



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Havuz Fotopolimerizasyonu (HFP) ile Eklemeli İmalat

 Ümit Gencay BAŞCI^{a,*},  Rıdvan YAMANOĞLU^a

^a Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: umitbasci72@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.922415

ÖZ

Eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan havuz fotopolimerizasyonu (HFP) sahip olduğu birçok avantaj nedeniyle hızla yaygınlaşmaktadır. İlk keşfedilen eklemeli imalat yöntemi olan SL (Stereolitography) keşfedildiği yıllarda prototip imalatı ve ürün geliştirme amaçlı kullanılmaktaydı. Sonraki yıllarda DLP (Digital Light Processing) ve CLIP (Continuous Light Interphase Printing) teknolojilerinin geliştirilmesi ile az adetli uygulamalara yönelik plastik parça imalatında da kullanılmaya başlamıştır. HFP teknolojileri diğer plastik eklemeli imalat teknolojilerine göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek boyutsal hassasiyet sunmaktadır. HFP teknolojilerinin kompleks parçaların direkt imalatına izin vermesi, havacılık, otomotiv, sağlık, dişçilik, kuyumculuk gibi alanlarda kullanımlarını yaygınlaştırmaktadır. Uygulamaya özel geliştirilmiş malzemelerin kullanımı ile HFP teknolojileri hassas döküm, üretime yardımcı ekipmanlar, ortodonti diş kalıpları ve implant delme aparatları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. SL teknolojisinin ticari patentinin geçerliliğini yitirmesi ile açık kaynak kodlu ucuz masa üstü yazıcılar piyasaya sürülmüştür. Bu sayede HFP teknolojisi evlerimize kadar girmiştir. Bu çalışmada HFP teknolojileri ve kullanım alanları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Havuz fotopolimerizasyonu, SLA, DLP, CLIP

Additive Manufacturing via Vat Photopolymerization

ABSTRACT

Vat photopolymerization (VP), one of the additive manufacturing technologies, is spreading rapidly due to its many advantages. SL (Stereolitography) technology as the first manufacturing method has been used for prototyping and new product development. In the following years, with the development of DLP (Digital Light Processing) and CLIP (Continuous Light Interphase Printing) technologies, it has been started to be used in the production of plastic parts for low volume applications. VP technologies provides lower roughness, better dimensional accuracy than other plastic additive manufacturing methods. The fact that VP technologies allow direct manufacturing of complex parts makes their usage widespread in areas such as aviation, automotive, healthcare, dentistry and jewellery. With the use of materials specially developed for the application, VP technologies are used in areas such as lost wax casting, rapid tooling, orthodontic molds and drilling guides. Open source cheap desktop 3D printers has been introduced to the market after the commercial patent of SL technologies expires. In this way, VP technologies has entered our homes. In this study, detailed information about VP technologies and their application areas has been revealed.

Keywords: Additive manufacturing, Vat Photopolymerization, SLA, DLP, CLIP

I. GİRİŞ

Son yıllarda üretici firmalar, hızlı pazar koşulları ve rekabetin karşılanabilmesi için, ürün geliştirme süreçlerini kısaltmak ve farklı ürünleri piyasaya sürmek zorunda kalmaktadır. Ürün geliştirme ve üretim süreçlerinin kısaltılması konvansiyonel imalat teknolojilerinden daha hızlı teknolojiler ve üretimi hızlandırıcı yardımcı ekipmanların kullanımı ile mümkün olmaktadır. Bu bağlamda firmalar tarafından, tasarımdan direkt parça imalatına izin veren eklemeli imalat teknolojilerinin ürün geliştirme süreçlerinde kullanılmaları kaçınılmaz hale gelmektedir [1]. Üç boyutlu baskı (3DP) olarak da bilinen eklemeli imalat, parçaların tabaka tabaka imalatına izin veren bir teknolojidir [2]. Eklemeli imalat, konvansiyonel üretim teknolojileri ile (Enjeksiyon kalıplama, döküm, dövme ve talaşlı imalat gibi) imal edilemeyecek kompleks parçaların imalatına izin verdiği için birçok sektörde ürün geliştirme süreçlerinde ve az adetli parçaların imalatında kullanılmaktadır. Eklemeli imalat konusundaki uzmanların yaptıkları tahminlere göre; eklemeli imalata senelik olarak yapılan yatırımların 2030 yılına kadar bir trilyon \$'a yaklaşacağı düşünülmektedir. Malzeme ve makine sektöründeki hızlı gelişmeler ile birlikte eklemeli imalat, havacılık, otomotiv, savunma, yiyecek, doku mühendisliği ve elektronik gibi alanlarda kullanım alanı bulmaktadır. Eklemeli imalat sayesinde seramik, metal, plastik ve mum parçaların imalatı mümkün olmaktadır [3].

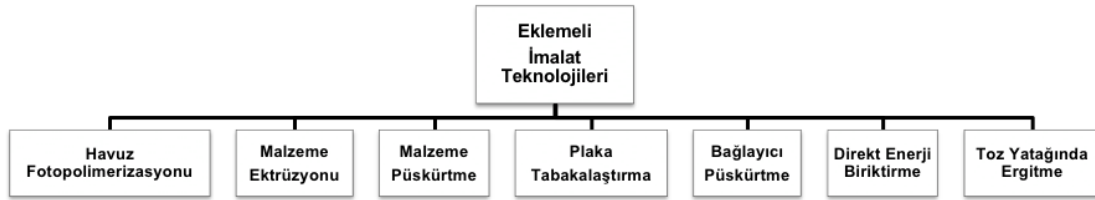
Eklemeli imalat, az adetli parçaların imalatı, kişiye özel imalat, tasarım serbestliği ve montajlı parçaların tek parça olarak imalatına izin vermesinden dolayı parça performansını arttırmakta ve üretim maliyetlerini düşürmektedir. Eklemeli imalat ayrıca, çevreye saygılı bir teknolojidir ve kullanımının yaygınlaşması ile 2025 yılı itibari ile toplam karbon dioksit emisyon miktarında senelik olarak 525,5 tonluk bir tasarruf sağlanacağı tahmin edilmektedir. Bu teknolojinin ürün geliştirme süreçlerinde kullanımı parça maliyetlerinde %70 ve yeni ürünün pazara çıkış sürelerinde %90 kazanç sağlamaktadır. Sağladığı bir çok avantaj nedeniyle eklemeli imalat pazarının ortalama senelik büyümesinin yaklaşık %22 olduğu düşünülmektedir [4]. World Intellectual Property Organization (Dünya Fikri Haklar Örgütü) uzmanlarına göre üç boyutlu baskı tekniklerinin ilk uygulaması, 19' uncu yüzyılda fotoğraftan heykel yapma çalışmalarına dayanmaktadır. İlk üç boyutlu objenin üretimi üzerine özel bilgisayar programlarının kullanımı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. İlk fonksiyonel üç boyutlu baskı tekniğinin Nagoya Municipal Endüstriyel Araştırma Enstitüsü'nde uygulandığı Japon bilim adamı Hideo Kodama tarafından bildirilmiştir. Eklemeli imalat teknolojileri, 1980'li yıllardan beri kullanılmaktadır[5]. Teknolojinin ilk gelişim evrelerinde üretilen parçalar fonksiyonel olmayan kavramsal prototip uygulamalarında kullanılmaktaydı [6, 7]. Geliştirilen ilk eklemeli imalat teknolojisi ışığa duyarlı sıvı reçine tabakasının UV (Ultraviolet)-lazer ile katılaştırılma tekniğine dayalı olan SL (Stereolitography) tekniğidir. Daha sonraki yıllarda FDM (Fused Deposition Modelling), SLS (Selective Laser Sintering), LOM (Laminated Object Manufacturing), Inkjet Printing (3DP) ve LAM (Laser Additive Manufacturing) gibi birçok yeni teknoloji ortaya çıkmıştır [8, 9]. SL teknolojisinin yaygınlaşmasından sonra, aynı üretim tekniğine bağlı olarak DLP (Digital Light Processing), DPP (Daylight Polymer Printing) ve Continuous Light Interphase Printing (CLIP) teknolojileri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır [10]. Sıvı reçineden polimerizasyon ile fiziksel parçanın imalatına dayalı bu teknolojilerinin hepsinde sıvı reçine havuzunda üretim yapıldığı için, Havuz Fotopolimerizasyonu (VP, Vat Photopolimerization) ismi verilmektedir. Havuz fotopolimerizasyonu (HFP) teknolojileri, FDM ve SLS gibi diğer eklemeli imalat teknolojilerine göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek boyutsal hassasiyet gibi avantajlar sunmasından dolayı görsel prototip, silikon kalıplama, imalata yardımcı ekipmanlar ve az adetli plastik parça uygulamalarında tercih edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olması parça imalatı sonrası zımparalama ve parlatma işlemlerindeki işçilik maliyetlerini de düşürmektedir [3]. Son yıllarda yeni malzemelerin geliştirilmesi ile enjeksiyon kalıplama ile şekillendirilebilen ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) ve PP (Polypropylene) gibi mühendislik malzemelerine benzer mukavemet ve ısı dayanımına sahip, PE (Polyethylene) ve PMMA (Polymethyl methacrylate) gibi sterilize edilebilen ve hassas döküm ile metal parça imalatında master model olarak kullanılacak kalıp pişirme prosesi sırasında az miktarda kül bırakan parçalar üretilebilmektedir. Kullanıma uygun malzeme çeşitliliğinin artırılması ile HFP teknolojileri son yıllarda son kullanıma uygun az adetli parça imalatlarında kullanılmaya başlamıştır. Bu uygulamanın en çarpıcı

örneği Adidas'ın Carbon3D firması ile ortaklaşa koşucular için geliştirdiği kompleks ayakkabı tabanı tasarımının HFP teknolojisi ile imal edilmesi ve perakende olarak satılmasıdır [11].

Yukarıda bahsedilen avantajları nedeniyle yaygınlaşmaya başlayan HFP teknolojisi, yakın gelecekte akıllı fabrikaların temel imalat teknolojilerinden birisi olma olasılığını arttırmaktadır. Akıllı fabrikalarda HFP teknolojilerinin kullanımı, tasarım serbestliğine sahip akıllı ürünlerin daha düşük maliyetler ile üretilebilmesi ve hayatımızın daha kolaylaşması anlamına gelmektedir.

II. EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ

Eklemeli imalat, üç boyutlu tasarımdan yola çıkarak malzemenin tabaka tabaka eklenmesi yoluyla, fiziksel parçanın imal edilmesine dayalı üretim teknolojilerine verilen genel isimdir [12]. Eklemeli imalat teknolojileri International Organization for Standardization (ISO)/American Society for Testing and Materials (ASTM) 52900:2015'e göre yedi sınıfa ayrılmaktadır [13]. Bu sınıflandırma Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması [13].

Yukarıda yedi sınıfa ayrılmış olan eklemeli imalat teknolojileri, kullanılmış oldukları malzemelere göre; polimer, metal, seramik ve mum eklemeli imalat yöntemleri olarak da sınıflandırılmaktadır [14]. Eklemeli imalat teknolojilerinin konvansiyonel imalat teknolojilerine göre birçoğ avantajları mevcuttur. Bu avantajlarından bazıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir [6, 13].

- Tasarımın doğrudan imal edilebilmesi
- Kompleks iç yapılaraya sahip parçaların üretilebilmesi
- Kalıp, fikstür gibi üretime yardımcı elemanlara ihtiyaç duyulmaması
- Montaj gerektiren parçaların tek parça halinde üretilebilmesi
- Farklı malzemelerin tek bir parçanın farklı bölümlerinin üretiminde kullanımına izin vermesi
- İçi boş hafif parçaların imal edilebilmesi
- Talaşlı imalat yöntemlerine göre daha az malzeme kullanımı
- Ürün geliştirme sürelerinin kısaltılabilmesi
- Konvansiyonel yöntemlere göre daha düşük üretim alanına ihtiyaç duyulması
- Talep anında üretimin yapılabilmesi
- Stok maliyetlerinin düşürülmesi

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanında, aşağıda belirtilmiş olan dezavantajları da mevcuttur;

- Seri imalat yöntemlerine göre üretim maliyeti yüksektir
- Eklemeli imalat teknolojisine uygun malzemeler ile imalat yapılması gerekli olduğundan renk, malzeme ve yüzey işlem seçenekleri sınırlıdır
- Diğer imalat yöntemlerine göre toleransları düşüktür. Üretim sonrası parça için ek işlem gerekebilir (Örneğin, talaşlı imalat, parlatma ve boya vb.) [14, 15].

A. HAVUZ FOTOPOLİMERİZASYONU (HFP)

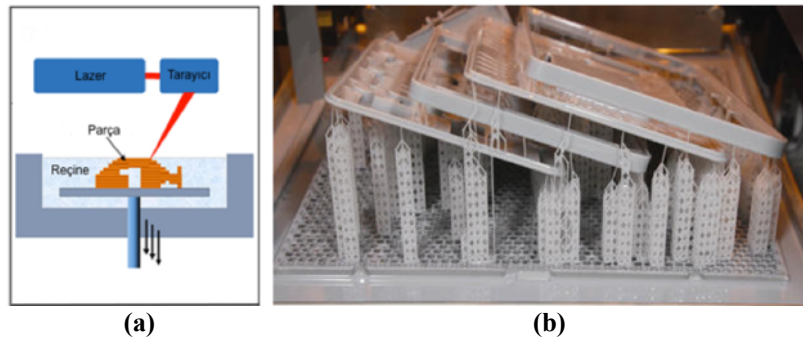
Havuz fotopolimerizasyonu (HFP), belirli bir dalga boyuna sahip ışık kaynağı ile polimerize olabilen sıvı reçinenin, lazer ya da UV ışık kaynağı kullanılarak, üç boyutlu datanın iki boyutlu kesitine göre

hareket ettirilmesi ile tabaka tabaka fiziksel parçanın imalatına dayanan bir teknolojidir. Havuz fotopolimerizasyonu ilk kez 1984 yılında Charles W. Hull tarafından keşfedilmiştir. Bu dönemde kendisi tarafından keşfedilen yöntem Stereolitography (SL) ismi verilmiştir. 3D Systems tarafından üretilen üç boyutlu yazıcılar Stereolitography Aparatüsü (SLA) ismi ile 1987 yılında ticarileşmişlerdir [16]. SL teknolojisinde parça imalatının yapılması için belirli üretim sürecinin takip edilmesi gerekmektedir. SL parça imalat süreci Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. SL parça imalat süreci.

Şekil 2’den de görüldüğü gibi SL teknolojisinde parça imalatı için öncelikle herhangi bir üç boyutlu tasarım programında hazırlanmış olan CAD data yazıcı imalat hazırlama programına STL data olarak aktarılır. STL data tüm eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan data formatıdır. STL data, üçgenler tarafından tanımlanan yüzeylerden oluştuğu için üç boyutlu datanın uygun şekilde bu formata çevrilmesi gerekmektedir. STL datalar makine programında üretilecekleri miktar kadar çoğaltılır ve platforma uygun oryantasyonda konumlandırılır. Dizim sonrası parçanın üretim sırasında desteklenmesi gereken bölgelerine destek (support) yapıları verilir. Destek verme işlemi sonrasında üretimde kullanılacak olan katman kalınlığına göre (0,25, 0,50, 0,10, 0,15 mm) parça ve destek yapısı aşağıdan yukarı doğru katmanlarına ayrılır. Katmanlara ayrılmış iki boyutlu geometri makine üretim programı tarafından X, Y ve Z makine koordinatlarına göre NC (Numerical Control) kodlarına çevrilir. Seçilen katman kalınlığına göre hareket eden platform üzerinde parça kesitine göre hareket eden lazer ışını sıvı reçineyi polimerize ederek katılaştırır. Sonrasında yeni bir katman için üretim platformu sıvı reçine içine batar ve yukarı doğru çıkarak üzerine katman kalınlığı kadar reçine alır. Reçine yayıcısı (Recoater) parça üzerindeki fazla reçineyi ve reçine yüzeyindeki hava kabarcıklarını vakumlama yolu ile parça yüzeyinde hareket ederek alır ve yeni serilen katmanın istenilen katman kalınlığında olmasını sağlar. Reçine yayma işlemi sonrasında yeni katmana göre lazer ışını geometrik olarak hareket ederek parça kesitini polimerize eder. Üretim işlemi, aynı şekilde tekrarlanarak tüm katmanların imalatı tamamlanana kadar devam eder. Üretim sonrası parça yüzeyinde kalan fazla reçine ve destek yapısı aseton veya alkol ile temizlenir. Temizleme sonrası üretilen parçalar mukavemetlerinin artırılması için UV lamba altında belirli bir süre kürlenir. Kürlenme sonrası elde edilen plastik parçalar, uygulamaya göre zımpara, parlatma, boya ve kaplama işlemlerine tabi tutulabilir [17]. Şekil 3’de SL sisteminin şematik gösterimi ve üretimi bitmiş parçalar gösterilmektedir [3].



Şekil 3. SL sistemi a) Yöntemin şematik görüntüsü [3] b) Bu yöntemle üretilmiş örnek parçalar [18].

SL sisteminde Şekil 3a’da görüldüğü gibi parça, fotopolimerik bir reçine ile dolu hazne içerisindeki platform üzerinde imal edilmektedir. Sistemin üst tarafına konumlandırılmış olan lazer ve lazer tarama sistemi ile lazer ışını, üretilecek parça katmanına göre yönlendirilir. Lazer tarafından polimerize olan sıvı tabakası katılarak alttaki katmana bağlanıp, CAD datanın, polimerik malzemeden imalatı sağlanır. İmalat bitiminde üretim platformu otomatik olarak hazne içerisinden çıkarak fazla reçinenin platform altındaki hazneye süzülmesi sağlanır (Şekil 3b) [3]. SL teknolojisinde çok farklı polimerik

malzemeler kullanılmaktadır. 3D Systems tarafından pazara sunulan Accura SL malzemeleri Tablo 1’de verilmiştir [19].

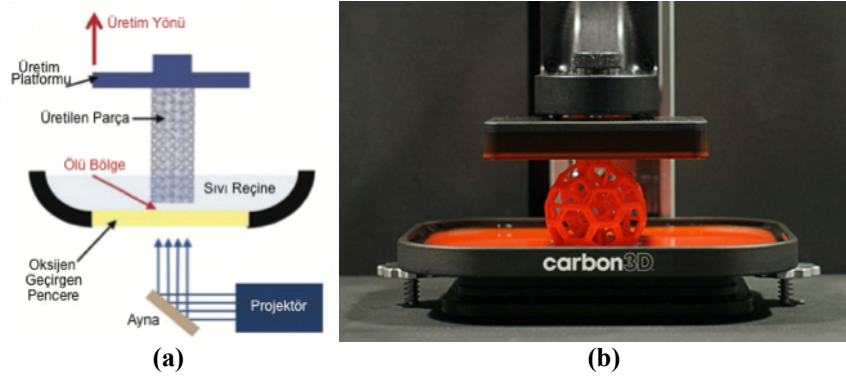
Tablo 1. SL teknolojisinde kullanılan malzemelerin özellikleri [19].

| Malzeme Adı | Çekme Mukavemeti (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) | Uzama (%) | Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C) | Sertlik (Shore D) | Kullanım Alanı |
|-----------------|------------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|-------------------|---|
| SL C-Y 9300 | 45 | 1315 | 7 | 52 | 75 | <ul style="list-style-type: none"> • Şeffaf • Sterilize edilebilir |
| SL 5530 | 57-63 | 2854-3310 | 2,7-4,4 | 82 | 88 | <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek mukavemet • Suya karşı dayanı • Elektrik uygulamaları • Sıcaklık dayanımı |
| PP White | 40-42 | 2030-2230 | 7-13 | 56 | 86 | <ul style="list-style-type: none"> • Esnek • Montaj uygulamaları • Silikon kalıplama • Fonksiyonel prototip |
| ClearVue | 38-42 | 1940-2250 | 10-22 | 56 | 86 | <ul style="list-style-type: none"> • Mukavemetli • Fonksiyonel prototip • Az adetli imalat |
| ABS White | 46-48 | 2290-2400 | 8-14 | 63 | 86 | <ul style="list-style-type: none"> • Mukavemetli • Fonksiyonel prototip • Az adetli imalat |
| ABS Black | 45-47 | 1890-2440 | 6-13 | 62 | 86 | <ul style="list-style-type: none"> • Mukavemetli • Fonksiyonel prototip • Az adetli imalatı |
| Accura Xtreme | 41 | 1890 | 18 | 52 | 86 | <ul style="list-style-type: none"> • Mukavemetli • Fonksiyonel prototip |
| Accura Sapphire | 20-24 | 910-1110 | 9-16 | 51 | 72 | <ul style="list-style-type: none"> • Hassas döküm |
| Accura Peak | 57-78 | 4220-4790 | 1,3-2,5 | 85-90 | 86 | <ul style="list-style-type: none"> • Isı dayanımı • Yüksek mukavemet • Nem dayanımı |

Tablo 1’de ürün geliştirme, otomotiv, beyaz eşya, sağlık sektörlerinde kullanılacak fonksiyonel parçaların imalatı için geliştirilmiş sıvı fotopolimerik malzemelerin listesi verilmiştir. Accura ABS White/Black, Accura PP White genel amaçlı prototip üretimi için geliştirilmişken, Accura ClearVue ve Accura SL C-Y 9300 şeffaf prototipler için kullanılmaktadır. Accura SL 5530, Accura Xtreme ve Accura Peak yüksek mukavemet, ısı ve nem dayanımına ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmaktadır [19].

SL sisteminin ardından havuz fotopolimerizasyonu teknolojisinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda Digital Light Processing (DLP), Continuous Light Interphase Printing (CLIP) ve Daylight Photo Polymerization (DPP) teknolojileri geliştirilmiştir. DPP teknolojisinde fotopolimerizasyon için LCD ekran kullanılmaktadır. LCD ekranın kürlenecek alana göre ışık vermesi ile ışık gören bölge katı faza geçmekte bu sayede fiziksel parça imalatı yapılabilmektedir. LCD ekranın çözünürlük miktarına göre de üretim haznesinin büyüklüğü ve parça hassasiyeti değişmektedir. DPP teknolojisine sahip 3D printerlar ucuz ve çözünürlükleri yüksek olmakla birlikte LCD ekranların kullanım ömürleri düşük olduğundan diğer teknolojilere nazaran kısa sürede değiştirilmesi gereklidir [19]. DLP teknolojisinde ise fotopolimerizasyon için projektör kullanılmaktadır. DLP teknolojisinde kullanılan çip, 1977 yılında Dr. Larry Hornback tarafından keşfedilmiş ve 1996 yılında Texas Instruments tarafından ticari hale getirilmiştir. CLIP, DLP ve DPP teknolojileri birbirlerine benzer teknolojilerdir. CLIP teknolojisi mart 2015 de Carbon 3D şirketi tarafından geliştirilmiştir. CLIP

teknolojisinde DLP den farklı olarak hazne yüzeyi ile parça yüzeyi arasındaki yapışmayı engelleyen oksijen geçirgen pencere bulunmaktadır. Bu sayede parçaların SL teknolojisine göre 100 kat daha hızlı imal edilmesi mümkün olmaktadır. [20]. CLIP teknolojisinin şematik gösterimi Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. CLIP teknolojisi a) Şematik gösterimi b) Parça üretimi [21].

SL teknolojisinden farklı olarak DLP ve CLIP teknolojilerinde platform ters çalışmakta ve katmanlarına ayrılmış CAD datanın her bir katmanı iki boyutlu siyah beyaz resim olarak hazırlanmakta ve sırası ile makineye gönderilmektedir. Alt tarafında ışık geçirgen film olan sıvı reçine ile dolu haznenin hemen altında belirli bir dalga boyunda ışık sağlayan projektör bulunmaktadır. Katmana göre ışık gönderen projektör aynı anda tüm kesiti polimerize edebilmektedir. Polimerizasyon işlemi tamamlandıktan sonra platform yukarı ve aşağı doğru hareket ederek yeni bir katman için hazırlanır. Yeni katman tekrardan projeksiyon tarafından gönderilen ışık ile polimerize edilerek üretime devam edilir. Polimerizasyon süresi reçinenin aktivasyon enerjisine ve projektörün gücüne bağlı olarak değişmektedir. CLIP, DLP ve DPP sistemlerinde katman komple fotopolimerize edildiğinden lazer ile sıvı reçinenin taranması esasına dayanan SL sistemlere göre çok daha hızlı imalat yapılabilir. Fakat DLP projektörlerin ve LCD ekran çözünürlükleri çok küçük alanlarda yüksek olduğundan genellikle CLIP, DLP ve DPP üretim alanları SL sistemlere göre çok daha sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle SL sistemlerinde büyük parçalar imal edilirken, CLIP, DLP ve DPP sistemlerde daha küçük ve daha detaylı parçalar imal edilebilmektedir. SL sistemlerde üretim yapabilmek için reçine haznesinin tamamen doldurulması gereklidir. Reçine viskozitesi zamanla arttığından makine haznesi içerisindeki reçinenin belirli bir süre sonra yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. DLP, CLIP ve DPP sistemlerinde ise sadece üretim yapılacak parça hacmi kadar reçine sisteme yüklendiğinden işletme maliyetleri SL sistemlerine göre daha düşüktür [3, 22].

CLIP teknolojisi için, ürün geliştirme, otomotiv, sağlık, dişçilik, kuyumculuk ve modelleme alanlarında kullanılmak üzere çok farklı özelliklere sahip olan fotopolimerik malzemeler geliştirilmiştir. Bu teknolojiye parça imalatında kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2’de verilmiştir [23].

Tablo 2. CLIP teknolojisinde kullanılan malzemelerin özellikleri [23].

| Malzeme Adı | Çekme Mukavemeti (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) | Uzama (%) | Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C) | Sertlik (Shore A/D) | Kullanım Alanı |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|---------------------|--|
| Loctite 3D IND405 Clear | 42 | 1500 | 120 | 53 | 75 D | <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek uzama ve tokluk • Üretime yardımcı ekipman • Polypropylen özellikli |
| EPX 82 | 80 | 2800 | 5 | 130 | 88 D | <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek mukavemet • Otomotiv ve endüstriyel uygulamalar |
| RPU 70 | 40 | 1700 | 100 | 60 | 80 D | <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek mukavemet ve tokluk • Isı dayanımı |

Tablo 2. (devam) CLIP teknolojisinde kullanılan malzemelerin özellikleri [23].

| | | | | | | |
|----------------|-----|------|-----|-----|------|--|
| RPU 130 | 35 | 900 | 100 | 120 | 77 D | <ul style="list-style-type: none">• Polyurethane özellikli• Mukavemet ve darbe dayanımı• Sıcaklık dayanımı |
| MPU100 | 35 | 1200 | 25 | 50 | 81 D | <ul style="list-style-type: none">• Mukavemet• Biyo uyumluluk• Sterilize edilebilir |
| CE 221 | 85 | 3900 | 3 | 230 | 92 D | <ul style="list-style-type: none">• Yüksek mukavemet ve tokluk• Yüksek sıcaklık dayanımı |
| Fotodent Cast | 100 | 2000 | 7,5 | - | - | <ul style="list-style-type: none">• Hassas döküm için master model üretimi |
| Fotodent IBT | - | - | - | - | 80 A | <ul style="list-style-type: none">• Yumuşak ve esnek• Diş ortodonti kalıpları |
| Surgical Guide | 90 | 1700 | 10 | - | - | <ul style="list-style-type: none">• Ameliyata yardımcı ekipmanların imalatı• Şeffaf ve biyo uyumlu |

Tablo 2’de verilmiş olan CLIP teknolojisinde kullanılan malzemeler incelendiğinde EPX 82 ve CE 221 mukavemet ve sıcaklık gereksinimi olan uygulamalarda, MPU 100, FOTODENT IBT ve SURGICAL GUIDE biyo uyumlu ve sterilize edilebilen uygulamalarda kullanılan malzemelerdir. FOTODENT CAST ise diş köprülerinin hassas dökümünde kullanılan master modellerin üretimine uygun bir malzemedir [23].

1991 yılında SL teknolojisi için Charles W. Hull ve arkadaşları tarafından US5137662A nolu patent alınmıştır. Bu teknolojinin ticari olarak kullanım hakkı 3D Systems’e aittir [24]. Zamanla SL teknoloji patenti geçerliliğini yitirmiş ve açık kaynak kodlu ucuz SL, DLP ve DPP yazıcılar piyasaya sürülmüştür. Bu sayede ucuz HFP teknolojisine sahip olan yazıcılar evlere kadar girmiştir [22]. Günümüzde Formlabs, Anycubic Photon, Wanhao Duplicator, Micromake L2, Flash Forge Hunter DLP, Kudo 3D Titan 2 HR, Sprint Ray, Moon Ray S, B9 Core 530, Asiga Max ve Zortrax Inkspire marka ucuz DPP teknolojisine sahip yazıcılar ve malzemeleri günümüzde satışa sunulmuştur. Bu cihazlar ile üretilen parçaların kaliteleri, düşük fiyatlarına göre makul seviyelerdedir [25]. DPP teknolojisinde kullanılan malzemeler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

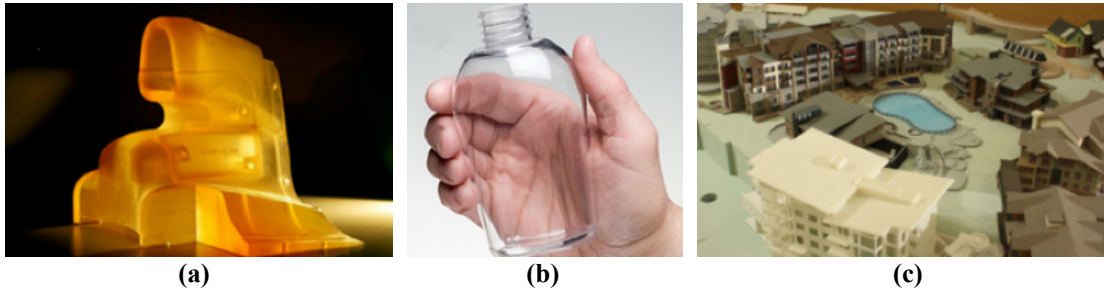
Tablo 3. DPP teknolojisinde kullanılan malzemelerin özellikleri [26].

| Malzeme Adı | Çekme Mukavemeti (MPa) | Elastisite Modülü (MPa) | Uzama (%) | Sertlik (Shore A/D) | Kullanım Alanı |
|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------|---------------------|--|
| Trough Clear | 65,3 | 771,3 | 10,4 | 90 D | <ul style="list-style-type: none">• Şeffaf parça üretimi• Üretime yardımcı ekipman• Kavramsal prototipleme |
| Resin Dough | 52,5 | 674,8 | 16,8 | 82 D | <ul style="list-style-type: none">• Fonksiyonel parçalar• Üretime yardımcı ekipman |
| Crown & Bridge Resin | 140 | - | 3,5 | 90 D | <ul style="list-style-type: none">• Geçici diş ve köprü imalatı |
| Dental Model Resin | 30,3 | 993 | 4,6 | 80 D | <ul style="list-style-type: none">• Diş model imalatı |
| Blue Cast Resin | - | - | - | 80 D | <ul style="list-style-type: none">• Dökülebilir parça imalatı• Kuyumculuk ve döküm için model imalatı |

Tablo 3 incelendiğinde DPP teknolojisinin kullanılması ile şeffaf, mukavemetli ve son kullanıma uygun parçalar imal edilebilmektedir. Özellikle dişçilikte diş modellerinin ve geçici köprülerin yapımında bu teknoloji tercih edilmektedir. Dökülebilir reçinelerin kullanımı ile DPP teknolojisi ile kuyumculuk ve dişçilik sektörü için parçalar üretilmekte ve sonrasında hassas döküm ile metal parçalar elde edilebilmektedir. Bu sayede uzun zaman alan kalıp üretimi ortadan kaldırılabilir. SL, DLP, CLIP ve DPP tekniklerinin hepsi havuz fotopolimerizasyonuna dayalı eklemeli imalat teknolojileri olmalarına rağmen birçok avantaj ve dezavantajlara sahiptir. SL teknolojisinde kütleme lazer ışığı ile yapıldığından üretim hızı lazer tarama hızına bağlıdır. Bu nedenle diğer HFP yöntemlerine göre daha yavaş imalat yapmaktadır. Bunun yanı sıra diğer imalat yöntemlerine göre daha büyük parçaların imalatına izin vermektedir. CLIP, DLP ve DPP teknolojilerinde kütleme direkt kesite belirli dalga boyunda ışık gönderimi ile yapıldığından SL teknolojisine göre çok daha hızlı imalat yapılabilir. DLP ve CLIP teknolojilerinde pahalı projektörler kullanıldığından cihazların ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Pahalı olmalarına rağmen, SL teknolojisine göre daha yüksek çözünürlükte ve hassasiyette parçalar imal edilebilmektedir. DLP ve CLIP teknolojisine göre daha ucuz LCD teknolojisi kullanan DPP teknolojisi ise, CLIP ve DLP ye göre çok daha ucuz fakat çözünürlükleri ve hassasiyetleri daha düşük parça imalatına izin vermektedir. DLP, CLIP ve DPP teknolojilerinin SL teknolojisine göre diğer bir avantajı; üretimin aşağıdan yukarı yapılması nedeniyle sadece üretim hacmi kadar reçine ihtiyaç duymalarıdır. SL teknolojisinde ise üretim için çok daha yüksek miktarlarda reçineye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle CLIP, DLP ve DPP teknolojilerinin üretim maliyetleri SL teknolojisine göre daha düşüktür [19].

A. 1. Havuz Fotopolimerizasyonu (HFP) Teknolojisinin Kullanım Alanları

SL, DLP ve CLIP teknolojilerinin genel ismi olan havuz fotopolimerizasyonu (HFP), hızlı prototipleme ve ürün geliştirme alanları dışında son yıllarda az adetli plastik parçaların imalatında da kullanılmaya başlamıştır. Özellikle otomotiv, havacılık, endüstriyel tasarım, beyaz eşya gibi uygulamalarda ürün geliştirme sürelerinin kısaltılması ve kullanıcı geri bildirimlerinin alınabilmesi amacıyla prototip ürün imalatlarında tercih edilmektedir. Şekil 5’de HFP teknolojisi ile ürün geliştirme amaçlı kullanılan prototip örnekleri verilmektedir.

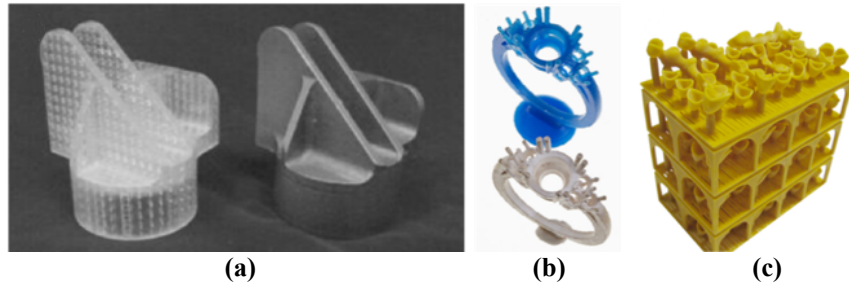


Şekil 5. HFP teknolojisi ile üretilmiş prototipler a) Formula 1 prototipi [27] b) Şişe prototipi [28] c) Mimari prototipler [29]

Şekil 5a’ da Formula 1 yarışları için geliştirilen yarış arabası parçasının rüzgar tüneli testi için üretilmiş prototipi verilmiştir. Bu yöntemle, rüzgar tüneli testlerine göre sürtünme katsayısı hesaplanarak en düşük rüzgar direncine sahip olan tasarımın belirlenmesi kısa sürelerde yapılabilir. Bu sayede ürün geliştirme süreleri kısaltılabilmekte ve ürün geliştirme maliyetleri minimum seviyeye indirilebilmektedir [27]. Şekil 5b’de şeffaf malzemeden üretilmiş şişe prototipi verilmiştir. Tasarımcı tarafından geliştirilmiş olan tasarımın şeffaf prototipi ergonomik ve müşteri öngörüsü üzerinden onay almak için kullanılmaktadır. Tasarım onayı alındıktan sonra cam şişe kalıbının imalatı yapılmaktadır. Bu sayede hem ürün geliştirme süreci kısaltılmakta, doğru tasarıma karar verilmekte ve sonrasında metal kalıp imalatına geçilerek gereksiz kalıp maliyetleri önlenmektedir [28]. Şekil 5c’de renklendirilmiş mimari prototipler verilmiştir. Bu yöntemle küçük ölçeklerdeki mimari prototipler üzerinden proje onayı ve müşteri öngörülere alınabilmektedir [29].

Emisyon ve yakıt kullanımının düşürülmesinin önemli olduğu havacılık ve otomotiv sektörlerinde, Quick Cast (Hızlı Döküm) ismi ile ticarileşmiş olan üretim yöntemi ile parçalar imal edildikten sonra

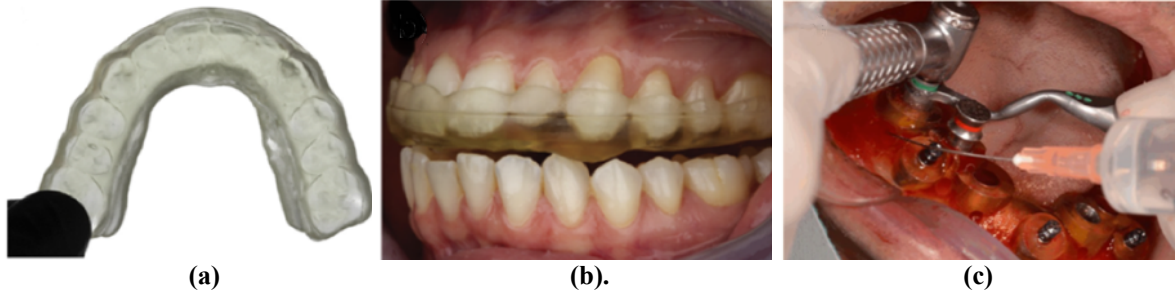
hassas döküm ile metal olarak üretilebilmektedir. Quick Cast, üretim süresinde %30-70 kısalma ve %35'e varan maliyet kazancı sağlanmaktadır. Şekil 6a' da havacılık sektöründe kullanılan bir parçanın Quick Cast ile üretilmiş hali verilmiştir [30]. Quick Cast yöntemine benzer olarak kuyumculuk sektöründe üç boyutlu tasarımlar HFP teknolojisi ile dökülebilir malzemeden üretildikten sonra alçı kalıba alınarak istenilen değerli metalden dökülebilmektedir. Bu sayede gümüş master model, kauçuk kalıplama ve mum basma süreci ortadan kaldırılarak üretim maliyetleri düşürülmektedir. Şekil 6b'de döküm ile üretilmiş kuyumculuk parçaları verilmektedir [22]. Kuyumculuk sektöründe olduğu gibi, 20' nci yüzyılın başlarında Dr. William H. Taggart ilk kez hassas döküm tekniğini diş köprüleri ve kaplamalarının üretiminde kullanmıştır. O dönemlerde hastadan alınan kalıpların mum modellere dönüştürülmesi uzun zaman almaktaydı. Günümüzde ise ağız içi üç boyutlu tarama cihazları ve MR datalarından elde edilen nokta bulutlarının 3D dataya çevrilmesi ile, kişiye özel metal diş protezleri ve köprülerin dökümü için master modellerin dökülebilir özelliğe sahip reçineden HFP teknolojisi ile imal edilmesi ve hassas dökümü daha kısa sürelerde yapılabilmektedir [31]. Şekil 6c'de Envisiontec marka SL cihazı ile dökülebilir malzemeden üretilmiş diş kaplamaları verilmiştir. Tek bir üretimde birçok diş kaplama modeli üretilebilmektedir [32].



Şekil 6. HFP teknolojisi ile üretilmiş parçalar **a)** SL yöntemi ile üretilmiş Quick Cast parça ve dökülmüş hali [30] **b)** DLP yöntemi ile üretilmiş parça ve gümüş döküm hali [33] **c)** SL yöntemi ile üretilmiş diş köprü ve kaplamaları [32].

Şekil 6a'da Quick Cast yöntemi ile üretilmiş dökülebilir parçanın hassas dökümle paslanmaz çelikten dökülmüş hali verilmiştir. Bu sayede hassas döküm için gerekli mum modelin imalatında kullanılan metal kalıba gerek olmadan az adetli parçaların hassas döküm ile imalatı mümkün olmaktadır [30]. Şekil 6b'de DLP yöntemi ile dökülebilir fotopolimerik malzemeden üretilmiş yüzük modeli ve hassas döküm yöntemi ile gümüşten dökülmüş hali verilmiştir [33]. Şekil 6c'de Envisiontec 3D yazıcı ile dökülebilir fotopolimerik malzeme kullanılarak üretilmiş diş kaplama ve köprü modelleri verilmiştir. Kişiye özel üretilmiş modeller daha sonra hassas döküm yöntemi ile metal olarak üretilmektedir. Bu yöntemle çok sayıdaki diş provaları ortadan kalkmış ve daha hassas diş protezlerinin daha kısa sürelerde imalatı mümkün olmuştur [32].

Ortodonti tedavilerinde doğru diş dizilimi ve baskı problemlerini gidermek de kullanılan şeffaf kalıplar HFP teknolojisi ile kişiye özel olarak imal edilerek kullanılmaktadır. Yine diş tedavisinde implantın oturacağı yerin doğru delinmesi için gerekli olan aparatlar HFP teknolojisi ile kişiye özel olarak imal edilebilmektedir. Ağız içi tarama cihazı ile alınan üç boyutlu model ile tedavi yapılacak dişin yerine konulacak implantın yeri, şekli ve konumu belirlenmektedir. İmplantın yerleştirileceği yerin doğru belirlenebilmesi için tasarlanan delme aparatı HFP teknolojisi ile hassas bir şekilde üretilmekte ve hastanın ameliyatında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [34]. Şekil 7a ve b'de diş baskı problemini düzeltmek amacı ile DLP teknolojisi ile NextDent Ortho Clear malzeme kullanılarak KUDO marka SLA cihazı ile kişiye özel üretilmiş olan şeffaf ortodonti tedavi kalıbı verilmektedir [35]. Şekil 7c' de ise kişiye özel üretilmiş implant delme aparatı ve uygulama yöntemi gösterilmektedir [36].

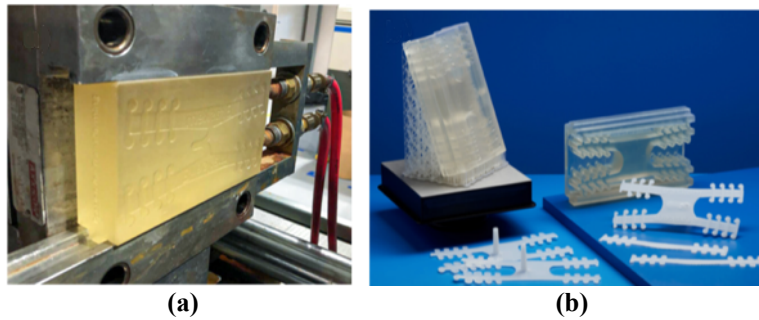


Şekil 7. HFP teknolojisi ile üretilmiş parçalar **a)** DLP ortodonti kalıbı **b)** DLP kalıbın kullanımı [35] **c)** SL teknolojisi ile üretilmiş implant delme aparatı ve uygulaması [36].

Şekil 7a' da hastanın ağız içi 3D tarama datasından alınmış olan nokta bulutuna göre yapılan tasarımın şeffaf biyo uyumlu reçine kullanılarak DLP teknolojisi ile üretilmiş hali verilmiştir. Şekil 7b'de hastanın diş yapısına göre üretilmiş ortodonti kalıbının uygulaması gösterilmektedir. Bu yöntem ile hastanın ortodonti tedavi planlaması bilgisayar üzerinden daha doğru bir şekilde yapılmakta ve tedaviye göre DLP teknolojisi ile imal edilen kalıplar ortodonti tedavisinde dişler üzerine uygulanan tel gerdirme yöntemi yerine kullanılabilir. Bu sayede hastanın diş estetiği bozulmamakta ve hasta asitli içecekleri de rahatlıkla tüketebilmektedir [35]. Şekil 7c'de üç boyutlu diş taramasına göre yapılmış ameliyat planlaması sonrası biyo uyumlu malzemeden HFP teknolojisi ile üretilen delme aparatları ile doğru bir şekilde diş implant vidasının takılacağı yer delinebilmektedir. Delme sonrası alt bağlantı parçası çeneye vidalandıktan sonra bu parçaya da diş implantı bağlanarak tedavi tamamlanmaktadır. Bu yöntem ile hasta daha güzel görümlü dişlere sahip olabilmektedir [36].

Sağlık sektörü ameliyat planlanmasında, HFP yöntemi ile üretilen organ prototipleri kullanılabilir. Hastanın CT-Scan (Computer Tomography) ya da MRI (Magnetic Resonance Imaging) datasından üretilen organ prototipleri üzerinden yapılan ameliyat planlamaları, başarı olasılığını arttırmakta ve hastanın daha kısa sürede sağlığına kavuşmasını sağlamaktadır [37].

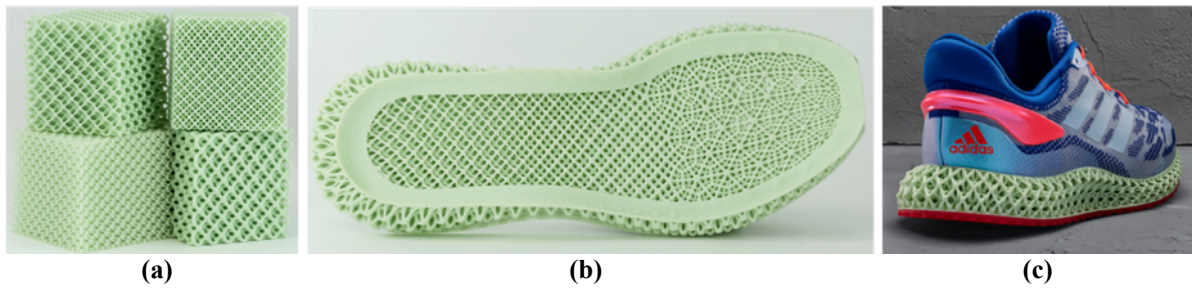
Sağlık sektöründe birçok kullanım alanı bulan HFP teknolojileri, endüstride üretime yardımcı ekipmanların imalatında da kullanılmaktadır. Bu uygulamaya en güzel örnek; az adetli plastik parçaların üretimi için enjeksiyon kalıp insertlerinin yüksek ısıya dayanıklı malzemeler kullanılarak HFP teknolojileri ile imal edilmesidir. Enjeksiyon kalıplama metal kalıplar ile yüksek adetli plastik parçaların düşük maliyetler ile imalatında kullanılan bir imalat yöntemidir. Enjeksiyon kalıplarının üretimi, pahalı tasarım programları, tecrübeli personel, talaşlı imalat, erezyon (dalma ve tel) ve parlatma teknolojilerinin kullanımını gerektirmektedir. Kalıbın kompleksliğine bağlı olarak ortalama üretim süresi 4 veya 8 hafta sürmekte ve ortalama maliyetleri ise 2.000-100.000 \$ arasında değişmektedir. Metal kalıplar ile bin adetten bir milyon adede kadar plastik parça basılabilmektedir. Uzun ve pahalı bir süreç olan enjeksiyon kalıp insertlerinin metal yerine HFP teknolojileri ile ısı ve basınca dayanıklı plastik malzemeden üretilerek çok daha kısa sürelerde ve düşük maliyetlerde az adetli imalatlar için kullanımları mümkündür. Şekil 8'de SL teknolojisi ile üretilmiş kalıp inserti ve PP (Polypropylen) malzemeden basılmış maske tutucu parçalar verilmiştir [38].



Şekil 8. SL teknolojisi ile üretilmiş **a)** Enjeksiyon kalıp inserti **b)** PP enjeksiyon baskı [38].

Şekil 8’de enjeksiyon kalıplama konusunda tecrübeli bir firma olan Braskem’in Form 3 model 3D yazıcı ile 230°C’ ye dayanıklı High Temp V2 malzeme kullanarak ürettiği maske tutucu enjeksiyon kalıp inserti ve baskı parçaları görülmektedir. Enjeksiyon baskı esnasında 5 ton kalıp basıncı, 30 s baskı süresi ile PP malzemeden 6000 adet maske tutucu parça üretilebilmiştir. Braskem 10.000-15.000 \$ harcayarak metal malzemeden 30 günde üretebileceği enjeksiyon kalıp insertini, yüksek ısıya dayanıklı plastik malzemeden SL teknolojisi ile 200\$’a bir günde üreterek maliyet ve zamandan tasarruf etmiştir [38].

HFP teknolojilerinden biri olan CLIP teknolojisinin kullanımı ile endüstriyel yastıklamanın gerekli olduğu uygulamalar için özel kafes yapıları yüksek hassasiyetle imal edilebilmektedir. Bu sayede sünger tarzı malzemelerden daha iyi destekleme sağlayan tasarımlar üretilebilmektedir. Bu uygulamaya en güzel örnek Adidas’ın koşucular için özel geliştirmiş olduğu ayakkabı tabanlarını CLIP teknolojisi ile üretmesidir. Şekil 9’ da CLIP teknolojisi ile üretilmiş kafes yapıları ve koşu ayakkabı tabanı verilmiştir [39].



Şekil 9. CLIP teknolojisi ile üretilmiş parçalar a) Kafes yapıları b) Spor ayakkabı tabanı c) Adidas spor ayakkabı [11, 39].

Şekil 9’deki ayakkabı tabanı için Adidas tasarımcıları koşu sırasında koşucunun ayak parmakları ve topuk kısmına gelen yüklerin farklı olması nedeniyle farklı kafes tasarımları kullanmışlardır (Şekil 9b). Bu sayede koşucunun ayak yapısına özel ve koşu sırasında daha iyi performans alabileceği bir spor ayakkabı üretilmiştir. Teknolojinin adapte edilmesi ile CLIP teknolojisi ile üretilmiş daha konforlu ayakkabı tabanlarına sahip spor ayakkabılar da internet sitesi üzerinden 160-200\$ fiyat aralığında perakende olarak satışa sunulmuştur [11].

III. SONUC

Eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan HFP teknolojilerinin, konvansiyonel imalat teknolojileri ile üretilmeyen karmaşık şekilli parçaların imal edilebilmesi, gerektiği kadar malzeme kullanımı, stok maliyetlerinin olmaması ve montajlı parçaların tek parça olarak imal edilebilmesi gibi avantajları nedeniyle kullanımları hızla yaygınlaşmaktadır. HFP teknolojilerinden biri olan SL teknolojisi, 1980’li yıllarda ilk keşfi ve ticarileşmesinin ardından prototipleme amaçlı kullanılmış ve ürün geliştirme sürelerinin kısaltılmasında faydalı olmuştur. Ardından DLP ve CLIP teknolojileri ve kullanılan malzemelerin geliştirilmesi ile prototipleme ve ürün geliştirme amacı dışında birçok sektörde az adetli uygulamaya özel parçaların imalatında da kullanılmaya başlamıştır. Endüstriyel tasarım prototipleri, mimari maketler ve kavramsal prototipler bu teknolojiler ile tasarımdan direkt olarak imal edilmekte ve müşteri öngörüsüne göre ürün geliştirme süreleri kısaltılmaktadır. HFP teknolojisi ile üretilen test prototipleri havacılık ve otomotiv endüstrisinde rüzgar tünellerine sokularak tasarımın sürtünme katsayıları hesaplanabilmektedir. Bu sayede ürün tasarımına prototip aşamasında karar verilebilmektedir. Özellikle dişçilik sektöründe, HFP teknolojileri, kişiye özel diş implantlarının uygulanması için gerekli olan delme aparatlarının imalatı, ortodonti tedavisi için planlanan diş kalıplarının imalatı ve diş kaplamalarının metal dökümü için modellerin imalatı gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede uzun süre alan prova işlemleri tek seferde bitirilmekte ve ürün maliyetleri düşürülebilmektedir. Kuyumculukta tasarımı yapılan modelin direk tasarımdan

dökülebilir reçine ile üretilip hassas döküm ile istenilen ayardaki altın alaşımlarından kalıp gerektirmeden imalatı diğer bir uygulama örneğidir. Yine Quick Cast yöntemi ile havacılık, makine ve otomotiv sektörlerinde tasarlanan metal parçanın mum kalıba gereksinin duymadan HFP teknolojileri ile üretimi, sonrasında hassas döküm ile imalatı teknoloji gelişim seviyesinin diğer bir göstergesidir. HFP teknolojileri üretime yardımcı ekipmanların imalatında da kullanılmaktadır. Buna en güzel örnek az adetli plastik parçaların enjeksiyon kalıp ile üretimlerinde ısıya dayanıklı malzeme kullanarak kalıp insertlerinin kısa sürede ve düşük maliyet ile üretilmeleridir. Parça kompleksliğine ve kullanılan enjeksiyon malzemesine bağlı olarak binlerce adet plastik enjeksiyon parça bu yöntem ile hızlı bir şekilde üretilmektedir. HFP teknolojilerinin gelmiş olduğu son nokta Adidas'ın Carbon3D firması ile ortaklaşa geliştirdiği kompleks, koşuya özel ayakkabı tabanlarının imalatıdır. Bu ayakkabı tabanları CLIP teknolojisi ile tasarımdan direkt olarak imal edilmektedir.

SL ticari patentinin düşmesi ile daha düşük maliyetli ve herkesin ulaşabileceği fiyatlardaki masa üstü SL ve DPP cihazlarının üretilmesi teknolojinin yaygınlaşması için bir fırsat yaratmıştır. Bu sayede FDM teknolojisini kullanan masa üstü yazıcıların aksine daha hassas ve yüzey pürüzlülüğü düşük parçaların ev ve ofis ortamında düşük maliyetler ile imal edilmesi mümkün olmuştur. Bu sayede teknolojinin bilinirliği de artmaktadır.

SL, DLP, CLIP ve DPP teknolojilerinin her biri HFP teknolojileri olarak sınıflandırılmalarına rağmen hız, parça hassasiyeti ve üretim maliyetleri açısından farklılıklar göstermektedir. Bu teknolojilerden en yavaş SL teknolojisi iken daha büyük parçaların imalatına izin vermektedir. Hassasiyet ve çözünürlük açısından DLP ve CLIP teknolojileri daha iyi sonuçlar verirken daha pahalıdır. Bu teknolojilere göre daha ucuz bir teknoloji olan DPP teknolojisi, daha düşük hassasiyete sahip parçaların imalatına izin vermektedir.

Hızlı prototiplemeden az adetli son kullanım için parça imalatına doğru bir teknolojik gelişim gösteren HFP teknolojileri, kullanılan malzeme özelliklerinin geliştirilmesi ve maliyetlerin düşmesi ile endüstriyel olarak yakın gelecekte daha da yaygınlaşacaktır. Bu sayede konvansiyonel imalat teknolojileri ile üretilmeyen ve hayatımızı kolaylaştırmak için tasarlanmış karmaşık akıllı ürünlerin sayısı artacak ve maliyetleri düşecektir. Otomasyona uygun olan HFP teknolojilerinin gelecekte akıllı fabrikaların temel imalat yöntemlerinden biri olarak karşımıza çıkma olasılığı oldukça yüksektir. Bu sayede yakın gelecekte, ara stokların olmadığı, üretim yerinden bağımsız, talep anında imalatın yapıldığı daha düşük maliyetli ve hayatımızı kolaylaştıran akıllı ürünlerin olduğu bir endüstri ile karşı karşıya kalacağız.

IV. KAYNAKLAR

- [1] M. B. Kumar ve P. Sathiya, "Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges," *Thin-Walled Structures*, ss. 107-228, 2020.
- [2] G. Özer, "Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme", *Niğde Kemal Hasdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 9, s. 1, ss. 606-621, 2020,
- [3] G. A. Appuhamillage, N. Chartrain, V. Meenakshisundaram, K. D. Feller, C. B. Williams ve T. E. Long, "110th Anniversary: Vat Photopolymerization-Based Additive Manufacturing: Current Trends and Future Directions in Materials Design," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, c. 58, s. 33, ss. 15109-15118, 2019.
- [4] L. J. Tan, W. Zhu ve K. Zhou, "Recent progress on polymer materials for additive manufacturing," *Advanced Functional Materials*, c. 30, s. 43, ss. 2003062, 2020.
- [5] C. İ. Çalışkan ve Ü. Arpacıoğlu, "Yapı Üretiminde Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi", c. 25, s. 2, ss. 1117-1136, 2020.

- [6] G. C. Dumitrescu and I. A. Tanase, “3D printing-a new industrial revolution,” *Knowledge Horizons-Economics*, c.8, s.1, ss. 32-39, 2016.
- [7] K. Çelik ve A. Özkan, “Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim Ve Onarım Uygulamaları”, c. 5, s. 1, ss. 107-121, 2017.
- [8] T. Wohlers, ve T. Gornet, Wohlers Report, Wohler Associates Inc., USA, 2016.
- [9] H. K. Sürmen, “Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar”, c. 24 s. 2, ss. 373-392.
- [10] W. Piedra-Cascon, V. R. Krishnamurthy, W. Att ve M. Revilla-Leon, “3D Printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing Technologies: A narrative review”, c. 109, ss. 103630, 2021.
- [11] Adidas 4D Shoes, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.adidas.com/us/4d-shoes>, Erişim Tarihi: 2 Mart, 2021.
- [12] *Additive Manufacturing, in General Principles-Terminology*, ASTM 52900:2017, 2017.
- [13] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O’Donoghue ve C. Charitidis, “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities,” *Materials Today*, c. 21, s. 1, ss. 22-37, 2018.
- [14] U. G. Başcı, R. Yamanoglu, “Eklemeli Metal İmalat Teknolojileri Ve Uygulama Alanları,” *IMASCON*, Kocaeli, Türkiye, 2020, ss. 307-314.
- [15] B. Berman, “3-D printing: The new industrial revolution,” *Business Horizons*, c. 55, s. 2, ss. 155-162, 2012.
- [16] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” *Business Horizons*, c. 60, s. 5, ss. 677-688, 2017.
- [17] P. Wu, J. Wang and X. Wang, “A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry,” *Automation in Construction*, c. 68, ss. 21-31, 2016.
- [18] Vault Supercharges Pre-Production with 3D Systems’s SLA, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.3dsystems.com/customer-stories/vault-supercharges-pre-production-3d-systems-sla>, Erişim Tarihi: 13 Ocak, 2021.
- [19] 3D Systems SL Materials, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: [https://www.3dsystems.com/search?search_api_fulltext=SL%20materials&dFR\[technologies\]\[0\]=Stercolithography%20%28SLA%29](https://www.3dsystems.com/search?search_api_fulltext=SL%20materials&dFR[technologies][0]=Stercolithography%20%28SLA%29), Erişim Tarihi: 13 Ocak, 2021.
- [20] H. Quan, T. Zhang, H. Xu, S. Luo, J. Nie ve X. Zhu, “Photo-curing 3D printing technique and its challenges,” *Bioactive Materials*, c. 5, s. 1 ss. 110-115, 2020.
- [21] D. Holley, “Carbon3D Gains Google’s \$100M Backing for 3-D Printing Tech,” [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://xconomy.com/san-francisco/2015/08/20/carbon-3d-gains-googles-100m-backing-for-3-d-printing-tech/>, Erişim Tarihi: 13 Ocak 2021.
- [22] F. Cooper, “Do the new, low-cost photopolymer 3D printers now becoming available have a place in the jewelry manufacturing environment,” *Santa Fe Symposium*, New Mexico, ss. 1-20, 2016.

- [23] 3D Printing Materials for Real-World Applications, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.carbon3d.com/materials/>, Erişim Tarihi: 11 Ocak 2021.
- [24] C. W. Hull, S. Clarita, B. Modrek, B. Parker, R. S. Freed, T. Almquist, S. Gabriel, S. T. Spence, S. Pasadena, D.J. Albert, D. R. Smalley, B. Park, R. A. Harlow, M. D. Rey, P. Stinebaugh, H. L. Tarnoff, V. Nuys, H. D. Nguyen, C. W. Lewis, L. Rock, T. J. Vorgitch, S. Valley, D. Z. Remba ve W. B. Vinson, "Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," 3D Systems, Patent Number US5137662A, United States, August, 11, 1992.
- [25] 2021 Best DLP 3D Printer – The Ultimate Buyer’s Guide, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://pick3dprinter.com/dlp-3d-printer/>, Erişim Tarihi: 13 Ocak 2021.
- [26] Zortrax Resin Products , [Çevrimiçi]. Erişim Adresi : <https://zortrax.com/resins/>, Erişim Tarihi: 25 Ekim 2021
- [27] Lotus F1 Team and 3D Systems move together towards 3D printed race-ready mass production of parts, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/lotus-f1-team-and-3d-systems-move-together-towards-race-ready-mass>, Erişim Tarihi: 26 Ocak 2021.
- [28] SLA Prototype produced by Somos WaterClear Ultra 10122, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.spring-italia.com/product/somos-waterclear-ultra-10122/?lang=en>, Erişim Tarihi: 28 Ocak 2021.
- [29] LGM Delivers Large Scale Appearance Model in Record Time with 3D Systems On Demand, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.3dsystems.com/customer-stories/lgm-delivers-large-scale-appearance-model-record-time-demand-manufacturing>, Erişim Tarihi: 26 Ocak 2021.
- [30] S. Negi, S. Dhiman ve R. K. Sharma, "Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review," *Journal of Manufacturing Technology Research*, c. 5, s. 1/2, ss. 75-96, 2013.
- [31] M. Bilgin, S. Baytaroğlu, E. N. Erdem ve A. E. Dilber, "A review of computer-aided design/computer-aided manufacture techniques for removable denture fabrication," *European Journal of Dentistry*, c. 10, s. 2, ss. 286, 2016.
- [32] R. V. Noort, "The future of dental devices is digital," *Dental Materials*, c. 28, s. 1, ss. 3-12, 2012.
- [33] Jewelry 3D Printing: Basic Design Parameters, Supports, and Orientation, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/Jewelry-3D-Printing-Basic-Design-Parameters-Supports-Orientation.pdf?mkt_tok=eyJpIjoiTldSbU9HSmhNRFE1WldWaSIsInQiOiJSVnh2NURxYnBlc3lqTFJWb21yWjlydHZOSVpYN2NkSTBkR014ZlZKUjNLNGt1ejgyYnV1U0FJSHdETW1BVVRiM09cL2lzd1V1SVRGNnNSNHVzQm4zbXlFM2RsVUtXZXNQdE9FaTRuVVdlTUdJVWJVN003eFFaZW96MIRRS011T20ifQ%3D%3D, Erişim Tarihi: 28 Ocak 2021, 2017.
- [34] S. K. Turbush ve I. Turkyilmaz, "Accuracy of three different types of stereolithographic surgical guide in implant placement: an in vitro study," *Journal of Prosthetic Dentistry*, c. 108, s. 3, ss. 181-188, 2012.
- [35] W. Piedra-Cascón, M. Sadeghpour, A. Wael ve M. Revilla-Leon, "A vat-polymerized 3-dimensionally printed dual-material occlusal device: A dental technique," *Journal of Prosthetic Dentistry*, <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.07.011>, c. 125, s. 5, ss. 1-5, 2020.

[36] W. Geng, C. Liu, Y. Su, J. Li ve Y. Zhou, “Accuracy of different types of computer-aided design/computer-aided manufacturing surgical guides for dental implant placement,” *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, c.8, s. 6, ss. 8442-8449, 2015.

[37] C. K. Chua, C. S. Meng, L. S. Ching, K. E. Hoe ve L. K. Fah, “Rapid prototyping assisted surgery planning,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 14, s. 9, ss. 624-630, 1998.

[38] Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: https://info.asme.org/rs/011BZA849/images/Formlabs_LowVolume%20Rapid%20Injection.pdf?mkt_tok=eyJpIjoiTXpkaU9EbGlNelk0TWpRMCIslInQiOiJicHZiSnZnYmY1RXI0TFwvUlhLWEVUZHIwSkVqRlViOHhENkk0M0g3QVEzRHgrdW1yOG5IT1djMTJqcWtGQmts2hWMIhXV1ZOT25EXC91VXQ2TDI2czZvOTZaWEpYN2VER1cwNGZTM2p2ZVwvc1VFMzhkUWMyaTZYRkE2VVdScIVRUCJ9, Erişim Tarihi: 26 Ocak 2021.

[39] Carbon Lattice Innovation-adidas Story, [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.carbon3d.com/resources/whitepaper/the-adidas-story/>, Erişim Tarihi: 26 Ocak 2021.