Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Part:C, Tasarım Ve Teknoloji
GU J Sci Part:C
4(4):309-319 (2016)

Hızlı Prototip Oluşturmada Karşılaşılan Problemler Ve Çözüm Önerileri*

H. Rıza BÖRKLÜ[1, ♠], A. Kıvanç YILDIRIM[2], H. Kürşad SEZER[1]

[1]*Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE*
[2]*Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anab. Dalı YL Öğrencisi, Ankara/TÜRKİYE*

Başvuru: 23/08/2016 *Kabul: 11/10/2016*

ÖZ

Hızlı Prototip Oluşturma (HPO, Rapid Prototyping - RP), Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) verisinden ince tabakalar şeklinde fiziki nesneler üretmeyi amaçlar. Böylece oluşan gerçek modeller çeşitli iş ve işlemlerde kullanılabilir (çeşitli testler, boyut kontrolü, döküm model, müşteriye teklif/sunu, prototip ve hatta gerçek parça vb.). Son yıllarda bu alanda birçok teknoloji ve yöntem geliştirilmiştir. Bunlar arasında: Stereolitografi (optik üretim, foto katılaştırma vb. de denebilir), Seçici Lazer Sinterleme, Ergiyik Birikimli Modelleme, 3B baskı (3 Boyutlu baskı), Katmanlı Nesne İmalatı, Çok Püskürtmeli Modelleme, Lazerle yapılan Net Biçimlendirme vb. gösterilebilir. Bu teknoloji ve yöntemler ile kolay, hızlı, ucuz ve otomatik modeller geliştirilebilir. Ancak, uygulama esnasında ise bazı özel ve genel problemlerle karşılaşılabilir. Bu tür problemler arasında; karmaşık ve büyük parçaları modelleme, demontaj, ölçü tamlığı, yüzey hassasiyeti, işlem hızı vb. gibileri gösterilebilir. Bu makalede hızlı prototip oluşturma esnasında karşılaşılan özel ve genel problemler ele alınacak ve çözüm yolları tanıtılacaktır.

Anahtar kelimeler: *Hızlı prototip oluşturma, 3B Baskı, Tersine mühendislik.*

Problems Encountered During The Rapid Prototyping And Their Solution Proposals

ABSTRACT

Rapid Prototyping (RP) is intended to produce physical objects as thin layers from Computer Aided Design (CAD) data. Real models produced this way can be used in a variety of business and operations (various tests, dimensional control, casting models, customer offers / presentations, prototypes and even real parts and so on.). Many technologies and methods have been developed in this area in recent years. These include: Stereolithography (can be termed as optical production, photo-solidification and so on), Selective Laser Sintering, Fused Deposition Modelling, 3D printing, Laminated Object Manufacturing, Multi-jet Modelling, Laser Net Shaping and so on. With this technology and methods, easy, fast, inexpensive and automatic models can be developed. However, some specific and general problems may be encountered during the application. Such problems are; complex and large parts modelling, disassembly, dimensional accuracy, surface accuracy, processing speed, and so on. In this paper, general and specific problems encountered during the rapid prototyping will be discussed and solutions will be introduced.

Keywords: *Rapid prototyping, 3D Printing, Reverse engineering.*

♠*İletişim yazarı, e-mail: rborklu@gazi.edu.tr*

**Bu çalışma, 5 - 7 Mayıs 2016 tarihleri arasında İstanbul'da gerçekleşen "International Symposium on 3D Printing Technologies (3D-PTS2016)" kongresinde sunulmuştur.*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hızlı Prototip Oluşturma (HPO), CAD verisinden ince tabakalar şeklinde gerçek parça / nesne üretmede kullanılan bazı teknolojileri içermektedir. Bu teknolojilerle hızlı 3B prototipler oluşturulabilir ve böylece de gerçek model üzerinde çalışma (test, boyut kontrolü vb.) mümkün olur. Ayrıca kalıp ve gerçek parçalar da yapılabilir. Özellikle küçük parti üretimlerinde çok faydalı olabilir. Burada "hızlı" ifadesi CAD verisinden makineye hızlı geçişi belirtir (çabuk üretimi değil). HPO'nun genel avantajları şöyle belirtilebilir [1, 2]:

- Hemen her tasarıma uygulanabilir ve tam otomatik yapılabilir.
- Kullanımı oldukça kolaydır ve çok az ön / son işlem gerekir.
- Prototip maliyeti az olur ve farklı tasarım seçenekleri kolay elde edilebilir.
- Gerçek model hataları kolay kontrol edilebilir.

Genel dezavantajları ise [1, 2]:

- Genel hassasiyet < 0,1 mm olur.
- Malzeme özelliklerine bağlı ürün çok kırılgan olabilir ve bazen de son işlem gerekir.
- Eğimli bir yüzey bazı tabakalardan oluşacağı için basamaklar olur (merdiven etkisi).

HPO teknikleri, şu işlem adımlarını içerir [2, 3]:

1. Bir CAD model oluşturmak (tasarım / 3B tarama yaparak)
2. CAD verisini STL formatına dönüştürmek (STL-Standart Üçgenlere bölme Dili). Hassasiyet STL sayısına bağlı artabilir ama dosya da büyür.
3. STL dosyasının tanımladığı nesne profilini kesit şeklinde tabakalara ayırmak.
4. (Gerekirse) Bir destek yapısı oluşturmak (bu sonra imha edilir).
5. İnce tabakalar şeklinde modeli otomatik oluşturmak.
6. Son işlem uygulamak (bitirme / temizleme, destek yapısını çıkartma vb.).

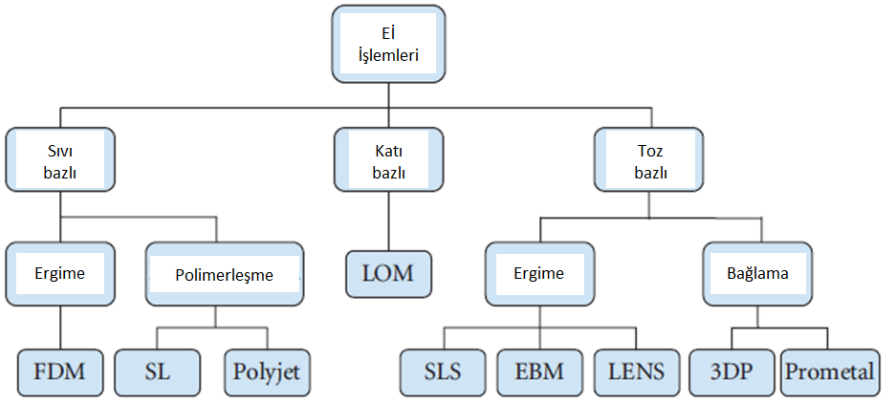
1980 yılında Dr. Kodama bu alanda ilk patente Japonya'da başvurmuş ama yarım kalmıştır. Sonra aynı amaçlı ilk patent C. Hull tarafından Steroliografi Aparatı -SLA- için 1986'da alınmıştır -ki Hull 1983'te SLA makinesini yapmış ve 3D Systems firmasını da kurmuştur. Aynı firma bu alanda faaliyet gösteren halen en büyük kuruluştur. 3D Systems, ilk ticari HPO sistemi SLA-1'i 1987'de tanıtmış ve 1988'de satışa sunmuştur. Yine 1987'de C. Deckard, Seçici Lazer Sinterleme (SLS) için patent başvurusu yapmış ve 1989'da almıştır. DTM bu patentin lisansını almış ama sonra 3D Systems'e devretmiştir. Yine 1989'da S. Crump (Stratasys'in kurucusu), Ergiyik Birikimli Modelleme (FDM) için patent başvurusu yapmıştır. Aynı zamanda 1989'da Almanya'da EOS GmbH kurulmuştur (lazer sinterlemede uzman). Bu firma şu anda kaliteli endüstriyel 3B baskı oluşturma ve üretim uygulamaları ile ünlüdür. Bu firma ilk "Stereos" sistemini 1990'da satmış ve Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) işlemini de geliştirmiştir. Aynı yıllarda diğer 3B baskı ve işlemler geliştirilmiştir. Yani; Balistik Partikül İmalatı (BPM), Katmanlı Nesne İmalatı (LOM), Katı Zemin Oluşturma (SGC) ve 3B baskı. 90'lı yıllarda mevcut HPO firmalarından sadece 3D Systems, EOS ve Stratasys ayakta kalabilmiştir. 90'lı ve 2000'li yıllarda bu alanda birçok Ar-Ge faaliyeti yürütülmüş ve yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Özellikle bunlar: Hızlı Kalıp Yapımı, Hızlı Döküm ve Hızlı İmalatı içerir. Bu yıllarda birçok yeni firma kurulmuştur. Kaynak alanında da çalışmalar yapılmıştır[4, 5].

Bu teknolojilerin tümü artık Eklemeli İmalat (Eİ / AM) olarak anılmaktadır. Bu teknolojilerin genel bir tasnifine ait bir şema Şekil 1'de görülmektedir. Eİ teknolojileri, 3B hızlı modeller oluşturmada kullandıkları malzeme yapılarına göre, şu üç gruba ayrılır [3]: Sıvı bazlı, Katı bazlı ve Toz bazlı. Bunlardan sıvı bazlı olan da ergime (FDM) ve polimerleşme (SL/SLA, Ployjet/MJM) şeklinde iki alt gruba ayrılmaktadır. Katı bazlı malzeme sadece LOM işleminde kullanılmaktadır. Toz bazlı malzeme ise ergime ve bağlama şeklinde kullanılmaktadır. Bunlardan ergime; SLS, EBM (Elektron Işın Ergitmesi) ve LENS teknolojilerinde uygulanmaktadır. 3DP ve Prometal ise bağlamaya dayalı Eİ teknolojisi içermektedir. Bu alandaki çalışmalarda şu iki husus vurgulanabilir [6, 7]:

1. Bu teknoloji hala çok pahalı ve böylece; çok kıymetli, yüksek düzeyli mühendislik gerektiren ve pahalı parçalara uygundur.
2. Bazı 3B baskı imalatçıları "Kavram Modelleyici" geliştirmektedir. Bu sistemler kavram geliştirme ve işlevsel prototip oluşturmada kullanılır (büroya uygun, kolay kullanılabilir ve ekonomik sistemler).

Fiyat artışına bağlı olarak baskı kalitesi, hız ve malzemeler de iyileşmektedir. 2007 sonrası fiyatlar çok düşmüş ve kullanım yaygınlaşmıştır. 2009 sonrası ise malzeme birikimli sistemler artmış ve ucuzlamıştır. 2012'den sonra yeni ve meşhur markalar görülmektedir [5, 6].

Bu makalenin bundan sonraki kısımları şu şekilde düzenlenmiştir. 2. Bölümde mevcut ve yaygın kullanılan Eİ/HPO teknolojilerin genel ve kısa bir tanıtımı yapılacaktır. 3. Bölümde ise bu teknolojilerde karşılaşılan problemler belirtilecek ve bunların giderilmesi veya etkilerinin azaltılması yönünde önerileri sunulacaktır. Son bölümde ise araştırma bulguları kısaca değerlendirilecek ve yeni çalışma istikametleri vurgulanacaktır.



Şekil 1. Eklemeli İmalat teknolojilerine ait genel bir tasnif şeması [3].
(Figure 1. A general classification scheme of additive manufacturing)

2. MEVCUT Eİ/HPO TEKNOLOJİLERİ (EXISTING AM/EP TECHNOLOGIES)

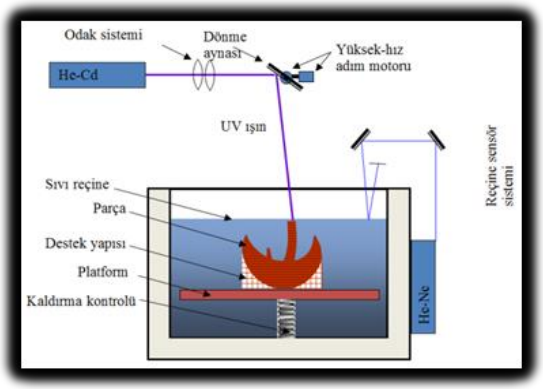
Eİ ve/veya HPO amaçlı birçok teknolojik yöntem kullanılmaktadır. Halen 10'dan fazla ticari Eİ/HPO işlemi ve 5'in üzerinde kavram modelleme işlemi vardır. Plastik, seramik, metal ve ağaç benzeri kâğıt malzemelerden nesneler oluşturabilen birçok ticari teknik vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir [1, 2, 8]:

1. Stereolitografi (SL / SLA)
2. Seçici lazer sinterleme (SLS)
3. Ergiyik birikimli modelleme (FDM)
4. 3B Baskı (3DP – 3 Boyutlu Baskı)
5. Katmanlı nesne imalatı (LOM)
6. Çok püskürtmeli modelleme (MJM)
7. Lazerle yapılan net biçimlendirme (LENS)

Bu teknolojilerin genel tanıtımları ve önemli özellikleri aşağıda daha ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

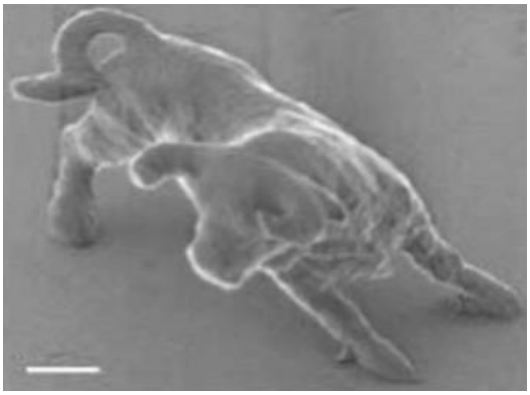
2.1. Stereolitografi - SL / SLA (Stereolithography)

Stereolitografi (SLA-Stereolitografi Aparatı), 3D Systems Inc. tarafından 1987'de piyasaya sürülmüş ve şu ana dek en fazla kullanılan HPO yöntemi olmuştur (Bu yöntem; optik üretim / imalat, foto katılaştırma, katı serbest biçim üretimi, katı görüntüleme, HPO, reçine baskı ve 3B-baskı olarak da anılır). Bir reçine banyosunda istenen alana etki ettirilen lazer ışını ile işlem yapılır (Şekil 2). Tabakalar tamamlandıkça, daha önce işlemden geçen alan üzerine sıvı reçine akması için alçalır. Bir silecek üst taraftaki fazla reçineleri temizler. Bu işlem nesne oluşana dek sürer. Arkasından nesne sıvıdan çıkartılır, reçine süzülür ve bir çözücüde yıkanarak atıklardan temizlenir. Sonra UV-fırına konan nesne üzerindeki tüm reçineler katılaşır. İşlem süresi, toleranslar ve yüzey kalitesi tabaka kalınlığına bağlıdır. Bu kalınlık ise 0,05-0,5 mm arasında değişir [1, 2].



Şekil 2. Stereolitografi işleminin şematik olarak gösterimi [11].
(Figure 2. Schematic representation of stereolithography process)

'Vat' Polimerizasyonu, stereolitografi ile prototip yapma işlemini ifade eder. 1980'de C. Hull tarafından geliştirilmiş ve 3D firması ile de ticari hale dönüşmüştür. Stereolitografi prosesi: 1) Vektörel tarama (noktasal), 2) Alan (yüzey) izdüşümü ve 3) İki fotonla polimer oluşturma (hassas nokta) şeklinde olur. (1) ve (3)'üncü yöntemler, nokta tarayan lazer ışını; (2)'de ise büyük bir ışın radyasyonu 'Dijital mikro mirror' denen (DMD) bir aletle desenlenir ve tüm katman tek bir işlemle yapılır. (1) ve (2)'de yeni reçine sağlama gerekir; (3)'de parça reçine içinde yapılır ve reçine kaplama gerekmez. İki foton durumunda, fotopolimerizasyon iki lazer ışını kesişim noktasında olur. İki foton vat polimerizasyonunda fotobaşlatıcının çözünerek polimerizasyonu başlatması için iki fotona ihtiyacı vardır. Bu iki foton ihtiyacının sonucu olarak çözünürlük son derece artar. Çünkü aynı fotobaşlatıcı molekülüne iki fotonun çarpmasını sağlamak için gerekli foton yoğunluğunu sağlayacak enerji yoğunluğu sadece lazerin merkezinde çok ince bir alanda yeterince yüksektir. Dolayısıyla 200 nm yada daha küçük detay mümkün olur. Kompleks mikro parçalar üretilebilir. Örneğin Şekil 3'deki model 13 dk gibi bir sürede üretilmiştir [27]. Modelin kabuk kısmı iki foton polimerizasyonu ile ve iç kısımlar ise UV ışınlar ile tek adımda oluşturulmuştur. Fotopolimer tank içinde bir noktayaiki lazer ışını etkirse aynı işlemolur.Bu yaklaşımda odaklanmış lazer ışınları kesiştiklerinde foton yoğunluğu fotopolimerizasyon için yeterli olur.



Şekil 3. İki foton polimerizasyonu ile üretilen boğa modeli. Ölçek çubuğu 1 µm [34]
(Figure 3. Bull model fabricated by two photon polimerization. The size scale bar is 1 µm)

SLA makinelerinde; tekrar kaplama, platform, lazer ve optik kontrol sistemi gibi altsistemlere ayrılır. Bu tekniğe ait özellikler [9, 10]:

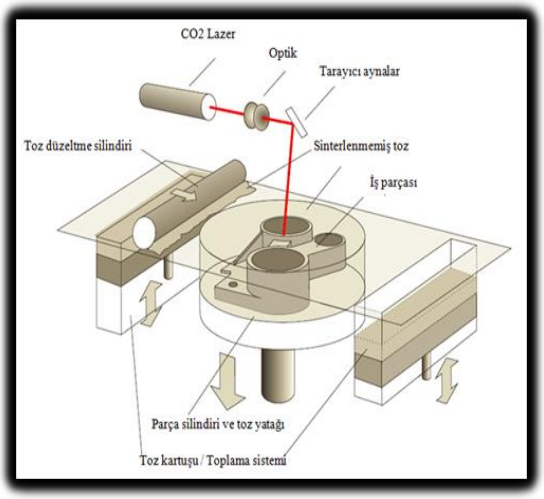
- Katılaşma işlemi süresine bağlı çarpıklıklar oluşması
- Üretilen parçaların kırılgan olması
- Destek yapıları gerekmesi
- Katılaşmayan malzemenin zehirli olması vb. şekilde özetlenebilir.

Bu teknolojinin diğer Eİ teknolojilerine göre iki ana avantajı; hassasiyet (parça doğruluğu) ve yüzey kalitesidir. Parça genelde orta derecede mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleriyle parçalar;biçim (şekil),montaj ve biraz da işlevsel prototipler olarak kullanılır.

2.2. Seçici Lazer Sinterleme – SLS (Selective Laser Sintering)

1989'da Teksas Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. İşlem, bir platform üzerine ince toz katman serilmesi ve ergime sıcaklığına yakın ısıtılmasına dayanır (Şekil 4). Daha sonra ise bir karbondioksit yada fiber lazeribu toz malzemeyi biraz daha ısıtarak ergitir. Bu şekilde süren ve tekrarlayan işlem nesneyi ince tabakalar şeklinde oluşturur (0,10-0,15 mm kalınlıkta). Lazer yeni tabakaya etki ettiğinde, bir önceki katmanı ergitir ve yapıştırır.Oluşturulan nesne oda sıcaklığına kadar soğutulur, aşırı ve artık tozlar fırçayla temizlenir ve sonra da nesne toz malzemeden çıkartılarak işlem tamamlanır. Parça kumlanaraksinterlenmemiş tüm partiküller temizlenir. Nesneyi çevreleyen partiküller, destek malzemesi işlevi yapar ve böylece de ilave bir destekyapısınagerek duyulmaz. Ayrıca bu yöntemle aynı sürede birden fazla nesne(parça) oluşturulabilir. Atık tozlar tekrar kullanılabilir ama iyi kalite elde etmek için yeni malzeme ile karıştırılması önerilir. Bu işlemde kullanılan malzemeler; genelde naylon, cam katkılı naylon ve polyesterdir. Bu yöntem, metal ve seramik nesneler ve doğrudan takım uçları üretiminde bile kullanılabilir. Seçici lazer sinterlemeyönteminin özellikleri[1-3,10]:

- Fonksiyonel parça yapıldığından son malzeme kullanılması
- İyi mekanik özelliklere sahip olması (oluşturma konumuna bağlı)
- Toz halinde yüzeyoluşması
- Kontrol için birçok değişken bulunması
- Destek gerekmemesi şeklinde belirtilebilir.



Şekil 4. Seçici Lazer Sinterleme işleminin şematik gösterimi [10].
(Figure 4. Schematic representation of laser sintering process)



Şekil 5. Seçici Lazer Sinterleme ileüretilmiş bazı parçalar.
(Figure 5. Various parts fabricated by Selective Laser Sintering)

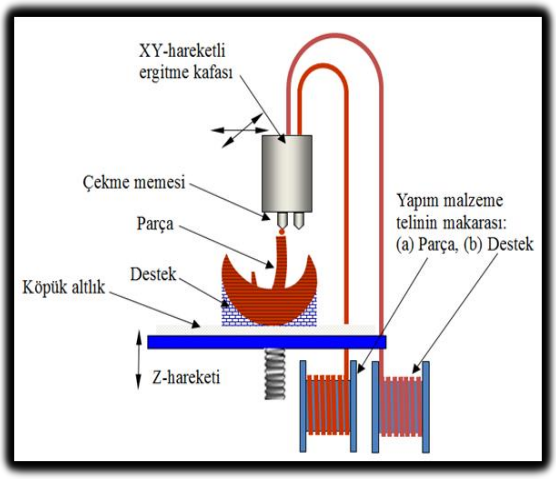
2.3. Ergiyik Birikimli Modelleme – FDM (Fused Deposition Modelling)

Ergiyik birikimli modelleme, ikinci en yaygın kullanılan hızlı prototip oluşturma işlemidir ve Strasys tarafından geliştirilmiştir. Bir spiralden çözülen plastik bir iplik tel, merdane başlığa yollanır, burada da ısıtılır ve küçük bir memeden çıkartılır (Şekil 4). Merdane başlık, numune tablasına monte edildiği için, gerekli geometri bir defada tek tabaka olarak oluşturulabilir. Ergimiş plastik, birikip alt tabakaya yapıştıktan sonra katılaşır. Destek malzemesi de benzer şekilde diğer ekstrüzyon (çekme) kafasından yayılır.Üzerinde nesne oluşturulan platform, bir tabaka kalınlığı kadar indirilir. Tüm sistem ısıtılan bir fırın odasında yer alır ve burası polimer camlaşma sıcaklığı üzerinde normal bir sıcaklıkta tutulur. Gerilmeler normalleşeceği için bu durum işlemin daha iyi kontrolünü sağlar.

SLA işlemindeki gibi fazlalık unsurların desteklenmesi gerekir.Ticari olarak mevcut suda çözünebilir destek malzemeleri bu son adımı kolaylaştırır. Destekleri ayırmak için en uygun metod malzeme özellikleri farklı

destek malzemesi kullanmaktır. Örneğin bir çözücü kullanarak parça malzemesini etkilemeden destek malzemesi uzaklaştırılabilir. Bunun için ekstrüzyon temelli makinanın iki ekstrüzyon kafası olmalıdır. Görsel olarak farklı ikincil bir malzeme modeldeki farklı içerikleri göstermek içinde kullanılabilir, Şekil 7. ABS, polikarbonat ve polisülfür genelde FDM işleminde kullanılan malzemelerdir.FDM tekniğine ait özellikler [1, 2, 11]:

- Sessiz çalıştığı için bürolarda kullanılabilmesi
- Oldukça hızlı küçük parçalar oluşturması
- İyi mekanik özelliklerelde edildiği için fonksiyonel parça üretmeye uygun olması
- Birçok malzeme kullanılması vb. gibi belirtilebilir.



Şekil 6. Ergiyik Birikimli Modelleme işleminin şematik gösterimi (FDM) [11].
(Figure 6. Schematic representation of Fused Deposition Modelling process)



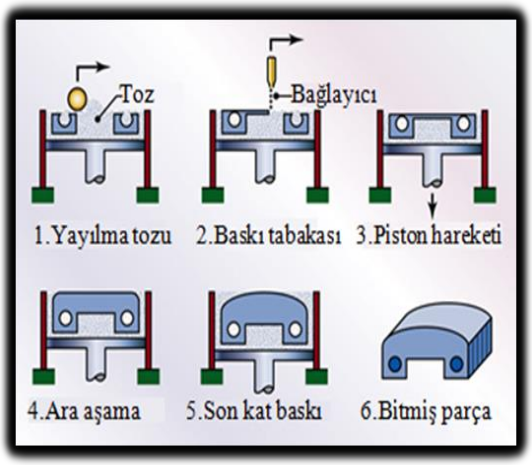
Şekil 7. FDM teknolojisiyle üretilmiş medikal model - iki farklı malzeme kullanılmış [2].
(Figure 7. Medical model fabricated by FDM technology – used two different materials)

2.4. 3B Baskı - 3DP (3D Printing)

Bazı ders kitaplarında "üç boyutlu baskı" (3B) ifadesi, tüm hızlı prototip oluşturma işlemleri için kullanılır. Burada MIT'te geliştirilen işlem tanıtılacaktır. Bu işlemde toz tabakası bir platform üzerine serilir (Şekil 8). Bu partiküller bir sıvı yapışkan vasıtasıyla seçime bağlı olarak bağlanır. Bu sıvı çok kanallı püskürtme kafası tarafından iki boyutlu bir desene (modele) biriktirilir. Mevcut tabaka tamamlandığında, bir tabaka kalınlığı kadar platform aşağı iner ve böylece yeni katman oluşturulabilir. Bu işlem, toz yatağında tüm nesne şekillenene dek tekrarlanır. İşlem bittiğinde nesne kaldırılır ve fazlalık tozlar temizlenir, narin yeşil nesne ortaya çıkar. Mekanik özellikleri iyileştirmek için diğer bir malzeme ile parça filtre edilir.Çevredeki toz partiküller fazlalık unsurları desteklediği için ek destekler gerekmez. Bağlayıcı maddeye renk eklemek sureti ile nesne her renkte oluşturulabilir.

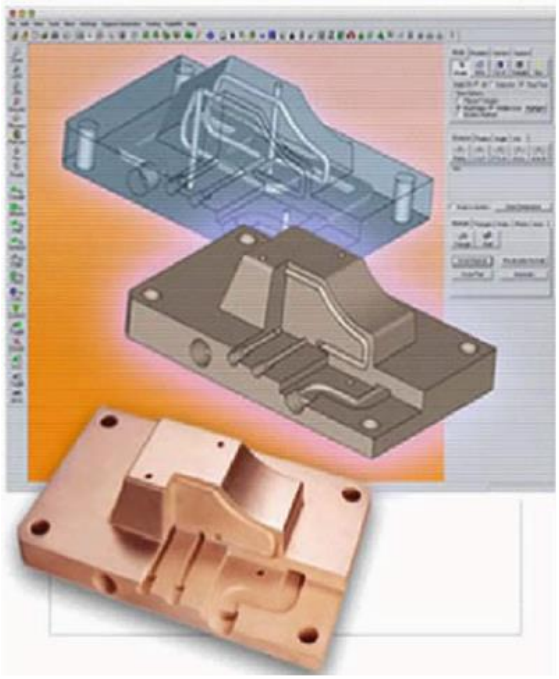
Nişasta/kola, alçı, ilaç (belirli dozda tıbbi ürün), seramik ve metaller, 3B baskı için genelde kullanılan malzemelerdir.Düşük maliyetli yazıcılar alçı (dayanım, ve maliyet daha yüksektir) yada nişasta bazlı toz ve su bazlı bağlayıcı kullanırlar. Nişasta yada polimer tozlarla parçalar görsel prototipler yada hafif iş fonksiyonel protipler olarak ve hassas dökümde desen olarak kullanılabilir. Toz olarak silis ve döküm kumu kullanarak bağlayıcı püskürten makinalarda kum dökümde kullanılan kalıp ve maça yapımı mümkündür. Metal tozlarda fonksiyonel prototipler yada üretim parçaları yapılabilir. Bu parçalar özellikle otomotiv ve ağır sanayide kalıp modeli yapmada kullanılır. Şekil 9'da ExOne firmasının metal parçalar ve döküm kumundan kum döküm kalıbı ve maçaları yapan makinalarında üretilmiş bir enjeksiyon kalıbı görülmektedir. Burada soğutma kanalları yüzeye yakın dolaştırılmıştır. Özellikle sıcak nokta olarak tahmin edilen yerlerde yoğunlaşmıştır. Konvansiyonel işlemede soğutma kanalları düz delik olarak delinir. Bu teknoloji ile yaklaşık her şekil ve konfigürasyonda soğutma kanalları tasarlanabilir.

Bu yöntem lazerin toz partiküllerini eriterek parça kesitlerini oluşturduğu SLS prosesine benzerdir. Parça malzemesinin çoğunluğu toz yatağında toz formundadır, çok az kısmı yazıcı kafasından püskürtülür. Bu proses lazer gibi yüksek güçlü enerji kaynağı kullanmadığından yüksek yığma hızına düşük maliyetle ulaşmak mümkündür. Sınırlı çözünürlük ve yüzey kalitesi olması ve narin nesneleri filtre etme ihtiyacı dezavantaj olarak sayılabilir [1-3, 12].



Şekil 8. 3B Baskı işleminin şematik gösterimi [12].

(Figure 8. Schematic representation of 3D Printing process)

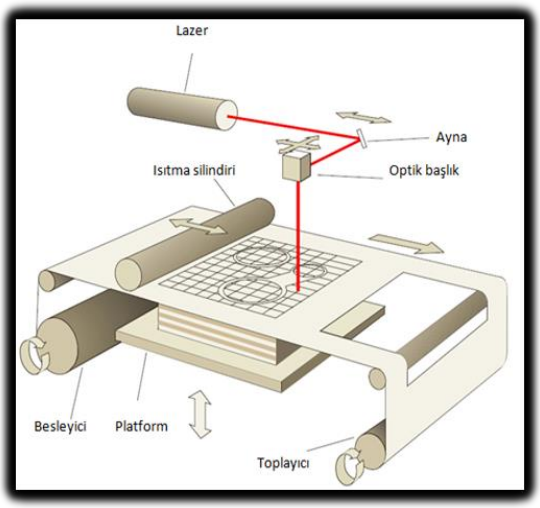


Şekil 9.3B Baskı teknolojisiyle üretilenenjeksiyon kalıbı(koruyucu soğutma kanallı)[2].
(Figure 9. Injection mold with conformal cooling channels fabricated by 3D Printing)

2.5. Katmanlı Nesne İmalatı – LOM (Laminated Object Manufacturing)

Katmanlı nesne imalatında, arka tarafında polietilen kaplaması olan bir yaprak kâğıt (bir rulodan beslenen), bir platforma yerleştirilir (Şekil 10). Bu kaplama, ısıtılmış bir silindir tarafından ergitilir, böylece de kâğıt platforma yapıştırılır. Arkasından, bir karbondioksit lazer nesnenin kesit ve sınırlarını (alanını) kesip çıkartır. Aynı zamanda lazer alan içindeki modeli (deseni) çevreleyen tarama işaretleri veya küpleri de oluşturur. Bu küpler, model için bir destek yapısı görevi ifa eder. Lazer bir tabakadaki işlemleri bitirdiğinde yeni bir kâğıt yaprakdevreye girer.İşlem tamamlandığında, model bir kâğıt bloku şeklinde elde edilir. Tüm çevreleyen küpler çıkartıldığında, bitirilmemiş parça zımparalanır.Kâğıt malzemenin nem ve sıcaklıktan etkilenmesi ve zarar görmesi, model kaplanarak azaltılabilir. Son yüzey durumu ve hassasiyet, benzer diğer yöntemler kadar iyi değildir, ancak nesneler ağaç gibi özelliklere sahiptir ve aynı işlemlere tabi tutulabilir.Levha laminsayonu temelli, farklı malzemeler kullanan benzer teknolojiler mevcuttur. Solidimension firması (İsrail) LOM konseptini alıp geliştirerek PVC plastik levhalar için ticari prototipleme sistemi geliştirmiştir. Bu makinalarda destek malzeme alt bölümlere ayrılmıştır ve fazla malzeme için, destek ayırımında kolaylık sağlayan özel kesme ve yapıştırma desenleri kullanılır, Şekil 11.

Bu teknik tipik olarak az miktarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeli parçalar yapabilmektedir. Kağıt hammadde kullanıldığından polywood ahşap benzeri ürün elde edilir ve malzeme, makine ve işlem maliyeti nispeten azdır. Ayrıca ek katılaşma gerekmemesi ve büyük parça yapılabilmesi bu teknolojinin tipik özelliklerindendir [2, 3, 10]. Ancak kağıt malzeme için nem emilimi ve aşırı aşınmayı önlemek için kaplama gerekir ve manuel destek ayırmadan dolayı küçük detaylı parça yapımı zordur.



Şekil 10. Katmanlı Nesne İmalatı işleminin şematik gösterimi [10].
(Figure 10. Schematic representation of Laminated Object Manufacturing Process)



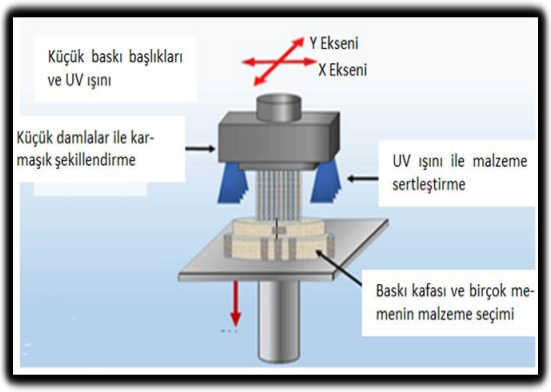
(a) (b) (c)

Şekil 11. Solidimension makinası ile golf topu yapma:a) İç bölgedeki topları ayırma, b)Topların etrafındaki destek malzemesini çıkartma, c) Fazla destek malzemesinin tamamen ayırma[2].
(Figure 11. Fabrication of golf balls using a Solidimension machine showing: (a) seperating the balls still encased in a central region (b) pull-away the excess material (c) complete removal of excess support material)

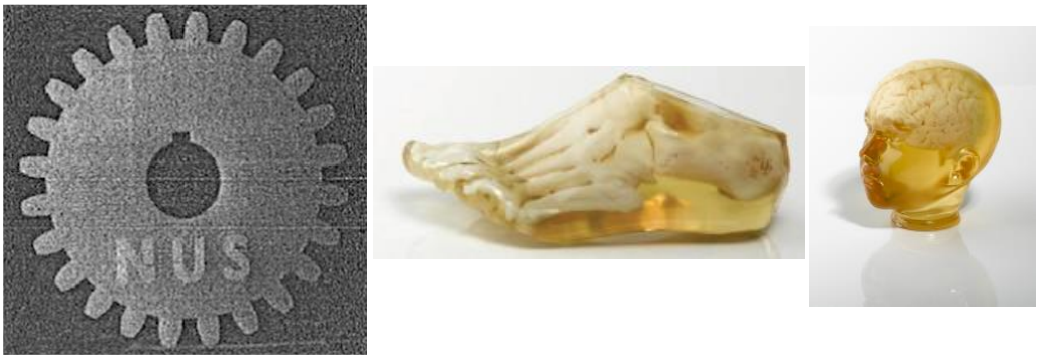
2.6. Çok Püskürtmeli Modelleme – MJM (Multi Jet Modelling)

Çok püskürtmeli modellemede, ardışık, ince tabakalarda malzeme damlacığı biriktirecek birçok baskı başlığı kullanılır. İki önemli MJM tekniği vardır:Termojet, 96 elemanlı bir baskı başlığı, mum damlacıklarını biriktirir (Şekil 12). Oldukça hızlı üretim yaptığındanbu sistemlermühendislik ve tasarım bürolarındaki çabuk şekillendirme çalışmaları(kavram modelleme) içinkullanılmaktadır. Ancak, mum modeller aynı zamanda hassas dökümlerde ana modeller olarak da kullanılabilir. Şekil 13'de erime sıcaklığının 10 derece üstünde (80 derece) ısıtılmış balmumu yazdırma örneği görülmektedir. 13 – 60 µm kalınlığında katmanlar üst üste yazdırılmak suretiyle elde edilen modelde işlem damlacık boyutu, damlacık hızı ve çizgiler arası boşluk parametrelerinin değişimiyle kontrol edilmektedir.İkinci yöntem (Invision), bir baskı başlığı iki ayrı malzeme püskürtür. Bunlar; akrilik esaslı bir UV-duyarlıfotopolimer model malzemesi ve modele destek sağlayacak mum benzeri bir malzemedir. Modeller oldukça kaliteli olduğundan, üretim hız (ve yüzey işlem) uygulamaları, ön prototiplerden kavram öneri maketleri veya satış modellerine kadar değişir.Ticari makinalarda balmumu ve akrilik esaslı fotopolimerler kullanılmakla birlikte araştırma bazında diğer polimerler, metal ve seramik malzemelerde kullanılmıştır[29-31].Yaygın damlacık oluşturma metodlarında yazdırılabilir viskozite eşik değeri 20 – 40 cp olarak belirlenmiştir. Yüksek viskoziteli bir akışkan püskürtülebilmesi için viskozitesinin düşürülmesi gerekir. Bunun için ısı yada sıvı içinde başka kimyasal yada bileşen kullanılır.

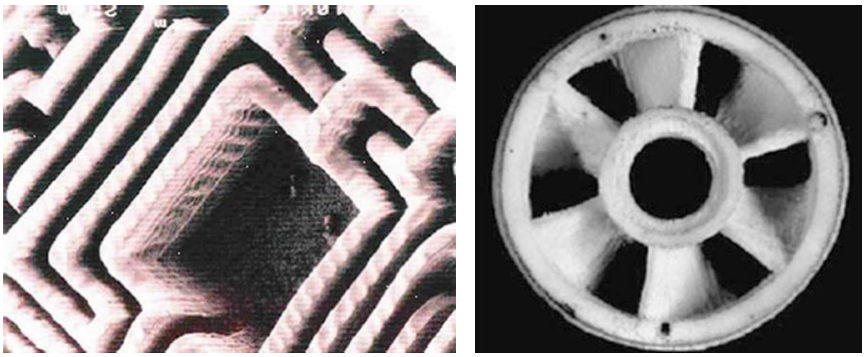
Mükemmel yüzey kalitesi ve karmaşık parça üretiminin mümkün olması, lazer kullanan sistemlere göre daha hızlı ve ucuz olması çok püskürtmeli modelleme tekniğinin avantajlı özellikleri arasında sayılabilir [1-3, 13]. Viskozite sınırlaması, malzeme püskürtmede damlacık oluşumunun en sıkıntılı tarafıdır. Yüksek viskozite problemine en çok kullanılan çözüm malzemeyi viskozitesi kabu edilebilir değere düşene kadar ısıtmadır.



Şekil 12. Çok Püskürtmeli Modelleme işleminin şematik gösterimi [13].
(Figure 12. Schematic representation of multi jet modelling process)



Şekil 13. MJM ile üretilmiş balmumu dişli ve akrilik fotopolimer medikal modeller [28,33].
(Figure 13. Wax gear and acrylic photopolymer models fabricated by multi jet modelling)

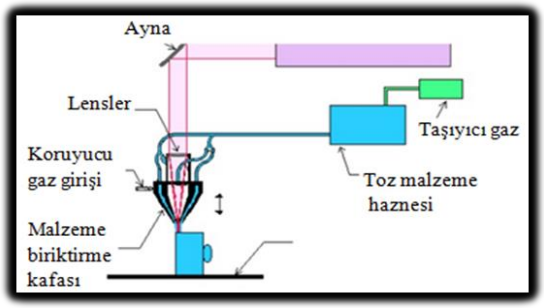


(a) (b)

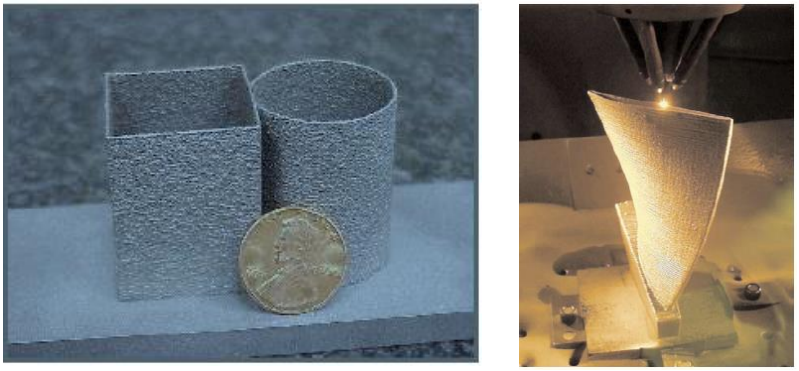
Şekil 14. MJM ile üretilmiş (a) Zirkonia dikey duvar desni ve (b) Alümina fan [32].
(Figure 14. Zirconia vertical walls (a) and alumina impeller (b) fabricated by MJM)

2.7. Lazerle Yapılan Net Biçimlendirme – LENS (Laser Engineered Net Shaping)

LENS'de bir lazer ışığı, bir metal alt malzemeye yansıtılarak üst yüzeyde ince bir ergiyik havuzu elde edilir. Arkasından bir biriktirme kafasından, ergiyik havuzuna metal (toz veya ince tel) sağlanır (Şekil 15). Tarama şeklinde platform hareket ettirilerek nesneye ait her bir tabaka oluşturulur. Ergiyik havuzunu atmosferik oksijenden koruyamak ve daha iyi yüzey akışkanlığı ile tabakalar şeklinde yapışma sağlamak içinatıl bir gaz kullanılır.Tam yoğunluklu metal parçalar (paslanmaz çelik, alüminyum, bakır, krom-demir alaşımı, titanyum vb.) LENS'le yapılabilir. Hatta malzeme oluşumunu dinamik olarak değiştirmek bile mümkündür -ki bu durum geleneksel imalat yöntemlerinden üstün özellikte nesneler oluşturur. Üretilen parçalar net biçimlendirmeye yakın olmakla birlikte genelde ek işlemlere ihtiyaç olur. LENS uygulamaları, enjeksiyon kalıp parçaları ve türbin kanatları gibi hava araç parçalarını içerir, Şekil 16.Komponentlerin performans ve servis ömrünü artırmak için korozyon ve aşınmaya dayanıklı metallerle kaplamada da kullanılır (Ti biyomedikal implantların TiC kaplanması gibi).LENS ile gerçek (metal) parçalar üretilebilir ve mikroyapı kontrolü mümküdür (sadece toz besleme karışımı ve işlem parameterelerindeki değişim ile malzeme kompozisyonu ve katılaşma oranı değiştirilerek özel mikroyapılar elde eilir)[1-3, 14]. Yüksek yoğunlukta parçalar üretilmesine karşın yüzey kısmi erimiş tozların yapışmasından dolayı genelde gözenekli olur. Ayrıca proses oldukça yavaştır (tipik olarak 25-40 g/saat). Daha yüksek hızlarda çözünürlük ve yüzey pürüzlülüğünde bozulma olur.



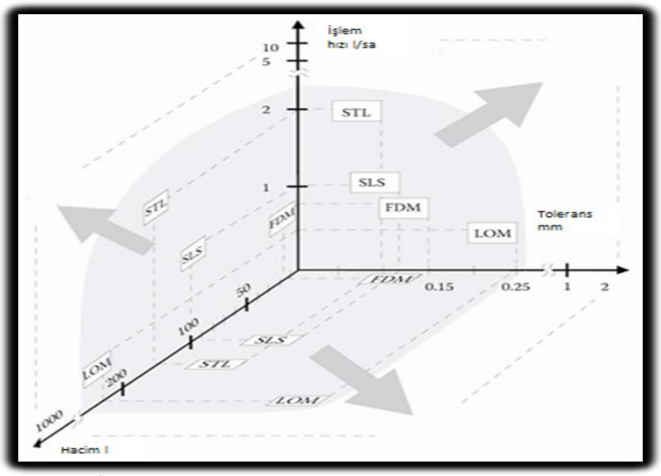
Şekil 15. Lazerle Yapılan NetBiçimlendirme (LENS) işleminin şematik gösterimi [14].
(Figure 4. Schematic representation of LENS process)



Şekil 16. LENS ile üretilen parçalar
(Figure 16. Part fabricated by LENS)

2.8.Eİ/HPO Teknolojilerinin Genel BirKarşılaştırması(A general comparison of AM/RP Technologies)

Eİ ve/veya HPO teknolojilerine ait genel bir tasnif daha önce yapılmış ve Şekil 1'de verilmişti. Burada kullanılan malzeme yapıları esas alınmış ve sıvı, katı ve toz bazlı olarak üçe ayrılmıştı. Diğer önemli bir mukayese ise işlem hızı, hacim ve tolerans parametrelerine göre yapılabilir. Burada referans alınan [7] nolu kaynağa göre: İşlem hızı (litre/saat olarak) en hızlı yöntem STL, en büyük hacim olarak LOM ve en hassas toleranslar ise SLS yöntemi ile elde edilmektedir (bu kaynakta LENS yer almamakta, yerine EBM bulunmaktadır) [15-17].



Şekil 17.Eİ/HPO teknolojileriniişlem hızı, hacim ve tolerans parametrelerine göre karşılaştırma[7].
(Figure 17. Comparison of AM/RP technologies according to processing speed, volume and tolerance parameters)

İncelenen Eİ/HPO teknolojilerinin daha ayrıntılı bir tasnif ve karşılaştırılması ise Çizelge 1'de verilmektedir (Bu çalışma [18] nolu kaynaktaki 4 tekniği içeren karşılaştırmayı 7'ye çıkartmaktadır). Bu karşılaştırma çalışmasına göre genelde LENS metalik (belirli oranda 3DP ve LOM da), diğerleri ise metal dışı malzemeler kullanmaktadır. Çekme dayanımı yine LENS ile oluşturulan parçalarda en iyidir. Çözünürlük açısından SLA, MJM ve LENS teknolojileri; ince cidarlı modeller oluşturmada ise sadece LENS iyidir. Kaliteli yüzey elde etmek için genelde ek ve ikinci işlemler gerekmektedir. Gerçek parça yapımı ve seri üretim de sadece LENS yöntemi ile mümkündür. Tüm bu teknolojilerde üretim süresi hala oldukça zaman almaktadır. Üretim maliyeleri de makul düzeyde olmayıp nispeten SLA ve 3DP teknolojilerinde ucuzken, LENS'te ise pahalıdır [19].

Çizelge 1. İncelenen Eİ/HPO teknolojilerininçeşitli açılardan karşılaştırılması - [18]'den uyarlanmıştır.
(Table 1. Comparison of AM/RP technologies from various angles - adoped from [18])

Eklemeli İmalat/Hızlı Prototip Oluşturma Teknolojilerinin Karşılaştırılması							
Kriter / Teknik	**SLA-1**	**SLS-2**	**FDM-3**	**3DP-4**	**LOM-5**	**MJM-6**	**LENS-7**
Kullanılan Malzeme	UV işlemli fotopolimer	Lazer işlemli naylon	Plastik, ABS, PC, PPSF vb.	Alçı toz + sıvı yapışkan	Kağıt, plastik vb.	UV işlemli fotopolimer	Çelik, bakır, ali. titan. vb.
Çekme Dayanımı	Vasat	Zayıf	Vasat	Zayıf	Zayıf	Vasat	İyi
Çözünürlük	İyi	Vasat	Zayıf	Vasat	Vasat	İyi	İyi
İnce cidar	Vasat	Vasat	Zayıf	Vasat	Zayıf	Vasat	İyi
Tolerans	İyi	Vasat	İyi	Vasat	Vasat	İyi	İyi
Yüzey Kalitesi	Ek yüzey işlemi	Ek yüzey işlemi	Sınırlı	Ek yüzey işlemi	Ek yüzey işlemi	Ek yüzey işlemi	İyi
İkinciYüzey Kalitesi	Boyama Tampon baskı Kaplama	Boyama Tampon baskı Kaplama	Boyama Tampon baskı Kaplama	Boyama İnfiltrasyon (reçine emdirme)	Boyama Kaplama	Boyama Tampon baskı Kaplama	Zımpara Kaplama
İşlevsel Örnekler	Yok	Yok	Sınırlı	Yok	Yok	Yok	Var
Tasarım Kanıtlama	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Metale Uygulanabilme	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Yok	Var
Çok Malzemeli Parça	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Var
Kalıp Gerektirme	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
Seri Üretim İşi	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Üretim Günü	1-3	1-3	1-3	0,5-1	1-3	1-3	1-2
Parça Maliyeti	$$	$$$	$$$	$$	$$$	$$$	$$$$

3. Eİ/HPO TEKNOLOJİLERİNİNGENEL PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ (GENERAL PROBLEMS OF AM/RP TECHNOLOGİES AND SUGGESTİONS FOR SOLUTİON)

Bu çalışma kapsamında tanıtılan Eİ/HPO teknolojilerinin uygulanması esnasında birçok genel ve özel problemler ile karşılaşılabilir. Çizelge 2'de olası bu tür problemler ve bunlara ait çözüm önerileri verilmektedir. Her bir özel teknolojide karşılaşılan sorunlar belirli ölçüde farklılıklar göstermekle birlikte genelde bunlar; işlem hızı, yüzey kalitesi, parça dayanım veya kırılganlığı, hassasiyet, maliyetler, ek veya yüzey işlemleri vb. şekilde özetlenebilir. İncelenen teknolojilerden SLA, sıvı reçineden tabakalar şeklinde modeli oluşturma ve fırında

sertleştirmeyi içerir. Zayıf, kırılgan olur ve destek malzemesi gerekir. SLS, bir zemin üzerine tozu serme, ısıtarak ergitme, yapıştırma ve soğutarak katılaştırmaya dayanır. Yüzey kalitesi iyi olmaz, destek gerekmez ve birçok malzeme kullanılabilir. FDM ise plastik teli merdane başlıkta ısıtarak ergitme, zemin üzerine yayma ve soğutarak katılaştırmayı içerir. Sessiz ve hızlı çalışır, destek gerekir ve birçok malzeme kullanılabilir. 3DP'de toz tabaka bir platforma serilir, bir yapışkanla bağlanır ve sonra desen üzerinde biriktirilir. Yüzey kalitesi iyi olmaz ama birçok malzeme kullanır ve geniş bir uygulama alanı vardır. LOM, rulo halindeki kağıt yaprağı bir platforma yerleştirme, silindir ile ısıtarak ergitme ve lazerle kesilen deseni oluşturma esasına dayanır. Yüzey kalitesi iyi olmaz, ek işlem gerekir ve büyük parça yapılabilir. MJM, küçük damlacıklar şeklinde modeli oluşturma ve sertleştirmeyi içerir. İyi yüzey kalitesi, hızlı işlem ve karmaşık model ütme mümkündür. Son olarak LENS'te ise metal malzeme lazerle ergitilir, zemine yayılır ve katılaşır. Gerçek parça üretilir, birçok malzeme kullanılır ve ek işlem gerekir [20-26].

Çizelge 2. Eİ/HPO teknolojilerinin genel problemleri ve çözüm önerileri [20-26].
(Table 2. General Problems of AM/RP technologies and suggestions for solution)

Eİ/HPO Teknolojilerinin Genel Problemleri ve Çözüm Önerileri		
T	**Karşılaşılan Problemler**	**Çözüm Önerileri**
SLA-1	Zayıf/kırılgan olduğu için işlevsel testler yapılamaz	Model yapısını güçlendirecek malzeme geliştirilmeli
	Katılaşma süresi ve güneşe maruz kalmaya bağlı parçalar bozulabilir	Katılaştırma süresini kısaltacak karışımlar geliştirilmeli ve mevcut ürünler güneşte fazla bırakılmamalı veya kaplama yapılmalı
	Karmaşık modeller yapılır ama üretilemeyebilir	İmal durumunu değerlendirecek yazılım geliştirilmeli
	Alternatifi malzeme kullanımı sınırlıdır	Alternatif malzeme geliştirilmeli
	Destek yapıları ve ek işlemler gerekir	Malzeme alanında iyileştirmeler yapılmalı
	Katılaşmayan malzeme zehirli olabilir	Malzeme ile direk temas edilmemeli ve ortam temiz tutulmalı
SLS-2	Toza dayalı olduğundan parça yüzeyleri pürüzlü olur	Hassas yüzeyli parçalarda tercih edilmemeli veya yeni işlemler(yüzeyi iyileştirecek) geliştirilmeli
	Zayıf mekanik özellikleri olduğu için (konuma bağlı) işlevsel testler yapılamaz	Model yapısını güçlendirecek malzeme geliştirilmeli veya uygun model yapım konumu seçilmeli
	Toz şeklinde fazla reçine çeşidi yoktur	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
	Model ve imalat parçaları arasında fark olabilir	Modeli imalat için değerlendirecek yazılım gerekli
	Tozu ısıtmak parçayı soğutmak gerekir	Isıtma/soğutma dengesi iyi ayarlanmalı
	Zehirli gaz oluşabilir	Ortam temiz tutulmalı
FDM-3	İşlem yavaş ve yüzey kalitesi kötüdür	İşlem hızı, katman kalınlığı (yüzey kalitesi) ve malzeme alanında iyileştirmeler yapılmalı
	Model veimalatparçaları arasında fark olabilir	Modeli imalat için değerlendirecek yazılım gerekli
	Kırılgan unsurlar için parça konumu önemlidir	Uygun model yapım konumu seçilmeli
	Düşey doğrultuda dayanım zayıftır	Uygun konum seçilmeli
	Mevcut malzeme termoplastiklerle sınırlıdır	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
3DP-4	Malzeme çeşidi sınırlı	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
	Çözünürlük düzeyi kötü (en kötü)	Malzeme püskürten meme sık ve fazla olmalı
	Yetersiz mekanik özellikler	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
LOM-5	Genelde kâğıt malzeme kullanılır ve karmaşık parçalar zor yapılır	Karmaşık model yapımında kullanılmamalı ve malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	Model kısa zamanda bozulabilir	Ek işlem hemen yapılmalı
	Genelde ateş zarar verebilir	Ateş veya sıcak ortamlardan uzak durulmalı
	Atık malzemeyi çıkartmak zor olur	Model yapım aşamasında işlem planlama yapılmalı
	Düşey oluşum diğer teknolojiler kadar iyi değil	Uygun konum seçilmeli
	Alternatif malzeme çeşidi sınırlı	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	Rutubette karşı sızdırmazlık önlemi gerekli	Model kaplanmalı veya boyanmalı
MJM-6	Zayıf dayanımlı plastik malzeme	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	İmalatı değerlendirme mümkün değildir	Malzeme püskürten meme sık ve fazla olmalı
	Damlacık malzeme birikmesi kontrolü	Yüzey gerilimi artırıcı malzeme geliştirilmeli
LENS-7	Yüzey kalitesi kötüdür ve genelde ek işlem gerekir	İnce malzeme toz tanecikleri geliştirilmeli
	Mekanik özellikler zayıftır	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	Maliyet yüksektir	Maliyeti azaltma çalışmaları yapılmalı

4. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bu makalede Eİ/HPO teknolojileri alanında yapılan teorik bir çalışma sunulmaktadır. Önce bu teknolojilerin genel tanıtım, gelişmesi ve önemi ele alınmıştır. Daha sonra günümüzde halen yaygın olarak kullanılan 7 farklı yöntem tek tek ve daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bunların genel ve temel özelliklerini çeşitli açılardan karşılaştıran ve değerlendiren bir çalışma yapılmıştır. Son olarak da incelenen bu Eİ/HPO teknolojilerinin kullanımları esnasında karşılaşılan çeşitli problemler belirlenmiş ve bunların giderilmesi veya etkilerinin azaltılması amaçlı çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu çalışmanın konuya ilgi duyan ve öğrenmek isteyen araştırmacılara temel düzeyli bilgi sağlayacağı, bu alanda akademik çalışma yapmak isteyenlere kılavuzluk edecek genel bir referans görevi ifa edeceği umulmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Raja, V. and Fernands, K.J. (Editors), Reverse Engineering – An Industrial Perspective,Springer, London, UK, 2008.

[2] Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B., Additive Manufacturing Technologies – 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer, 2nd ed., London, UK, 2015.

[3] Wong K.W. and Hernandez, A., A Review of Additive Manufacturing, ISRN MechanicalEngineering, Volume 2012, Article ID 208760, 10 pages, 2012.

[4] http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/

[5] https://en.wikipedia.org/wiki/Rapid_prototyping

[6] https://www.nsf.gov/about/history/nsf0050/manufacturing/rapid.htm

[7] http://mmadou.eng.uci.edu/class_mae165.html

[8] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695597001375

[9] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607632405

[10] Dolenc, A., An Overview of Rapid Prototyping Technologies in Manufacturing, Helsinki University of Technology, 1994 (source unknown).

[11] http://www.powershow.com/view/11e4b4-ZjljY/Rapid_Prototyping_by_Layered_Manufacturing_powerpoint_ppt_presentation

[12] https://www3.nd.edu/~rroeder/ame50542/slides/rapidprototyping.pdf

[13] http://www.protec3d.de/3d-drucken/

[14] http://www.docfoc.com/rapid-prototyping-ime-545-case-study-contents-what-is-rapid-prototyping-rp

[15] http://www.naun.org/main/NAUN/mcs/16-591.pdf

[16] http://www.wseas.us/e-library/conferences/2012/Kos/CIRSYS/CIRSYS-42.pdf

[17] http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/f786439a4c53fb78c125709f0055702f/v11a_rapidprototyping.pdf

[18] http://www.phillipsmedisize.com/sites/default/files/whitepaper/Prototyping%20White%20Paper.pdf

[19] Bandyopadhyay, A. and Bose, S. (Editors), Additive Manufacturing, CRC Press, USA, 2015.

[20] Hausman, K.K. and Horne, R., 3D Printers for Dummies, John Wiley & Sons, Inc., Int. ed., 2014.

[21] Gebhardt, A., Understanding Additive Manufacturing – Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing, Hanser, USA, 2012.

[22] Evans, M.A., The Integration of Rapid Prototyping Within Industrial Design Practice, PhD Thesis, Loughborough University, UK, 2002.

[23] Vaezi, M., Seitz, H. and Yang, S., A review on 3D micro-additive manufacturing technologies, Int. J. of Adv. Man. Tech., Vol. 67, pp. 1721-1754, 2013.

[24] Herderick, E., Additive Manufacturing of Metals: A Review, Mat. Sci. & Tec, pp.1413-1425, 2011.

[25] Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N. and Yadollahi, A., An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modelling and diagnostics, Additive Manufacturing, pp. 36-62, 2015.

[26] Thompson, S.M.et al., An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing;Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization andcontrol, Additive Man., pp. 12-35, 2015.

[27] Kawata, S., Sun, H., Tanaka, T., Takada, K., Finer features for functional microdevices. Nature 412:697-698

[28] Feng W, Fuh J, Wong Y (2006) Development of a drop-on-demand micro dispensing system. Mater Sci Forum 505–507:25–30

[29] Tay B, Edirisinghe MJ (2001) Investigation of some phenomena occurring during continuous ink-jet printing of ceramics. J Mater Res 16(2):373–384

[30] Liu Q, Orme M (2001) High precision solder droplet printing technology and the state-of-theart. J Mater Process Technol 115:271–283

[31] Priest JW, Smith C, DuBois P (1997) Liquid metal jetting for printing metal parts. In: Solid freeform fabrication symposium, Austin, TX, 11–13 Aug, pp 1–9

[32] Ainsley C, Reis N, Derby B (2002) Freeform fabrication by controlled droplet deposition of powder filled melts. J Mater Sci 37:3155–3161

[33] http://www.stratasys.com/

[34] Kawata S, Sun H, Tanaka T, Takada K (2001) Finer features for functional microdevices. Nature 412:697–698