

HIZLI PROTOTİPLEME TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

İsmet ÇELİK¹, Feridun KARAKOÇ¹, M. Cemal ÇAKIR², Alpaslan DUYSAK³

¹Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya

²Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

³Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kütahya

Geliş Tarihi:10.05.2013 Kabul Tarihi:02.08.2013

ÖZET

Endüstride yaygın olarak kullanılan geleneksel imalat yöntemleri talaşlı imalat yöntemleri olarak tornalama, frezeleme, delme, vargelleme, taşlama vb, talaşsız imalat yöntemleri olarak da döküm, plastik şekil verme ve kaynak olarak genelleştirilebilir. Bunların dışında elektroerozyon, lazer, ultrasonik, basınçlı su jeti ve plazma ile işleme gibi alışılmamış ileri imalat yöntemleri de kullanılmaktadır. Son yıllarda imalat sektörüne giren ve hızla gelişen sıra dışı bir imalat yöntemi de hızlı prototiplemedir. Bu çalışmada, dünyada ve ülkemizde kullanılmakta olan 10 adet hızlı prototipleme teknolojisi ve uygulama alanları açıklanmış, imal edilen parçaların mukavemeti, pürüzlülüğü ve çözünürlük gibi özellikleri karşılaştırılmış ve proses boyunca uygulanan ön ve son işlemler açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: *Hızlı prototipleme, eklemeli katmanlı imalat, katı modelleme.*

RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGIES AND APPLICATION AREAS

ABSTRACT

Machining methods, widely used in industry, can be generalized into traditional manufacturing methods such as turning, milling, drilling, shaping, grinding and into chipless manufacturing methods including casting, plastic forming and welding. In addition, electrical discharge machining, laser, ultrasonic, high pressure water jet and plasma processing are known as untraditional advanced manufacturing methods. In recent years, an unusual method named as rapid prototyping manufacturing has been developed rapidly and has become the center of attention in the manufacturing sector. This paper studies ten different rapid prototyping techniques with their application areas. These techniques are compared in terms of strength, roughness and resolution. The paper also explains pre and post processing operations applied throughout the process.

Keywords: *Rapid prototyping, additive layer manufacturing, solid modeling.*

1.GİRİŞ

Tasarımcılar, CAD yazılımlarından yararlanarak 3D tasarım yapabilirler. Genelde çok karmaşık olmayan modellerin tasarım sürecinde, tasarım esnasında tasarım hataları görülebilir ve gerekli düzenlemeler yapıp tasarım tamamlanır. Fakat karmaşık yapıya sahip 3D modellerin veya çok parçalı montaj gruplarında, montajın yapılabilirliği ve sistemin çalışabilirliği açısından 3D modellerin prototiplerini yapmak gerekir.

Hızlı prototipleme, bu alanda tasarımcıların ihtiyacına cevap vermektedir. Prototip üretiminin amacı imalat öncesi, tasarımın doğruluğunun, estetikliğinin ve işlevsel yönden yeterliliğinin değerlendirilmesi, tasarlanan modelin üretilebilirliği, montaj edilebilme ve sökülebilmeye olanaklarının değerlendirilebilmesidir[1].Kısa sürede üretim sayesinde otomotiv, havacılık, tıp ve ilaç sanayi gibi çok geniş bir kullanım alanına hizmet etmektedir. Son yıllarda prototip ürünler, özellikle medikal, elektronik ve otomasyon sistemlerinde direkt parça olarak kullanılmaktadır. Bu durumda bu yöntem, az sayıda üretim için, seri üretime göre daha ekonomik olduğundan tercih edilebilmektedir. Tasarımcılar3D modellerin kısa bir süre içinde prototiplerini imal edebilmek için hızlı prototip cihazlarını kullanırlar. Bu cihazlar alışılmış imalat yöntemlerinde olduğu gibi dolu malzemeden talaş kaldırarak değil, sıfırdan katman oluşturularak ve katmanları üst üste ekleyerek prototip üretirler.

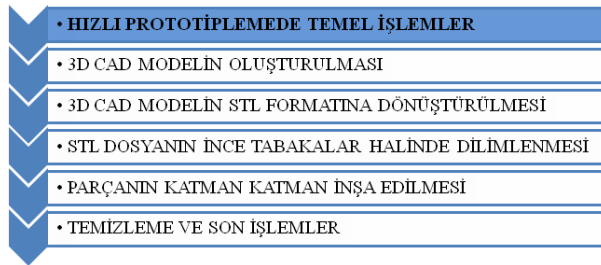
Prototip üretiminde kullanılan katmanlı imalat yöntemi, yaklaşık 50 yıl önce başlamıştır. Ancak topografya ve foto-heykelcilik alanında kullanımı 100 yıl öncesine kadar gider. Hızlı prototipleme, 3DCAD verisinden, plastik veya metal malzemeden modeller üreten cihazların teknolojisine verilen genel bir isimdir. Topoğrafya alanında 1890'larda kullanılmaya başlanan bu teknoloji [2], endüstriyel alanda 1951'de Munz'un önerdiği stereolitografi teknolojisiyle başlar [3]. Yine bu alanda 1968'de Swainson iki lazer ışınının kesişme bölgesinde elde edilen polimerizasyon yöntemini önerdi [4]. Ciraud, 1971'de modern eklemeli imalat teknolojisinin bütün özelliklerine sahip bir toz birleştirme yöntemi geliştirdi [5]. 1979'da R.F. Housholder, lazer ile toz sinterlemenin ilk tanımlamasını yaptı ve düzlemsel tabakaların sırayla biriktirilmesini ve her tabakanın katılmasını inceledi [6].

1980'lerin sonu ve 1990'ların başında, katmanlı imalat teknolojilerinin araştırma ve uygulama süreçlerinde artış olduğu görülür. Sonraki yirmi yıl içinde, birçok teknik alanda bu süreçleri ele alan araştırma toplulukları oluşmuştur. Katmanlı imalatın etkisi, hem ticari hem de bilimsel faaliyetler açısından büyüyerek devam etmiştir. Katmanlı imalat alanında, Dünya Teknoloji Değerlendirme Merkezi(WTEC) tarafından 1996yılındaAvrupaveJaponya'da iki çalışma yapıldı. Katmanlı imalatla ilgili teknolojilerin endüstriyel uygulamalarını vurgulayan yol haritası 2 yıl sonra tamamlandı. 2003 yılında, Avrupada'ki ekleme/çıkarma teknolojilerindeki faaliyet düzeyini belirlemek için WTEC tarafından bir çalışma daha yapıldı. Bu çalışmalardan çıkan raporlar önemli veriler sağladı ve 2009 yılındaki yeni araştırmalarla ilgili yol haritası için temel teşkil etti [7]. Türkiye'de ilk medikal kafatasıyüz implant tasarımı, imalatı ve cerrahisi uygulaması, 2003 yılında Cadem AŞ ve Amerikan Hastanesi'nden Opr.Dr.Sacit Karademir işbirliği ile yapıldı[8].Kafatasına ait CT verileri kullanılarak dokunsal duyulu 3D modelleme sistemi ile implant tasarımı yapıldı ve 3D yazıcı kullanılarak model elde edildi. Titanyum hassas dökümden sonra implant, Dr.Karademir tarafından yerleştirildi. Slovenya'daki Maribor Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ve Üniversite Klinik merkezi ile Ljubljana Üniversitesi Tıp Fakültesi öğretim üyeleri işbirliği ilekemik yapılarında kullanılabilecek implantların tasarımı ve hızlı prototipleme teknolojileriyle üretimi konusunda araştırma ve uygulama çalışmaları yapılmıştır[9]. Dünyada, 2008 yılı için katmanlı imalat teknolojileri ve servisleri için ayrılan bütçe toplam olarak yaklaşık 1.2 Milyar \$' dir. Katmanlı imalat teknolojileri için ayrılan bütçe son beş yılda her yıl yaklaşık %10 artmıştır [10].

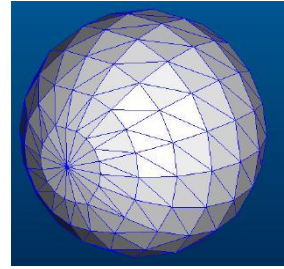
Bu çalışmada, katmanlı imalat teknolojisinin günümüzde ulaştığı 10 adet hızlı prototipleme teknolojisi ve uygulama alanları açıklanmış, imal edilen parçaların mukavemeti, pürüzlülüğü ve çözünürlük gibi özellikleri karşılaştırılmış ve proses boyunca uygulanan ön ve son işlemler açıklanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Hızlı prototipleme teknolojisi, imalat uygulamalarında, medikal/dentalimplant yapımında, kavramsal modellemede, doğrudan döküm kalıbı ve parça üretiminde, hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretiminde, mimari uygulamalarda, uzay/otomotiv sanayinde, hızlı kalıp imalatında, eğitim amaçlı her türlü donanımın yapımında vetakı sektörü gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Bir hızlı prototip üretiminde ilk adım, herhangi bir CAD yazılımı ile veya bir lazer ya da optik bir tarayıcı yardımı ile tersine mühendislik yaparak parçanın3D CAD modelinin oluşturulmasıdır. CAD yazılımları ile hızlı prototipleme makineleri arasında veri transferini sağlamak için bir veri ara yüzüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veri ara yüzü STL (STereoLithography) formatıdır.



Şekil 1. Hızlı Prototiplemede temel işlem basamakları



Şekil 2. STL verideki üçgen yüzeyler

CAD yazılımları tarafından oluşturulabilen, hızlı prototiplemede yaygın olarak kullanılan STL dosyaları, renk, doku veya diğer özniteliklerini temsil etmeyen 3D nesnenin yalnızca yüzey geometrisini üçgen yüzeyler kullanarak tanımlar. Düz yüzeyler az sayıda üçgen yüzeyle tanımlanırken, radyuslu yüzeyler çok sayıda küçük üçgen yüzeylerden oluşur. STL dosya formatına çevrilen dosya, hızlı prototip sistemlerinin yazılımlarına aktarılır. STL dosya formatına çevrilirken modelde oluşabilecek hatalar kontrol edilir. Üçüncü adımda model, makinenin özelliğine ve parça hassasiyetine bağlı olarak dilimlere bölünür. Her dilim, modelin ilgili kesit alanını temsil etmektedir. Dolayısıyla bir dilim kalınlığı iki kesit arası mesafe kadardır. Bu kesit alanları birbirlerinden bağımsız olarak fakat ardışık bir şekilde ele alınarak çeşitli tarama yöntemleri kullanılarak tarama yolları hesaplanır. Çok çeşitli şekillerde tarama yöntemleri mevcuttur. Belirli bir eksene veya modelin herhangi bir kenarına paralel veya açılı bir şekilde birbirine paralel hatlardan oluşan veya modelin dış konturları referans alınarak merkez noktasına doğru spiral bir şekil takip eden hatlardan oluşan tarama şekilleri vardır. Fakat genelde hepsinin ortak noktası, dış konturu takip eden bir hatla çevrelendikten sonra arada kalan boşluğun istenilen tarama metoduyla taranmasıdır. Dış konturların taranma şekli yüzey pürüzlülüğünü ve ölçüsel tamlığı birebir etkiler. Çünkü imalat aşamasında dilimler ele alınmaktadır. Sadece, başka bir dilim tarafından üzeri kapatılmamış dilimlerde dış konturların yanı sıra dilimin tüm alanının taranma şekli ve hassasiyeti parametreleri etkileyen önemli kriterlerdir [11].

Dördüncü adım ise parçanın inşa edilmesidir. Birçok teknikten birini kullanarak, hızlı prototipleme makineleri katman katman modeli inşa eder. Kullanılan malzemeler ilk başlangıçta, sıvı, katı veya toz

halindedir. Son ve beşinci adım ise parçanın makineden uzaklaştırılması, varsa destek malzemelerinin ayrılması, yüzey temizleme ve işleme, boyama vs. gibi işlemleri kapsar.

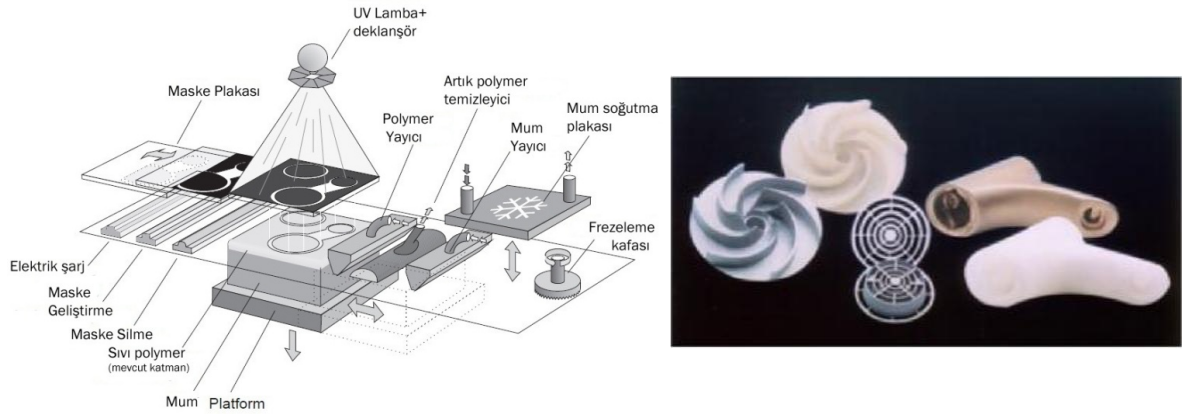
Hızlı prototipleme sistemlerinde çok sayıda sınıflandırma yapılabilirken, bunlardan en iyisi, prototip üretiminde kullanılan malzemenin başlangıçtaki durumuna göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre hızlı prototipleme sistemleri (1)sıvı esaslı (2)katı esaslı ve (3)toz esaslı olmak üzere 3 gruba ayrılabilir.

Sıvı esaslı hızlı prototipleme sistemlerinde malzeme başlangıçta sıvı durumdadır. Işık, lazer ya da ısıyla yaygın olarak bilinen bir kütleme/sertleşme süreci sayesinde sıvı, katı hale dönüşür. Bu kategoriye giren sistemlerinden bazıları şunlardır: (1)3D Systems Stereolitograficihazı(SLA), (2) Objet GeometriesLtdPolyjet, (3)D-MEC Ltd Solid creationsystem(SCS), (4) Envision TEC Perfactory, (5)Autostrade E-Darts, (6)CMET Katı nesne ultraviyole lazer yazıcı, (7) Envision TEC Bioyazıcı, (8)Hızlı Dondurarak Prototipleme (RFP),(9) Microfabrica EFAB, (10)D-MEC Ltd ACCULAS,(11)Cubital Katı Tabaka Kütleme(SGC).

Bu teknolojiler fotokütleme yöntemini kullanır ve bu yöntemde 3 metot vardır. Tek lazer ışın metodu yaygın olarak kullanılan metottur ve (1),(3),(5) ve (6)nolu teknolojiler bu metodu kullanır. Cubital'ın SGC metodu(11), UV maskeli lamba kullanırken, Objekt'in Polyjet'i(2), sıvıyı püskürtme kafalarıyla yerleştirdikten sonra UV lamba ile kütleme yapar.D-MEC'in ACCULAS'ı (10)dijital ayna aygıtı denilen farklı bir sistem kullanırken, Envision Tec'in Perfactory metodu(4) dijital ışık işleme denilen bir görüntüleme sistemi (DLP) kullanır. EnvisionTEC'in Bioyazıcısı (7) sıvı ortamda ekstrüzyon metodu kullanır. Hızlı dondurma(8) metodu su damlacıklarının, FDM'e benzer bir şekilde biriktirilmesi esasına dayanır. Microfabrica'nın EFAB teknolojisi(9) sıvı bir ortamda elektro-biriktirme metodunu kullanır.

Katı esaslı hızlı prototipleme sistemlerinde toz hariç katı haldeki malzemenin tüm formlarını kapsar. Bu bağlamda katı, tel(filament), rulo, tabaka ve granül şekilli olabilir. Bu kategoriye giren sistemler şunlardır: (1) Stratasys Ergiyik Biriktirme Modelleme Tekniği(FDM), (2)Solidscap Benchtop sistemi, (3) CubicTech. Tabakalı Parça imalatı(LOM), (4)3D Systems Çok Jetli Modelleme Sistemi(MJM), (5)Solidimension Plastik Levha Tabakalama(PSL), (6) Kira Ltd.Kâğıt Tabakalama Teknolojisi(PLT), (7)EnnexCo. offset fabbers, (8)Şekil Biriktirme İmalat Prosesi(SDM). Bu sistemlerde 2 metot mevcuttur. (1),(2),(4) ve (8) ergime ve katılaşma ya da eriyerek yapışma(fusing) şeklinde olup, (3),(5),(6) ve (7) kesme ve yapıştırma ya da birleştirme şeklinde kullanılan metotlardır.

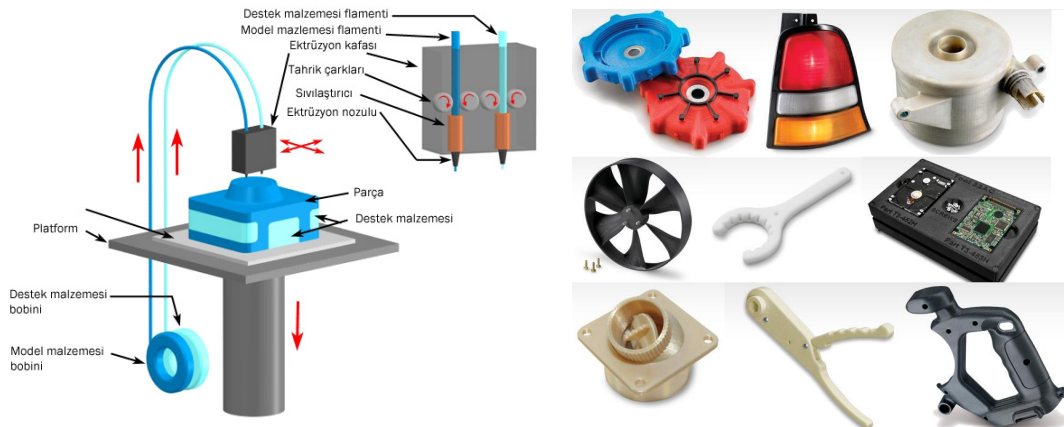
Toz esaslı hızlı prototipleme sistemlerinde toz genellikle katı haldedir. Bununla birlikte, tozun tane yapılı formundan dolayı katı esaslı prototipleme sistemlerinden farklı bir kategoride incelenmiştir. Bu sistemlerde toz tanelerinin birbirine bağlanması ara yüzeydeki tanelerin temas alanlarının eritilmesiyle ya da bir bağlayıcı veya yapıştırıcının eklenmesiyle elde edilir. Bu kategoriye giren sistemlerden bazıları şunlardır: (1)3D Systems Seçici Lazer Sinterleme (SLS),(2) Z Corp3D Yazıcı(3DP), (3)EOS EOSINT,(4) Optomec Lazerle Net Şekillendirme (LENS),(5) Arcam Elektron Işınli Ergitme(EBM), (6) Concept Laser Lazer Cusing, (7) MCP-HEK Tooling RealizerII Seçici Lazer Eritme(SLM), (8) Phenix Systems PM serisi (LS), (9)3D



Şekil 5. SGC sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar [18]

2.4. Ergiyik Biriktirme Modelleme Tekniği (FDM, Fused Deposition Modeling)

Bu proseste bir plastik veya mum malzeme parçanın kesit geometrisini izleyen bir nozul içinden ekstrüzyon edilir. Model malzemesi ince plastik tel (filament) şeklindedir. Bazen filament yerine haznededen beslenen plastik granül de kullanılmaktadır. Nozul, termoplastiği ergime noktasının hemen üzerindeki bir sıcaklıkta tutmaya yarayan bir ısıtıcı eleman içerir ve böylece plastik kolayca nozul üzerinden akar ve bir katman oluşur. Plastik nozuldan aktıktan sonra aniden sertleşir ve aşağıdaki katmana yapışır. Bir katmanın yapımı tamamlandıktan sonra platform aşağıya iner ve ekstrüzyon nozulu diğer katmanı inşa eder. Katman kalınlığı ve düşey boyut hassasiyeti ekstrüzyon nozulunun çapına bağlıdır. Bu çap 0.178 mm ile 0.356 mm arasında değişir. XY düzleminde 0.025 mm çözünürlüğe ulaşılabilir.



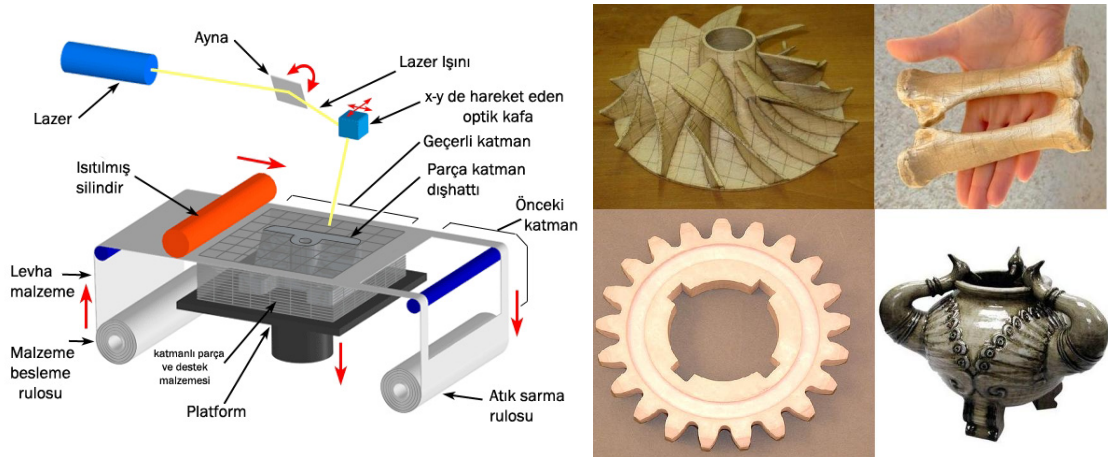
Şekil 6. FDM Sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar [18,21]

Bu teknik ile çok parçalı, hareketli mekanizmaların ve karmaşık parçaların imalatı mümkündür. ABS, poliamid, polikarbonat, polietilen, polipropilen ve hassas döküm mumu model malzemesi olarak kullanılabilir. Bu yöntemde model üretilirken destek malzemesi kullanılır ve farklı bir destek malzemesi kullanabilmek amacıyla sisteme ikinci bir nozul ve edilmiştir. Üretilen parçaların esnemeye, bükülmeye, kırılmaya ve uzamaya karşı yüksek dayanımı, suya ve neme karşı yüksek dirençleri, uygun maliyeti en belirgin özellikleridir. Fonksiyonel parçaların üretimi için uygundur.

2.5. Tabakalı Yapıştırırmalı Parça İmalatı (LOM, Laminated Object Manufacturing)

Sistemin ana bileşenleri, platform üzerindeki ince levhayı ileri süren bir besleme mekanizması, ince levhayı alt katmana basınç ve ısıyla bağlamak için ısıtılmış bir silindir ve her katmanda parçanın dış hatlarını kesen bir lazerdir. Parça, lazerle kesilmiş yapışkan kaplanmış ince levhanın bir önceki katmanın üstüne yapıştırılması ile üretilir. Bir lazer, her katmanda, parçanın dış hatlarını keser. Her kesim işlemi tamamlandıktan sonra platform ince levha kalınlığı kadar genellikle 0.05-0.5 mm kadar aşağıya iner ve başka bir ince levha, besleme mekanizması yardımıyla daha önceki katman üstüne ilerletilir. Platform daha sonra hafifçe yükselir ve ısıtılmış silindir yeni katmanı yapıştırmak için basınç uygular. Lazer parça dış hattını keser. Bu işlem parça tamamlanana kadar devam eder (Şekil 7). Katman kesildikten sonra kalan ekstra malzemeler, parçayı üretim boyunca desteklemesi için yerinde kalır. Bu yöntem ile üretilen parçalar Şekil 7'de görülmektedir.

LOM'da malzeme olarak kaplanmış kağıt, plastik köpük kullanılabileceği gibi seramik veya metal tozu emdirilmiş malzemeler de kullanılabilir. Malzemenin kolay ve ucuz temin edilebilirliği yöntemi avantajlı kılmaktadır. Tasarım ve parametrelerin doğru seçilmesiyle, her boyutta yüksek hassasiyete sahip prototip dışında yapısal ve işlevsel modeller de elde edilebilir. Büyük hacimli parçalar yüksek hızla işlenebilmektedir. Çevre dostu bir teknolojidir.



Şekil 7. LOM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar [18]

2.6. Çok Jetli Modelleme(MJM, Multi-Jet Modelling)

MJM tekniği, mürekkep püskürtmeli yazıcılardaki mürekkep püskürtmeye benzer bir teknikle yüzlerce nozula sahip baskı kafası kullanarak CAD verilerinden 3D plastik modeller üreten bir hızlı prototipleme tekniğidir. Bu teknikte mum benzeri termoplastik 300 dpi ve daha yüksek bir çözünürlükte ısıtılmış bir baskı kafası ile ince damla olarak püskürtülür ve hemen UV ışığı ile kürlenene malzeme sıcaklıkla katılır. Çıkıntılar için, düşük erime noktalı balmumundan yapılan, sonradan elle veya sıcak havayla uzaklaştırılabilen destek yapısı inşa edilir.

İlk katman tamamlandıktan sonra platform Z ekseninde aşağıya iner ve diğer katman inşa edilir. Bu proses model bitene kadar tekrarlanır. Yazıcı kafası X-Y ekseninde hareket ederken üretim tablası Z-ekseninde hareket eder(Şekil 8).

Biten modeller çok kolay bir şekilde makineyle işlenebilir, yapıştırılabilir veya kaplanabilir. Bu metotla telkari gibi yüksek detaylı parçalar, konsept modeller ve tasarım prototipi üretmek mümkündür. Gerekirse bu modelden örneğin bir vakum döküm yöntemi kullanılarak kalıp üretilebilir.

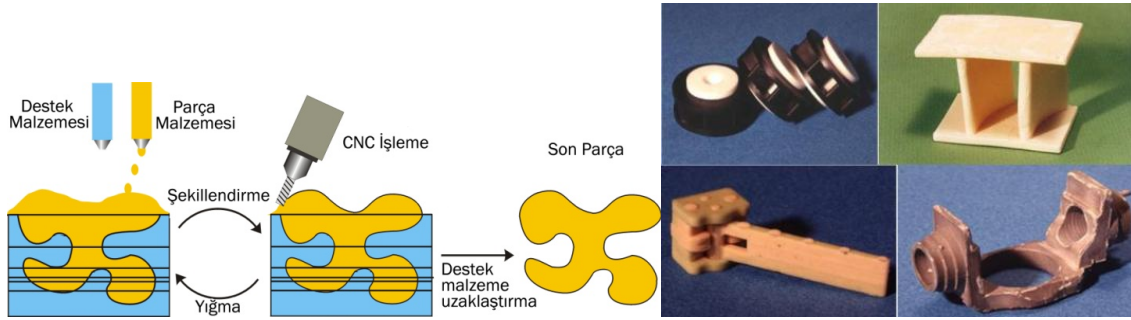
Bu teknoloji ile sert, esnek, siyah, şeffaf, yüksek sıcaklığa dayanıklı plastik parçalar üretilebilir.



Şekil 8. MJM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar[18,22]

2.7. Şekil Biriktirme İmalatı (SDM, Shape Deposition Manufacturing)

SDM, hassas malzeme işleme prosesinin avantajları ile katmanlı imalatın avantajlarını birleştiren hızlı prototipleme prosesidir. Proses Şekil 9 de görülmektedir. Malzeme, yığıma istasyonunda platform destek yüzeyleri arasına yığılır. Yığıma proseslerinden biri mikrodöküm denilen kaynak tabanlı yığıma prosesidir ve son yüzey nete yakın görünümündedir. Daha sonra şekillendirme istasyonuna alınır ve burada genellikle 5 eksenli bir CNC işleme merkezinde son şekil vermek üzere işlenir. Buradan parça, malzeme yığıma ve işleme esnasında oluşan gerilmeleri almak üzere bilyalı dövme (shot-peening) gibi işlemleri uygulamak üzere gerilme giderme istasyonuna transfer edilir. Proses parça tamamlanana kadar tekrarlanır. Geçici destek malzemelerinin uzaklaştırılmasından sonra parça son şeklini alır. Destek malzemeleri eritme ya da aşındırma işlemi ile modelden ayrılır.



Şekil 9. SDM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar [19]

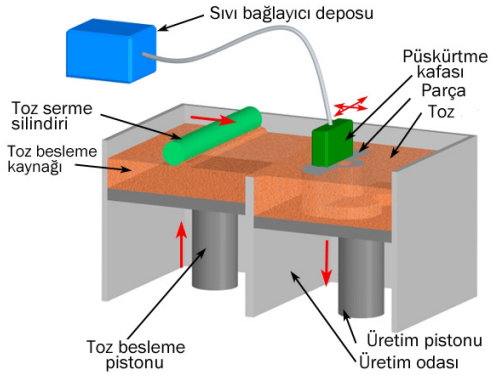
SDM teknolojisinde metal, plastik ve seramik tozlardan, doğrudan kullanılacak fonksiyonel parçalar üretilebilir. SDM de mikro döküm yığıma prosesi dışında, farklı malzemeleri kullanmaya olanak sağlayan bir çok alternatif proses mevcuttur(Çizelge 1).

Çizelge 1. SDM’de yığıma prosesleri, parça ve destek malzemeleri [18]

Yığıma Prosesi	Parça Malzemesi	Destek Malzemesi
Mikro döküm	Paslanmaz çelik	Bakır
Ekstrüzyon	Termoplastik, seramik	Suda çözünebilir termoplastik
İki parçalı reçine sistemi	Poliüretan,epoksi reçine	Mum
Sıcak mum	Mum	Mum
Fotokürlenabilir reçine	Fotoreçine	Suda çözünebilir reçine
MIG kaynağı	Çelik alaşımları	Bakır
Termal spreyleme	Metal,Plastik ve seramikler	Bakır

2.8. Seçici Lazer Sinterleme (SLS, Selective Laser Sintering)

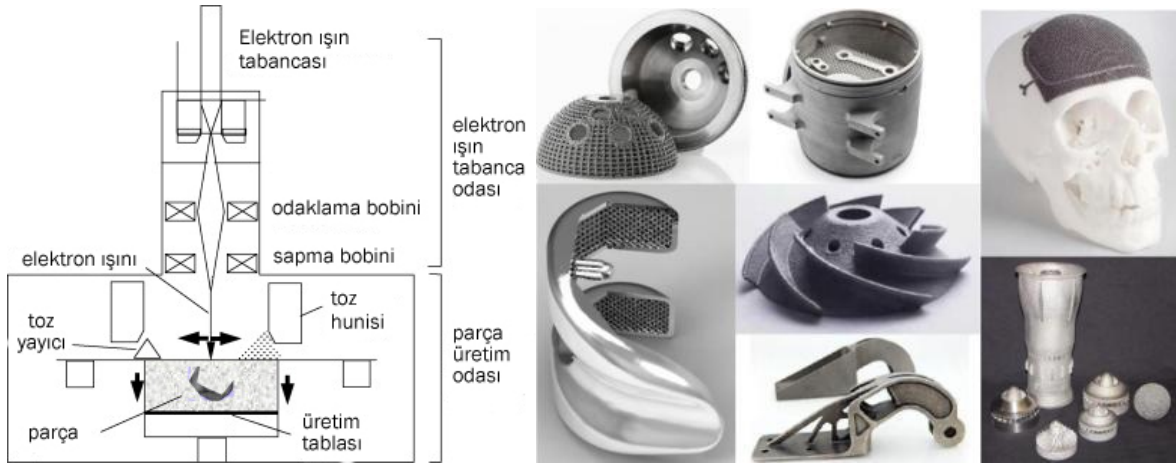
SLS prosesi, toz malzeme kullanarak, ısı oluşumunu sağlayan CO₂ lazer ile katman katman CAD verisinden 3D parçalar oluşturur. Isıtıldığında bir biri ile birleşebilen toz halindeki inşa malzemesi ince ve düz bir tabaka şeklinde katman kalınlığı kadar üretim tablası üzerine yayılır.CO₂ lazer,tarayıcı sistem aracılığı ile tabaka şeklindeki tozlar üzerinde seçilen bölgeleri tarar ve ilk katman inşası biter. Sonra diğer katman inşası için tezgah tablası altındaki platform, katman kalınlığı kadar aşağı iner. Toz yayıcı mekanizma aracılığıyla bir önce taranmış katmanın üzerine yeni katman kalınlığı kadar toz serilir ve lazer ile taranır. Bu işlem model oluşuncaya kadar devam eder. Sinterleme işleminin tamamlanmasından sonra sinterleme istasyonunun soğuması için bir süre beklenir. Sonra parça, tezgâh üretim tablası üzerinden alınır ve doğal destek görevi üstlenmiş tozlar, fırça veya vakumlu süpürge ile temizlenir(Şekil 10). SLS parçaları kumlama, isteğe bağlı boyama gibi son işlemlere ihtiyaç duyar. SLS sistemi, sinterleme istasyonunun dışında, kullanılmış tozun belirli oranda yeniden kullanılmasını sağlayan geri dönüşüm sistemini içerir.



Şekil 11. 3DP sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar [20,22]

2.10 Elektron Işınlı Ergitme (EBM, Electron Beam Melting)

EBM teknolojisi, tamamen yoğun metal tozlarını güçlü bir elektron ışını ile eriterek katman katman inşa eden bir prosesdir. Her bir katman, bir CAD modeli ile tanımlanan geometriye göre eritilmektedir. Bu teknolojide, yüksek erime kapasitesi ve yüksek verimliliğin gerekli olan enerjiyi üreten yüksek güçlü bir elektron ışını kullanılmaktadır. Elektronlar $> 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılan bir filamandan yayılır. Elektronlar toza vurduğunda kinetik enerji ısıya dönüşür. Bu ısı metal tozunu eritir. (Şekil 12). Elektronlar ışık hızının yarısı kadar hızla anota doğru hızlandırılmaktadır. Elektron ışını son derece hızlı ve doğru ışın kontrolü sağlar. Elektromanyetik bobinler tarafından yönetilmektedir. Ergitme bittikten sonra tabla dikey yönde aşağı iner ve yeni metal toz katmanı serilir. Bu işlemler model tamamlanıncaya kadar devam eder. Döküm ve dövmeden daha iyi malzeme özelliklerine sahip ve üzerindeki gerilmeler giderilmiş şekilde parçalar üreten EBM teknolojisi, vakum ve yüksek sıcaklıkta gerçekleşir. Vakum sistemi tüm üretim boyunca 10^{-5} mbar ve daha iyi basınç sağlar. Bu yöntemde metal (kobalt krom ve titanyum alaşımları) ve seramik malzemeler kullanılabilir. Yüksek mukavemeti, düşük yoğunluk ve üstün korozyon direnci ile titanyum ve alaşımları da, cerrahi ve tıpta, havacılık, otomotiv, kimya tesisi, enerji üretimi, spor ve diğer büyük endüstrilerde kullanılmaktadır. Bu yöntemle üretilen parçalar direkt kullanılabilir. Bu teknoloji, EBM makinelerine ek olarak kolay ve güvenli kullanım için yardımcı donanımlara ihtiyaç duyar. Bunlar patlamaya karşı korumalı elektrikli süpürge, toz taşıma arabaları ve toz geri kazanım sistemidir.



Şekil 12. EBM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar [18,24]

3. HIZLI PROTOTİP SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hızlı prototipleme teknolojileri günümüzde aşağıdaki alanlarda kullanılmaktadır. Bunlar;

1. **Mühendislik:** Doğru ve görsel karar verme mekanizması sağlamak için gerçek modelleme, prototip yapımı, kalıp tasarımı, analiz, tasarım döngüsündeki zamanı azaltmak, ürün geliştirmek, üretim maliyetini azaltmak, yeni ürünleri tanıtmak, mevcut ürün özelliklerini değiştirmek, kompleks parçaları üretebilmek, tasarım ve imalatın entegrasyonunu sağlamak.
2. **Medikal:** Vücut içinde teşhise yardımcı olan katı görüntüleme modelleri yapmak, tomografi verilerinden model ve protez yapımı.
3. **Dental:** Protez ve implant yapımı.
4. **Kuyumculuk:** Zahmetli el işçiliği gerektiren veya el ile yapımı mümkün olmayan karmaşık geometriye sahip mücevherlerin yapımı.
5. **Mimarlık:** Topoğrafik modelleme.
6. **Sanat:** El ile imalatı mümkün olmayan ya da zor olan sanat eserlerinin yapılması.
7. **Arkeoloji:** Arkeolojik buluntuların modellerinin yapılarak sergilenmesi.
8. **Matematik, Fizik, Kimya:** 3D katı nesnelerin yapılması, karmaşık molekül yapılarının yapılması.
9. **Eğitim:** Görsel eğitim araç gereçlerinin yapılması.

Mevcut prototip teknolojilerinin kullanılmasında hangi yönetimin seçileceği çok önemlidir. Çünkü cihazların ilk yatırım maliyeti önemlidir. Ayrıca CO₂ gazı, metal tozları, plastik tozları gibi kullanılacak sarf malzemelerinin maliyetleri de önemlidir.

Çizelge 2, endüstride kullanılan ve yukarıda açıklanan hızlı prototipleme sistemlerinin durumlarını karşılaştırmalı olarak özetlemektedir. Çizelgede temel çalışma esasları, kullandıkları yapı malzemeleri, ön ve son işlemler, üretilen parçaların bazı özellikleri, veri transfer dosyaları ve diğer temel özellikleri verilmiştir. Çizelge 2 hızlı prototipleme teknolojilerinin karşılaştırılmasına imkân vermektedir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada hızlı prototipleme teknolojileri genel olarak karşılaştırılmış ve aşağıdaki tespitler yapılmıştır:

- Uygulamada en yaygın kullanılan teknolojinin SLA olduğu görülmektedir. Bu yöntem yüksek doğrulukta, renkli parçalar üretebilmektedir. Ancak parçalarda çarpılma ve büzülme olabilmektedir. Metal model yapılamamaktadır.
- Mukavemetli parçalar yapılacağında SLS, FDM, EBM ve SDM teknolojileri tercih edilebilir. Özellikle SLS, EBM ve SDM teknolojileri metal model üretimini mümkün kılmaktadır.
- Büyük boyutlu modeller üretileceğinde LOM tercih edilir. Ancak modellerin mekanik özellikleri iyi değildir. MJM ve 3DP yöntemleri basit ve kolay kullanılabilen sistemler olup üretim hızları yüksektir.
- MJM sistemlerinde üretilen modellerin yüzeyleri daha düzgündür. 3DP sistemleri ile renklendirme yapılabilir.
- FDM, 3DP ve Polyjet sistemleri ofis ortamında rahatlıkla kullanılabilir. SGC sistemleri ise kütleli olarak ağır, büyük boyutlu olup ve bakım maliyetleri yüksektir.
- Fonksiyonel model üretiminde SLS, SLA, FDM, EBM ve SDM sistemleri avantaj sağlamaktadır. Hareket edebilen ve çok parçadan oluşan modellerin üretiminde FDM ve SGC yöntemleri ön plana çıkmaktadır.

Çizelge 2. Hızlı prototipleme yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Çalışma Esası	Kullandığı Malzeme	Ön işlemler	Son işlemler	Çözünürlük	Mukavemet	Pürüzlülük	Transfer dosyaları	AÇIKLAMA
SLS	TozunCO ₂ lazer ile sinterlenmesi	Poliamid, polistren, karbon fiber ve alüminyum katkılı poliamid, polikarbonat, paslanmaz çelik,kobalt krom,nikel krom,titanyum,seramik		Tozun uzaklaştırılması ve soğuma için bekleme süresi	Zayıf	İyi	Zayıf	STL	Geniş bir ürün yelpazesine hitap eden verimli ve hızlı bir imalat yöntemidir, Prototip kalıp üretim maliye-ti düşüktür ve çok miktarda parça üretebilir, malzeme değişimi zor.
SLA	Fotopolimer malzemenin UV ışını ile katılaştırma	Reçine bazlı malzemeler,akrilik,e poksi, polipropilen	Tabaka, destek oluşturma	Desteğin uzaklaştırılması	İyi	Orta	İyi	STL	Yüksek doğrulukta parça üretimi için tercih edilir, renklendirme yapılabilir, Yaygın kullanılır, parçalarda çarpılma ve bütülmeye olabilir.
FDM	Ekrüzyonla Yığıma Tekniği	ABS, poliamid, polikarbonat,polietilen,polipropilen ve hassas döküm mumu.	Tabaka, destek oluşturma	Desteğin uzaklaştırılması	Orta	İyi	Orta	STL	Ofis ortamında kullanılabilir. Çok parçadan oluşan, hareketli fonksiyonel, elastik modeller üretmek için uygundur. Parçalar suya ve neme dayanıklı, üretim maliyeti düşük, hızlı.Küçük parçalarda, detay bölgelerde ve ince kesitlerde çok iyi değıl.
LOM	Tabakaların Lazerle Kesilip Yapıştırılması	Kâğıt, plastik köpük, metal ve seramik tozu emdirilmiş malzemeler			Orta	Orta	Orta	STL	Büyük hacimli parçalar yüksek hızda üretilebilir, parçaların mekanik özellikleri iyi değıldir.
SGC	Foto maskeleme ve UV ışını ile katılaştırma	Fotopolimer, akrilik, mum		Mumun uzaklaştırılması	İyi	Zayıf	İyi	STL	Makineler büyük ve ağırdır, hareketli montaj halindeki parçaların üretimi için uygundur, küçük parçaların üretiminde ekonomiktir, doğruluk kalite ve malzeme çeşitliliği yetersizdir.
MJM	Çok jetli püskürtme ve UV ışını ile katılaştırma	Parafin, mum, termopolimerler	Tabaka, destek oluşturma	Desteğin uzaklaştırılması	İyi	Zayıf	İyi	STL	Temiz, basit ve verimli olup birçok alanda uygulanabilir.
3DP	Bağlayıcı ile Toz Bağlama ve Kurutma	Yüksek performanslı kompozit			Zayıf	Zayıf	Zayıf	STL	Hızlı, ucuz, ofis ortamında kullanılabilir, kullanımı kolay, karmaşık modeller üretilebilir, renklendirme mümkün, parçalar kırılmalıdır.
Polyjet	Fotopolimer püskürtme ve UV ile katılaştırma	Akrilik gibi termoplastikler, (elastomerler)	Tabaka, destek oluşturma	Desteğin uzaklaştırılması	İyi	Zayıf	İyi	STL	Kullanımı kolay, hızlı yük- sek, kalite yüksek, ofis ortamına uygun.
EBM	Elektron ışınılertirme	Kobalt krom ve titanyum alaşımları, seramik		Tozun uzaklaştırılması	Zayıf	İyi	İyi	STL	Medikal, havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde fonksiyonel parça üretimine uygun
SDM	Malzemenin yığılması ve CNC işleme merkezi ile işlenmesi	Metal, plastik, seramik tozları	Ön tabakalama var	Desteğin uzaklaştırılması	İyi	İyi	İyi	STL	Karmaşık fonksiyonel parça üretimi mümkün, üretim hızı ve boyut doğruluğu yüksek

KAYNAKLAR

- [1] B. Ozugur, “Hızlı prototipleme teknikleri ile kompleks yapıdaki parçaların üretilebilirliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [2] J.E. Blanthier, “Manufacture of contour relief maps”, US Patent, #473,901 (1892).
- [3] O.J. Munz, “Photo-Glyph recording”, US Patent, #2,775,758, (1956).
- [4] W.K. Swainson, “Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product”, US Patent #4.041.476 (1977).
- [5] P.A.Ciraud, “Process and device for the manufacture of any objects desired from any meltable material”, FRG Disclosure Publication, (1972).
- [6] R.F.Housholder, “Molding process”, US Patent #4,247,508, (1981).
- [7] L.B. David, J.B.J. Joseph, C.L. Ming and W.R. David, “A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead”, US-TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24, 5-1, (2009).
- [8] E. Negis, “A short history and applications of 3D printing technologies in Turkey”, US-TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24, 23-30, (2009).
- [9] I. Drstvensek, B.Valentan, T.Brajlih, T.Strojnik, H.N. Ihan, “Direct digital manufacturing as communication and implantation tool in medicine”, US-TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24, 75-81, (2009).
- [10] T.Wohlers, “Wohler’s report 2009”, Wohlers Associates, Inc., (2009).
- [11] G. Dogan, “Mikro ve nano hızlı prototipleme”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [12] S.O.Onuh, Y.Y.Yusuf, “Rapid prototyping technology: applications and benefits for rapid product development”, Journal of Intelligent Manufacturing, 10, 301, (1999).
- [13] S.O.Onuh, K.K.B. Hon, “Integration of rapid prototyping technology into FMS for agile manufacturing”, Journal of Integrated Manufacturing Systems, 12, 179-86, (2001).
- [14] İnternet: E. Negis, “İmalatta mükemmele doğru; Oto-inşa teknolojileri”, <http://www.turkcadcam.net>, (2005).
- [15] M. Ermurat, “Hızlı prototip ve üretim teknolojilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).
- [16] R.Merz, F.B.Prinz, L.E.Weiss, “Shape deposition manufacturing”, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas at Austin, 1-7, (1994).

- [17] M.D.Aaron, R.W.Christopher and D.H. Robert, “Embedded sensors for biomimetic robotics via shape deposition manufacturing”, Division of Engineering and Applied Sciences Harvard University, Pisa, Italy,1-6, (2006).
- [18] C.K.Chua, K.F.Leong, C.S.Lim, “Rapid Prototyping. Principles and Applications”, Third Edition, World Scientific, (2010).
- [19] F. B. Prinz, Lee E. Weiss, “Novel Applications and Implementations of Shape Deposition Manufacturing”, Naval Research Reviews, Office of Naval Research, pp. 19-26, Vol. L,(1998).
- [20] İnternet: <http://www.custompart.net>, (2013).
- [21] İnternet: <http://www.stratasys.com>, (2013).
- [22] İnternet: <http://www.3dsystems.com>, (2013).
- [23] İnternet: <http://www.eos.info>, (2013).
- [24] İnternet: <http://www.arcam.com>, (2013).

