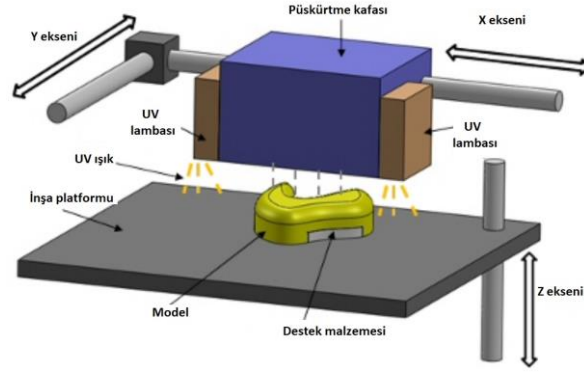


Şekil 6. SLA yöntemi (şematik) [25]

2.5. Polyjet Modelleme (PJM)

Şekil 7'de yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. Bu yöntem akrilik esaslı bir yöntem olup, çok sayıda ayrı nozül içeren baskı kafalarından büyük miktarda akrilik temelli fotopolimer katmanları basılarak hızlı, çizgi şeklinde malzeme biriktirmeyi verimli bir şekilde gerçekleştirmektedir. Jetting (püskürtme) sistemleri en yaygın kullanılan 3B yazıcı tipleri olarak kabul edilmektedir. Bunlar, tüketici modelleri için küçük ve ucuz makinelerden, on binlerce dolara mal olabilecek çok büyük ve profesyonel makinelere kadar geniş bir yelpazede olabilir. PolyJet çok iyi hassasiyet ile düzgün ve hassas parçalar üretebilen mükemmel bir eklemeli üretim teknolojisidir. Bu yöntemle, kauçuktan sert malzemelere, şeffaf malzemelerden opak malzemelere ve biyouyumlu malzemelere kadar geniş bir yelpazede malzeme üretilebilmektedir. Çeşitli ürün boyutlarına ve üretim hacimlerine uygulanabilen bir yöntemdir [29-31].

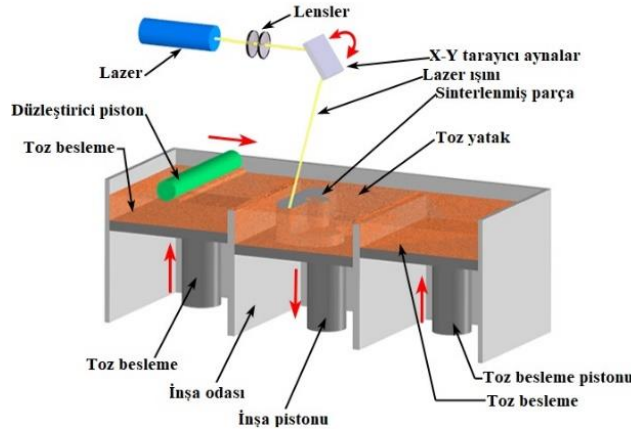
EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME



Şekil 7. PJM yöntemi (şematik) [29]

2.6. Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

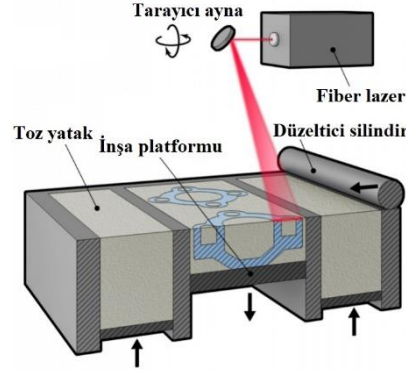
Şekil 8'de yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. Seçici Lazer Sinterleme (SLS), parça oluşturmak için tabaka tabaka ince tozların yayıldığı ve sinterlendiği bir eklemeli üretim işlemidir. Toz, inşa alanını tamamen kaplayan düzgün bir yüzey oluşturmak için bir düzleştirici silindir ile eşit şekilde dağıtılır ve yayılır. Odaklanmış bir lazer ışını daha sonra toz katmanına tam olarak yönlendirilir ve parçanın enine kesitini tarar. Her katman üretildikten sonra, bir rulo yatak üzerine taze bir toz tabakası yayılır ve işlem, parça tamamlanana kadar tekrar eder [32]. Tozların temel bağlama mekanizmaları dört kategoriye ayrılmaktadır: katı hal sinterleme, kimyasal olarak indüklenen bağlama, sıvı faz sinterleme ve kısmi ergime. SLS yöntemi ile plastik (poliamid gibi) ve birçok çeşit metal tozu (Ti6Al4V, AlSi10Mg, Maraging çeliği, 316L gibi) işlenebilir ve uygulama alanını çok genişletir [33-36].



Şekil 8. SLS yöntemi (şematik) [22]

2.7. Seçici Lazer Ergitme (SLE)

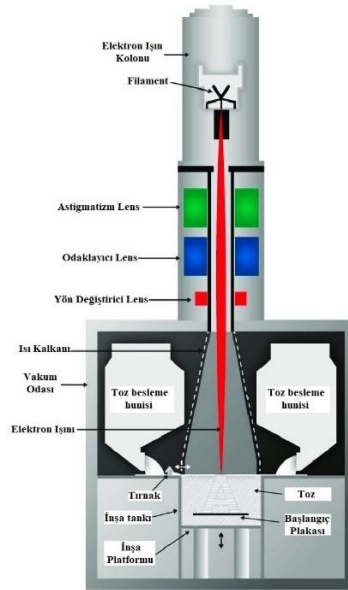
Şekil 9'da yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. Yöntem SLS tekniğine benzer, fakat SLS'den farkı tozların ergitilmesidir. Bu işlem, parça tamamlanuncaya kadar katman katman ilerler. Böylece birkaç saat içinde yüksek karmaşıklık ve hassasiyetle üç boyutlu parçalar üretebilir. Bu yöntemle, kobalt-krom, paslanmaz çelik, titanyum, inconel vb. metal tozlarından tamamen işlevsel parçalar üretmek mümkündür. Üretim hızlıdır, genelde 1-2 günde parçalar teslim edilir. Çok ayrıntılı ve karmaşık yapıya sahip olan parçalar; makine parçaları, özel tıbbi parçalar ve sanatsal ürünler kolaylıkla üretilebilir. Sürekli revizyon gerektiren parçalar ve tasarımlar için uygun bir yöntemdir. Fakat tasarımı değişmeyen ve yüksek miktarlarda üretim gerektiren parçalar için bu yöntem pahalı olmaktadır. Bu durum, özellikle yöntemin üretebileceği geometrik karmaşıklıklardan yararlanamayan basit tasarımlar için geçerlidir. Ayrıca makinelerin belirli bir boyut kapasitesi olduğundan çok büyük ebatlı parçalar için uygun bir yöntem değildir [38-40].



Şekil 9. SLE yöntemi (şematik) [37]

2.8. Elektron Işın Ergitme (EIE)

Şekil 10'da yöntemin şematik verilmiştir. Elektron Işını Erime, genellikle SLE'ye genellikle benzer fakat bu yöntemde önceden ısıtılmış tozu eritmek için bir lazer kaynağı kullanmak yerine elektron tabancası kullanılır. Bu da EIE'yi daha güçlü kılar, çünkü üretim hızı SLE'den yüksektir. Toz yatağı işlemleri, genellikle metalik uygulamalar için, özellikle karmaşık tasarımlar için kullanılır. EIE şu anda metal üretimi için tercih edilen bir işlemdir, ancak üretilen malzemenin elektriksel iletkenlik gerektirmesi ve işlemin bir vakumda yapılması ihtiyacı nedeniyle sınırlıdır. Bu yöntemle, ortopedik implantlar, uçak parçaları, türbin kanatları gibi parçalar üretilmektedir. [42-44].



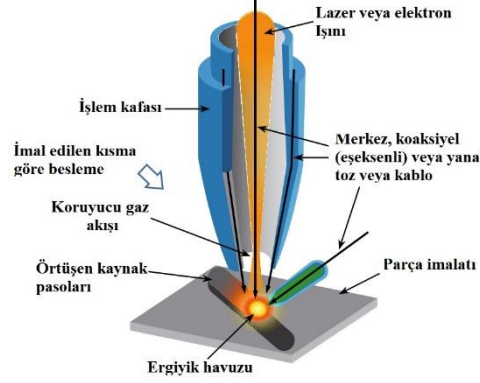
Şekil 10. EIE yöntemi (şematik) [21, 41]

2.9. Lazer Metal Biriktirme (LMB)

Şekil 11'de yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. LMB, metalik bir altlığın yüzeyinde ergimiş bir metal havuzu (ergiyik havuzu) oluşturmak için lazer ışını kullanan bir eklemeli üretim yöntemidir. Hem kaplama tabakasının yüksekliği hem de kaplama geçişinin genişliği, LMB tarafından üretilen parçaların en önemli özellikleridir. Şekillendirme yüzeyinin pürüzsüzlüğü, LMB işleminin önemli bir özelliğidir. LMB tarafından oluşturulan parçalar iyi mekanik özelliklere sahiptir ve gerilme kırılma yüzeyinin SEM morfolojisi, LMB tarafından oluşturulan parçaların oldukça yüksek süneklığe sahip olduğunu gösterir. LMB ile şekillendirilmiş parçaların kimyasal bileşimlerinin dağılımı homojendir ve neredeyse hiçbir bileşim ayrışması yoktur, bu nedenle LMB teknolojisi, geleneksel üretim teknolojisi sürecinde homojensizliğin neden olduğu dezavantaja sahip değildir. Tipik

EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME

uygulamaları arasında kalıp araçları, valfler ve vidalar gibi metalik bileşenler bulunur. LMB, gazaltı ark kaynağı ve termal püskürtme gibi birçok geleneksel üretim sürecinin yerini almaktadır [45-48].



Şekil 11. LMB yöntemi (şematik) [22]

Görüldüğü gibi, eklemeli üretim oldukça fazla yöntemi olan günümüzün öne çıkan teknolojisidir. Bu teknolojilere hala farklı yöntemler eklenmektedir. Eklemeli üretim teknolojileri hem iş hem de akademik dünyada oldukça ilgi çekmektedir. Bu teknoloji ile yüzlerce plastik çeşidinden onlarca metal tozuna, oldukça geniş kullanım yerinde parçalar üretmek mümkündür ve gelecekte bu ürün çeşitlerinin ve kullanım yerlerinin artması kaçınılmaz görülmektedir.

3. EKLEMELİ ÜRETİMİN UYGULAMA ALANLARI

3.1 Havacılık Sanayi

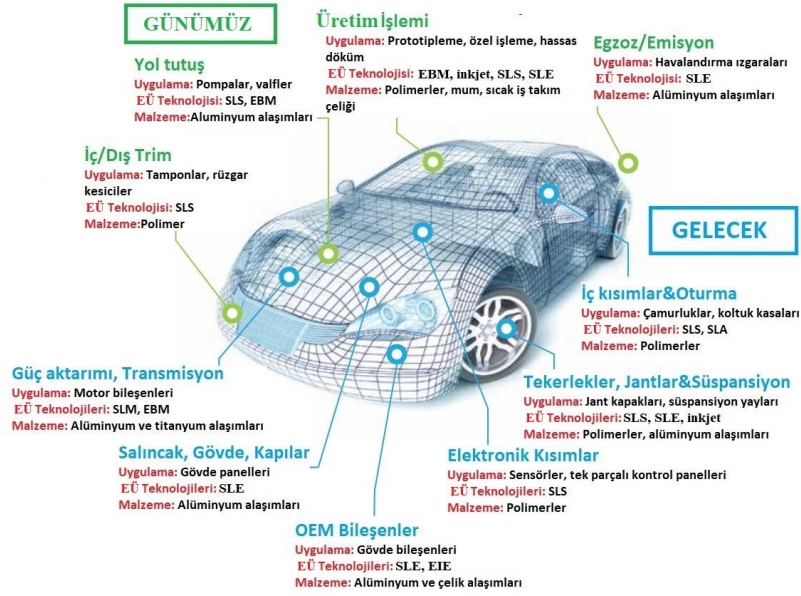
Havacılık ve uzay endüstrisi için en önemli gereksinimler, küçük miktarlarda iyi mekanik özelliklere sahip, hafif ve karmaşık geometriye sahip parçaların sürekli olarak üretilmesidir. Bu gereksinimler, eklemeli üretimi havacılık uygulamaları için çok önemli bir üretim yöntemi haline getirmiştir. Havacılık endüstrisinde kullanılan en yaygın eklemeli üretim yöntemleri EBM, SLE ve EIE'dir. Bu teknikler, düşük hacimli karmaşık havacılık parçaları, uçak kanatları, yedek parçalar ile özel parçalar, hafif yapılar, minimal atık içeren parçalar, talep üzerine üretilen (on-demand) parçalar ve uzun vadeli uzay araştırmalarını desteklemek için gerekli yedek parçalar üretmek için kullanılır. Alüminyum, titanyum, nikel süper alaşımları ve özel çelikler gibi ileri malzemeler eklemeli üretim teknolojileri kullanılarak havacılık endüstrisi için üretilmiştir. Eklemeli üretim teknolojileri, havacılık endüstrisinde yeni malzemeler ve tasarımlar geliştirmek için kapıyı açmaktadır. Bununla birlikte, eklemeli üretimin mekanik anizotropi, mikroyapısal homojensizlik, artık gerilmeler, boyutsal hassasiyet ve yüzey bitirme gereksinimi gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Lockheed Martin, Oak Ridge Laboratuvarı, Cranfield Üniversitesi, NASA, Honeywell, Ohio Havacılık Enstitüsü, Pratt&Whitney, Connecticut Üniversitesi gibi havacılık enstitüleri ve üniversiteler arasındaki araştırma işbirlikleri şu anda havacılık endüstrisi için eklemeli üretim olanaklarını değerlendirmektedir. Boeing, Airbus ve GE gibi sektörün en önemli firmaları eklemeli üretim tesislerini ve yeteneklerini geliştirmek için önemli yatırımlar yapmaktadır. Eklemeli üretim teknolojilerinde malzeme ve donanım fiyatlarının, kullanım ve talebin artmasıyla, önümüzdeki 10 ila 30 yıl boyunca ciddi şekilde düşmesi beklenmektedir. Eklemeli üretim pazarı son 7 yılda kabaca 5,7 kat büyümüştür. Havacılık endüstrisi için eklemeli üretim teknolojilerinin kullanımındaki artışın yaklaşık 1 milyar dolar civarında olması öngörülmektedir [49-51].

3.2 Otomotiv Sanayi

Eklemeli üretim teknolojilerinin özellikle otomotiv endüstrisi için, geçerli olan tedarik zincirleri ve envanter sistemlerinin yanı sıra parça tasarımı üzerinde de önemli etkileri vardır. Otomotiv sektöründe metal eklemeli üretim işlemlerinin kullanılmasının önemli bir özelliği, karmaşık şekilli hafif yapılar üretmektir. Otomotiv parçalarının ağırlığı, eklemeli üretim işlemlerinin karmaşık geometrilere sahip parçalar üretme yeteneğinin kullanılması ile önemli ölçüde azaltılabilir. Eklemeli üretim yöntemleri tarafından üretilen otomotiv parçalarının örnekleri yapısal kompozit bileşenler, motor vanaları ve turboşarj türbinleridir. Envanter ihtiyaçlarını, nakliye maliyetlerini ve malzeme tedarik maliyetlerini azaltan önemli bir avantaj da şirket içi ve talep üzerine üretimdir. Otomotiv endüstrisindeki eklemeli üretim süreçlerinin yeteneklerine rağmen, üretilen parçaların belirli bir performans seviyesini gerçekleştirmek için standartlara uyması gerekir. Eklemeli üretim teknolojisinin otomotiv sanayisindeki ana zorlukları şunlardır;

- Eklemeli üretim parçalarında performansı etkileyen ısıl gerilmeler,
- Yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyetler ve
- Tipik üretim hacimlerinden dolayı işlem hızının kritik olmasıdır.

Prototipleme, eklemeli üretimin otomotiv sanayisindeki tek kullanım yeri değildir. 2011 yılında Kor, Ecologic Urbee modelini tanıtmıştır. Bu otomobilin en ilginç yanı gövdeyi oluşturan tüm parçaların eklemeli üretim (EBM) yöntemiyle imal edilmiş olmasıdır. Dolayısıyla otomotiv sanayisinde eklemeli üretim kullanımı, gelecekte araçların görünüm ve çalışma şeklini etkili bir şekilde değiştirecektir. Şekil 12, eklemeli üretim teknolojilerinin otomotiv endüstrisindeki şu anki ve gelecekteki kullanım alanları çok güzel özetlemektedir [52-55].



Şekil 12. Otomobilde eklemeli üretim uygulamaları [55]

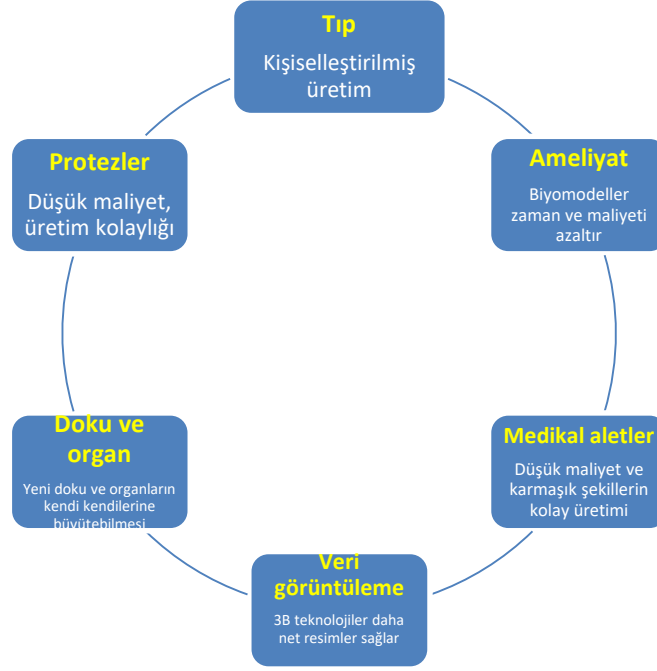
3.3 Sağlık Endüstrisi

Eklemeli üretim teknolojilerinin sağlık sektöründe kullanımı hızla artmaktadır. Özellikle tıbbi cihazların üretimi, eklemeli üretim teknolojilerinin gelişmesiyle köklü bir değişim geçirmiştir. Eklemeli üretim, tıbbi alet ve cihazlar ile implant üretmek için devrim yaratan ümit verici bir teknolojidir. Bu teknoloji sayesinde, implantların üretim süresi geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında çarpıcı biçimde azaltılabilir. Dahası, implantlar ayrıca hastanın kişisel anatomisine dayanarak da üretilebileceği için hastaya daha iyi uyum sağlayarak seri üretilen implantlardaki yaygın olan başarısızlık olasılığını azaltmaktadır. Diş hekimliği endüstrisinde eklemeli üretim süreçleri hassas dental kuronlar, köprüler ve implantlar oluşturmak için kullanılır. SLE işleminin özel, karmaşık, doğru ve tamamen yoğun parçalar üretme kabiliyeti onu dental uygulamalar için uygun hale getirir. Kuron ve köprüler oluşturma işlemi, hastanın dişlerinin dış izleniminin taranması, parçanın dijital modellenmesi ve ardından SLE üretiminden oluşur. Bu işlem eklemeli üretim için geleneksel döküm ve frezeleme üretim yöntemlerine rakip olan rekabetçi bir pazar sunar. Ek olarak, kişiselleştirilmiş protez üretimi için titanyum veya kobalt-kromdan yapılan yapay dişler için benzer bir işlem kullanılır. Medikal sektörde metal eklemeli üretim prosesleri çok hızlı bir şekilde özel bileşenler üretebilmesi nedeniyle kullanılmaktadır. Teknoloji, ısmarlama tıbbi implantların yanı sıra ameliyathanelerde kullanılmak üzere cerrahi aletler üretmek için çok kullanışlıdır. Ayrıca, 3B baskı teknikleri, biyobenzetim (doğadaki tasarımların mühendislikte kullanılması) yapıya sahip nesnel oluşturmak için son derece uygundur [56].

Sağlık sektörü, bugün bize şaşırtıcı görünen ancak yakın gelecekte yaygın olarak kullanılacak eklemeli üretim uygulamaları için son derece uygun bir sektördür. Amerika Birleşik Devletleri'nde bir şirket bir kadının çenesini, eklemeli üretim ile üretilmiş titanyum kranial implantlara sahip protezle değiştirmiştir. 2013'te doktorlar, bir erkeğin kafasının %75'ini 3B baskılı implant ile değiştirmiştir. İngiltere'de doktorlar, nadir görülen kanser türüne sahip bir adamın pelvisinin yarısını eklemeli üretimle üretilmiş parçayla değiştirmişlerdir. Hastalar için on binlerce yeni kalça kabı basılmış ve implante edilmiştir. Çene implantları, kalça, diz ve omuz protezleri gibi tıbbi cihazların büyük çoğunluğu, geleneksel yöntemlerle üretilmiş ve son derece pahalı malzemelerden oluşur. Bu durum, eklemeli üretim kullanarak bu tür ürünlerin geliştirilmesinde yenilikçi bir fırsat sunar; genel maliyet ve üretim süresi büyük ölçüde azaltılabilir. Sağlık hizmetlerinde diğer eklemeli üretim teknolojileri ürünleri arasında burunlar, cilt, yapay

EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME

uzuvlar için özel kaplamalar, kozmetik kulaklar ve biyonik kulaklar bulunmaktadır. Tüm işitme cihazı kovanlarının yaklaşık %95'i 3B yazdırılmıştır. Yaklaşık 17 milyon diş hizalayıcısının kalıpları her yıl 3B basılmaktadır. Eklemeli üretimin medikal sektördeki en büyük avantajı, düşük maliyetli, çok özel parçalar ve çok karmaşık parçalar üretebilmesidir. Şekil 13'de eklemeli üretim teknolojilerinin sağlık sektöründeki üstünlükleri görülmektedir [57-60].



Şekil 13. Eklemeli üretim teknolojilerinin sağlık sektöründeki avantajları [60]

3.4 Kalıpcılık (Tooling) Endüstrisi

Eklemeli üretimin kalıpcılık endüstrisinde kullanımı, geleneksel talaşlı üretimle ilişkili malzeme kaybının ortadan kaldırılması, üretim adımlarının azaltılması ve maliyet azaltılması yoluyla zaman tasarrufu sağlamaktadır. Buna ilaveten, eklemeli üretim teknolojisi, parçalara benzersiz özellikler kazandırabilen ve üretim döngü süresini azaltabilen optimize edilmiş soğutma kanallarına sahip özelleştirilmiş kalıplar üretme olanağı sunar. Kalıpla bütünleşik soğutma kanalları ile üretilen eklemeli üretim kalıpları, tasarımcıya, kalıbın yaşadığı termal baskı yükünü azaltma yeteneği sağladığı için hizmet ömrünü de uzatır. Eklemeli üretim ile yapılan üretim takımları bir dizi potansiyel avantaj sunmaktadır, bunlar; kısa teslim süreleri ve düşük maliyettir. Daha da önemlisi, eklemeli üretim tarafından üretilen takımlar son ürünün performansını iyileştirmektedir. Bununla birlikte, eklemeli üretimin daha genel uygulamaları için ortak olan bazı zorluklar devam etmektedir. Bunlar arasında, daha geniş bir kullanılabilir malzeme portföyüne olan ihtiyaç, daha büyük üretim miktarları (daha büyük takımlar üretme yeteneği), eklemeli üretim tasarımı ve üretiminde uzman bir işgücü ve maliyet rekabetçiliğindeki gelişmeler sayılabilir [57, 62].

Eklemeli imalat teknolojileriyle kum döküm kalıpları da üretilebilmektedir [63].

3.5 Nano-üretim

Son zamanlarda, eklemeli üretim teknolojileri yeni nano kompozitlerden parçalar üretmek için nano teknoloji ile bütünleşmiştir. Eklemeli üretim işlemlerinde nano malzemelerin kullanılmasının ana yararı, imal edilen parçaların malzeme özelliklerini arttırmaktır. Bu sayede, daha iyi optik, termal, elektrokimyasal ve mekanik özelliklere sahip parçalar elde edilmiştir. Geçtiğimiz birkaç on yıl boyunca, eklemeli üretim işlemlerinde karbon nano tüpleri, nano telleri, metal nano parçacıkları ve nano-grafen içeren çok çeşitli nano malzemeler kullanılmıştır. Nano ölçekteki eklemeli üretim, nano gözeneklerle metal parçaların üretilmesinde hayati bir rol oynayıp, böylece gözeneklerin ve boşlukların oluşumunu ortadan kaldırmakta veya minimize etmektedir [64, 65].

3.6 Enerji

Yenilenebilir enerji (örneğin güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi) ve temiz enerji (örneğin hidrojen enerjisi), çevresel sorumluluğu ve fosil enerjiye bağımlılığı azaltmak için umut verici çözümlerdir. “Yeşil” enerji cihazlarından biri olan yakıt hücreleri, yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu ve düşük emisyon gibi büyük avantajlar sağlar. Potansiyel uygulamaları arasında taşınabilir güç kaynakları, otomotiv sistemleri ve dağıtılmış güç sistemleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek maliyet ve düşük dayanıklılıkları, yakıt hücrelerinin geniş uygulamasını engellemektedir. Eklemeli üretim teknolojisi, yeni ürünlerin araştırma ve geliştirme maliyetini ve süresini azaltmak için prototiplerin hızlı bir şekilde geliştirilip üretilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması için yeni tasarımların keşfedilmesi gibi enerji alanına katkıda bulunacak geniş fırsatlar sunmaktadır. Örneğin, Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücrelerinde en önemli bileşenlerden biri olan grafit kompozit bipolar plakayı imal etmek için SLS bazlı bir işlem geliştirilmiştir. SLS kullanılarak, yeni bipolar plakaların geliştirilmesinin maliyeti ve süresi, pahalı metal kalıpların üretilmesi gereken enjeksiyon kalıplama ve sıkıştırma kalıplama gibi geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında dramatik bir şekilde azaltılabilir. Eklemeli üretim teknolojisi ayrıca tasarım olanaklarını genişletmekte ve enerji verimliliğini ve/veya güç yoğunluğunu iyileştirebilecek yeni tasarımları gerçekleştirmeyi kolaylaştırmaktadır [66].

3.7 Yapı Sektörü

Mimari uygulamalar, toplam eklemeli üretim sektörünün sadece %3'ünü temsil ettiği halde, eklemeli üretimin 2014 yılından bu yana konut yapılarında kullanılmaya başlandığı düşünülürse henüz başlangıç aşamasında olduğu görülmektedir. 3B baskı teknolojisine sahip otomatik bina inşaatları son yıllarda artan ilgi görmektedir. İnşaat sektöründe kullanılan geleneksel teknikler döküm, kalıplama ve ekstrüzyondur. Yapı endüstrisinde 3B baskı teknolojisi geometrik karmaşıklıklar ve boşluklu yapılar gibi kısıtları olduğu alanlarda kullanılabilir. Binaların ve altyapıların otomatik inşası ve alan uygulamaları için kontur işçiliği (contour crafting-CC) teknolojisini geliştirilmiştir. Bu teknik, yerinde malzemeleri yerinde kullanabilme kabiliyetinden dolayı, düşük gelirli konutların inşaatı ve inşaların geleceğinde yer alacak ay, Mars ve başka gezegenlerdeki yapıların oluşturulmasında kolayca kullanılabilir. İlk 3B baskılı konut yapısı, EBM yönteminin kullanıldığı 2014 yılında Amsterdam'da geliştirilmiştir. 2014 yılında ayrıca Çin'de mimari bir firma olan WinSun, Şangay'da 24 saatten daha kısa bir süre içinde seri basılmış konut evleri inşa etmiştir. Geleneksel 3B yazıcılar, bu teknolojinin endüstride boyutlarından dolayı kullanılamasa da çimento ve cam elyafı kullanılan bu projede 150 x 10 x 6,6 m boyutunda bir 3B yazıcı kullanılmıştır [67].

Ancak, eklemeli üretimin inşaat sektöründe kullanımı malzeme israfı ve daha emek yoğun olma eğilimindeki hassasiyetler gibi bazı zorluklar barındırmaktadır. 3B baskı kullanan hammaddeler ve üretim süreci geleneksel inşaat yöntemlerinden farklı olduğu için hem robot hem de inşaat işlerini bir araya getirme becerisine sahip kalifiye işçiler için gereklilik inşaat endüstrisinde eklemeli üretim için başka bir engel olmaya devam etmektedir. İnşaat sektörünün, Dünya kaynaklarının üçte birini tüketmekten sorumlu olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, maddi verimlilik ve etkin inşaat stratejileri çevresel etkileri ele almak için önemli faktörlerdir. 3B baskının büyük ölçekli bir inşaat projesinde uygulanabilirliğini arttırmak için, tüm potansiyelinden faydalanılması için teknolojiyi iyice anlamak gerekmektedir. Eklemeli üretim teknolojisi halen inşaat sektöründeki başlangıç aşamasında olmasına rağmen, bu teknolojiyi kullanarak geleneksel bina süreçlerinin potansiyel olarak geliştirilebileceği öngörülmektedir [67].

3.8 Sanat ve Hobi Uygulamaları

Eklemeli üretim teknolojileri, moda, mobilya ve aydınlatma endüstrisinde sanatçıya, akla gelebilecek en karmaşık şekli üretme imkânı veren çok güçlü bir araçtır. SLS kullanan giysiler de dâhil olmak üzere mobilya parçaları ve aksesuarlar üreten şirketler bulunmaktadır. Eklemeli üretim teknolojileri, endüstriyel olmayan kullanıcılara da ulaşmaktadır. Bu devrim 2007 yılında, 500 \$'a kadar düşebilecek yazıcılarla başlamıştır. Bununla birlikte, bu düşük maliyetli yazıcılar çoğunlukla kendin yap (Do-It-Yourself-DIY) projeleri olarak satıldığından, kullanıcılar için teknik yetenek gerekmektedir. Ancak son zamanlarda büyük firmaların işletmeye girmesiyle 3B yazıcılar büyük kitlelere ulaşmaya daha yakındır. Kullanıcılar normalde mühendisler tarafından kullanılan CAD yazılımlarını kullanabilmektedir. Hobiciler için gerekli tasarımların daha kolay olanları da bulunmaktadır. Hobicileri, 3B modeller yaparak ve bir 3B yazıcı kullanarak yazdırabilen birçok uygulama vardır [68].

Eklemeli üretim son 30 yılda oldukça hızlı gelişmiştir. Bu teknolojinin geleneksel üretim yöntemleri üzerindeki etkisi gelecekte oldukça artacaktır. Uygulama alanlarından görüldüğü gibi bu teknoloji ile herhangi bir parça, herhangi bir miktarda, herhangi bir yerde, herhangi bir endüstriyel alanda üretilebilmektedir. Malzeme, tasarım ve üretim süreçlerindeki yenilikler, eklemeli üretim teknolojisi ve süreçlerinin geleneksel üretim süreçleriyle birleştirilmesinden ilham alacaktır [69].

EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME**4. EKLEMELİ ÜRETİMİN GELECEĞİ**

Eklemeli üretim sanayi şu anda bir dönüm noktasındadır. Giderek daha fazla sayıda endüstriyel birimler bu teknolojiyi kullanmaya başlamıştır. Amerika’ da yapılan bir ankete katılan şirketlerin %11’i bireysel parçalar veya entegre üretimlerin küresel üretimi için 3B yazıcı teknolojisine geçtiklerini bildirmişlerdir. 2020 yılına gelindiğinde büyük Amerikan şirketlerinin yaklaşık %42’sinin eklemeli üretim teknolojisi kullanacağı öngörülmektedir [70].

Eklemeli üretim için malzeme ve teknoloji yelpazesi genişlemeye devam ettikçe bunu daha fazla şirketin takip etmesi beklenmektedir. Eklemeli üretim gelecekte hayatımızda daha çok rol oynayacaktır. Bu teknolojiye olan gelişmeler ile birlikte malzeme ve makine fiyatlarındaki azalmalar 3B yazıcıları evimizin bir parçası haline getirebilir. Eklemeli üretimin gelecekte en büyük katkıyı yedek parçalar için yapacağı öngörülmektedir. Çok kritik parçalar geleneksel üretim yöntemleriyle üretilirken daha az kritik parçalar firmalarda yerel olarak eklemeli üretim yöntemleriyle üretilir. Şu anda geleneksel yöntemlere üretilen yedek parçaların depolanma sorunu ve yavaş tedariki firmalar için büyük problem oluşturmaktadır. Şirketlerin yerel olarak eklemeli üretim teknolojileri ile üreteceği parçalar bu sorunu çözmek için en uygun senaryodur. 2030 yılına kadar toplam endüstri eklemeli üretim kapasitesinin %50’den fazlasının kurum içinde olacağı öngörülmektedir. Eklemeli üretim sayesinde, üretim ve taşımacılık sektörünün karbon ayak izleri 2030 yılına kadar büyük ölçüde azalacaktır. 2030 yılında, geleneksel olarak üretilen ürünlere karşı eklemeli üretim ile üretilen ürünlerin (ürünler, bileşenler) pazar payı, tüm sektörlerde için önemli seviyelerde olacaktır (>%10). Yakın gelecekte eklemeli üretim yöntemleriyle basılmış insan organları, bağış organları için uygulanabilir ve büyük ölçüde kullanılan bir ikame olacaktır [70].

Bununla birlikte eklemeli üretim teknolojisinin yaygınlaşması için üç ana alanda çaba gösterilmelidir, bunlar; maliyetlerin azaltılması, aynı parçanın geleneksel yöntemle üretimi üzerindeki eklemeli üretim teknolojisinin karşılaştırmalı faydaları ve bu faydaların meydana gelme oranıdır. Eklemeli üretimin kendisini geleneksel üretimden farklılaştırdığını iddia ettiği avantajların daha pratik bir alternatif haline gelmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Fakat bu gelişmelere yönelik yeni araştırmalar, akademik ve endüstriyel ortamlar arasındaki (özellikle araştırma laboratuvarlarının ve ticari üreticilerinin arasında) geleneksel boşluklar nedeniyle yavaştır. Dolayısıyla eklemeli üretim konusunda üniversite-sanayi iş birliğinin son derece önemli olduğu bir gerçektir [71-73].

5. SONUÇLAR

Sanayi 4.0 kavramının geliştiği günümüzde eklemeli üretim teknolojileri oldukça önem kazanmıştır [74]. Eklemeli üretimin gelecekte hayatımızın içinde daha fazla yer tutacağı açıkça görülmektedir. Bu teknoloji sayesinde büyük miktarlardaki üretimin sadece birkaç yerde bulunan tesislerde üretilmesine gerek kalmayacak, parçalar çok daha geniş coğrafyalarda üretilebilecektir. Özellikle kişiye özel üretim ile birlikte hastanelerde organların basılacağı, herkesin evinde kendi ihtiyaçları olan parçaları basabileceği eklemeli üretim teknoloji sistemlerinin bulunacağı bir gelecek hayal etmek saçma değildir. Bununla birlikte, organ basımı gibi konulardaki etik tartışmalar ve bu teknolojiyle alakalı patent, fikir ve mülkiyet haklarında doğabilecek sorunlar da göz ardı edilmemelidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya yol göstererek büyük destek veren Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN ve FSMVÜ/ALUTEAM çalışma arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

KAYNAKLAR

- [1] D. S. Gonzales, and A. G. Alvarez, Additive Manufacturing Feasibility Study&Technology Demonstration, Spain, EDA AM State of the Art&Strategic Report, June 2018.
- [2] H. Kahraman, “Endüstri 4.0 ile Katmanlı Üretim” Jul. 26, 2018. [Online]. Available: <https://www.endustri40.com/endustri-4-0-ile-katmanli-uretim>. [Accessed May. 03, 2019].
- [3] A. B. Badiru, V. V. Valencia, D. Liu, Additive Manufacturing Handbook. New York: CRC Press, 2017.
- [4] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. Oxford: Springer, 2015.
- [5] M. Brandt, Laser Additive Manufacturing, Materials, Design, Technologies and Applications. Duxford: Woodhead Publishing, 2017.

- [6] J. O. Milewski, Additive Manufacturing of Metals, From Fundamentals Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry. Cham: Springer Series in Materials Science, 2017.
- [7] T. S. Srivatsan, and T. S. Sudarsan, Additive Manufacturing, Innovations, Advances and Applications. New York: CRC Press, 2016.
- [8] D. Jamie, “3D Printing vs CNC Machining: Which is Best for Prototyping” Mar. 16, 2018. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/>. [Accessed Dec. 14, 2019].
- [9] D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Roprawe, “Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms, International Materials Reviews, vol. 57, no. 3, pp. 133-164, 2012.
- [10] A. Gebhardt, J. S. Hötter, Additive Manufacturing, 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: HANSER Publications, 2016.
- [11] T. Wohlers, and T. Gornet, “History of Additive Manufacturing”, Wohlers Report, 2016.
- [12] M. Shellabear, and O. Nyrhila, “DMLS-Development History and State of the Art”, LANE 2004 Conference, Erlangen, Germany, 2004.
- [13] A. Bandyopadhyay, and S. Bose, Additive Manufacturing. Florida: CRC Press, 2016.
- [14] L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon, and S. Wiener, Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Birmingham: Springer Series in Advanced Manufacturing, 2017.
- [15] M. Gouge, and P. Michaleris, Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing. Oxford: Matthew Deans Publisher, 2018.
- [16] S. Ford, and M. Despeisse, “The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability”, International Conference on Advances in Production Management Systems, IFIP, Tokyo, Japan, 2015.
- [17] S. Mellor, L. Hao, and D. Zhang, “Additive Manufacturing: A Framework for Implementation”, vol. 149, pp. 194-201, 2014.
- [18] M. K. Niaki and, F. Nonino, The Management of Additive Manufacturing. Birmingham: Springer, 2018.
- [19] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. Odoghue, and C. Charitidis, “Additive Manufacturing: Scientific and Technological Challenges, Market Uptake and Opportunities”, Materials Today, vol. 21, no. 1, pp. 22-37, 2018.
- [20] A.W. Gebisa, and H. G. Lemu, “Investigating Effects of Fused-Deposition Modelling (FDM) Processing Parameters on Flexural Properties of ULTEM 9085 Using Designed Experiment”, Materials, vol. 11, no. 500, pp. 1-23, 2018.
- [21] K. Çelik, and A. Özkan, “Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 5, no. 1, pp. 107-121, 2017.
- [22] R. Anderl, H. J. Schmid, M. Kage, and M. C. H. Karg, Additive Manufacturing, Acatech-National Academy of Science and Engineering, GERMANY, 2017.
- [23] A. Ambrosi, and M. Pumera, “3D-Printing Technologies for Electrochemical Applications”, Chemical Society Reviews, vol. 45, pp. 2470-2755, 2016.
- [24] B. Yalçın, and B. Ergene, “Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi”, SDU International Journal of Technological Science, vol. 9, no.3, pp. 67-88, 2017.
- [25] “Stereolithography 3D Printing: From the 1980s to Now” Formlabs, Jun. 20, 2018. [Online]. Available: <https://formlabs.com/blog/history-of-stereolithography-3d-printing/>. [Accessed Dec. 21, 2019].
- [26] “What is SLA?” [Online]. Available: <https://www.poligonmuhendislik.com/en/services/manufacturing/rapid-prototyping/sla/>. [Accessed Nov. 22, 2019].
- [27] “SLA-Reçine 3D Baskı Teknolojisi”, 3DURAK, [Online]. Available: <https://3durak.com/sla-recine-3d-baski-teknolojisi/>. [Accessed Nov. 22, 2019].
- [28] K. Özsoy, and B. Duman, “Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği, International Journal of 3D printing Technologies and Digital Industry, vol. 1, no.1, pp. 36-48, 2017.
- [29] R. Udroui, and I. C. Braga, “Polyjet Technology Applications for Rapid Tooling”, MATEC Web of Conferences, 112, Gdansk, Poland, 2017.
- [30] İ. Çelik, F. Karakoç, M. C. Çakır, and A. Duysak, “Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 31, 53-70, 2013.
- [31] P. Gay, D. Blanco, F. Pelayo, A. Noriega, and P. Fernandez, “Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat Polyjet Manufactured Parts”, Procedia Engineering, vol. 132, pp. 70-77, 2015.
- [32] M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang, “A Review on 3D Micro-Additive Manufacturing Technologies”, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, vol. 67, pp. 1721-1754, 2013.
- [33] M. Yakout, M. A. Elbestawi, and C. Veldhuis, “A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies, Solid State Phenomena, vol. 278, pp. 1-14, 2018.
- [34] B. Duman, and M. C. Kayacan, “Doğrudan Metal Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini”, SDU Teknik Bilimler Dergisi, vol. 7, no. 1, pp. 12-28, 2017.

EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME

- [35] M. Y. Kayacan, and N. Yılmaz, “DMLS ile Eklemeli İmalatta Dengesiz Sıcaklık Dağılımı ve Parçaya Etkilerinin Araştırılması”, Academic Platform Journal of Engineering and Science, Vol. 7, no.1, pp. 79-94, 2019.
- [36] A. R. R. Bineli, A. P. G. Peres, A. L. Jardini, and R. M. Filho, “Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Technology for Design and Construction of Microreactors”, 6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering, Caxias do Sul, Brazil, 2011.
- [37] “Selective Laser Melting and Milling, SLMM” Manufacturing Guide, Sept. 05, 2019. [Online]. Available: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-melting-and-milling-slmm>. [Accessed Oct. 08, 2019].
- [38] Ö. Poyraz, and M. C. Kuşhan, “Metallerin Lazer Katmanlı İmalatında Farklı Proses Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi”, Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 33, no. 2, pp. 729-742, 2018.
- [39] E. Louvis, P. Fox, C. J. Sutcliffe, “Selective Laser Melting of Aluminium Components”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 211, pp. 275-284, 2011.
- [40] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, and S. L. Sing, “Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications”, Applied Physics Reviews, vol. 2, pp. 1-21, 2015.
- [41] S. Saunders, “EBM vs DMLS 3D Printing: Which Method and Surface is the Best for Titanium 3D Printed Implants?”, 3DPrint.com, Jun. 30, 2017. [Online]. Available: <https://3dprint.com/179579/ebm-dmls-3d-printed-implants/>. [Accessed Sept. 12, 2019].
- [42] K. M. Taminger, and R. A. Hafley, “Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing”, NATO, AVT-139. EBF3 for Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing, 2006.
- [43] L. E. Murr, “Metallurgy of Additive Manufacturing: Examples From Electron Beam Melting”, Additive Manufacturing, vol. 5, pp. 40-53, 2015.
- [44] L. E. Murr, S. M. Gaytan, D. A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K. N. Amato, P. W. Shindo, F. R. Medina, R. B. Wicker, “Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies”, Journal of Materials Science and Technologies, vol. 28, pp. 1-14, 2012.
- [45] Laser Metal Deposition Defined, Nov. 1, 2010. [Online]. Available: <https://www.industrial-lasers.com/surface-treatment/article/16485094/laser-metal-deposition-defined>. [Accessed Nov. 15, 2019].
- [46] G. Turichin, and O. K. Korsmik, “Theory and Technology of Direct Laser Deposition” in Additive Manufacturing of High-Performance Metals and Alloys, I. Shishkovsky, Intechopen, 2018, pp. 71-88.
- [47] G. Backes, I. Kelbassa, A. Weisheit, and K. Wissenbach, “Laser Metal Deposition (LMD) and Selective Laser Melting (SLM) in Turbo-Engine Applications”, Laser Material Processing, vol. 4, no. 2, pp. 58-63, 2010.
- [48] C. Selçuk, “Laser Metal Deposition for Powder Metallurgy Parts”, Powder Metallurgy, vol. 54, pp. 94-99, 2011.
- [49] A. Uriondo, M. E. Miguez, and S. Perinpanayagam, “The Present and Future of Additive Manufacturing in the Aerospace Sector: A Review of Important Aspects”, Journal of Aerospace Engineering, pp. 1-16, 2015.
- [50] S. Singamneni, Y. Lv, A. Hewitt, R. Chalk, W. Thomas, and D. Jordison, “Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review”, Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering, vol. 8, no.1, pp. 1-13, 2019.
- [51] Ö. Poyraz, and M. C. Kuşhan, “Havacılık Komponentlerinin Bakım Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanımı” Mühendis ve Makine, vol. 59, no. 691, pp. 59-69, 2018.
- [52] M. Attaran, “The Rise of 3D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing”, Business Horizons, vol. 60, pp. 677-688, 2017.
- [53] R. Leal, F. M. Barreiros, L. Alves, F. Romeiro, J. C. Vasco, M. Santos, and C. Marto, “Additive Manufacturing Tooling for the Automotive Industry”, International Journal of Manufacturing Technology, vol. 92, pp. 1671-1676, 2017.
- [54] C. A. Giffi, B. Gangula, and P. Illinda, “3D Opportunity in the Automotive Industry”, Additive Manufacturing Hits the Road, NY, USA: Deloitte University Press, 2014.
- [55] S. G. Sarvankar, and S. N. Yewale, “Additive Manufacturing in Automobile Industry”, International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering, vol. 7, pp. 1-10, 2019.
- [56] B. Kandasubramanian, and A. Prasad, “Fused Deposition Processing Polycaprolactone of Composites for Biomedical Applications”, Polymer-Plastic Technology and Materials, vol. 58, no. 13, pp. 1365-1398, 2019.
- [57] J. Hornick, “3D Printing in Healthcare”, Journal of 3D Printing in Medicine, vol. 1, no. 1, pp. 13-17, 2017.
- [58] M. R. Salvador, and L. A. G. Garcia, “Additive Manufacturing in Healthcare”, Foresight and Sti Governance, vol. 12, no. 1, pp. 47-55, 2018.
- [59] I. Gibson, and A. Srinath, “Simplifying Medical Additive Manufacturing: Making the Surgeon the Designer”, Procedia Technology, vol. 20, pp. 237-242, 2015.
- [60] M. Ramola, V. Yadav, and R. Jain, “On the adoption of Additive Manufacturing in Healthcare: A Literature Review”, Journal of Manufacturing Technology Management, vol. 30, pp. 48-69, 2019.
- [61] J. Gardan, “Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends”, International Journal of Production Research, vol. 54, no. 10, pp. 3118-3132, 2016.

- [62] M. Cotteler, and J. Crane, "3D Opportunity in Tooling, Additive Manufacturing Shapes the Future" April 07, 2014. [Online], Available: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-tooling.html>. [Accessed Dec. 01, 2019].
- [63] A. Can, and İ. Aslan, "Katmanlı Üretim ile Elde Edilmiş Kum Döküm Kalıpların İncelenmesi", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 6, pp. 1269-1282, 2018.
- [64] D. S. Engstorm, B. Porter, M. Pacios, and H. Bhaskaran, "Additive Manufacturing-A Review", Journal of Materials Research, vol. 29, no. 17, pp. 1792-1816, 2014.
- [65] O. S. Ivanova, C. B. Williams, and T. A. Campbell, "Additive Manufacturing (AM) and Nanotechnology: Promises and Challenges", Rapid Prototyping Journal, vol. 19, pp. 353-364, 2013.
- [66] N. Guo, and M. C. Leu, "Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs", Frontiers of Mechanical Engineering, vol. 8, no. 3, pp. 215-243, 2013.
- [67] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzino, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges", Composites Part B, vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [68] A. Hernandez, and K. V. Wong, "A Review of Additive Manufacturing", ISRN Mechanical Engineering, vol. 2012, pp. 1-10, 2012.
- [69] B. Lu, D. Li, and X. Tian, "Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing", Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 85-89, 2015.
- [70] R. Jiang, R. Kleer, and F. T. Piller, "Predicting the Future of Additive Manufacturing: A Delphi Study on Economic and Societal Implications of 3D Printing for 2030", Technological Forecasting & Social Change, vol. 117, pp. 84-97, 2017.
- [71] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. L. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang, and P. D. Zavaretti, "The Status, Challenges and Future of Additive Manufacturing in Engineering" Computer-Aided Design, vol. 69, pp. 65-89, 2015.
- [72] B. Berman, "3D Printing: The New Industrial Revolution", Business Horizon, vol. 55, pp. 155-162, 2012.
- [73] C. Klahn, B. Leutenecker, and M. Meboldt, "Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing", Procedia CIRP, vol. 36, pp. 230-235, 2015.
- [74] S. Genç, "Sanayi 4.0 Yolunda Türkiye", Sosyoekonomi, vol. 26, no. 36, pp. 235-243, 2018.

