

ENDÜSTRİDE YENİ EĞİLİM OLAN 3-B EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE METALURJİSİ

Bekir YALÇIN*, Berkay ERGENE

Geliş Tarihi/ Received: 05.10.2017, Kabul tarihi/Accepted: 27.12.2017

Özet

Günümüz imalat sektörü, malzeme, mühendislik yazılım ve lazer teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak farklı teknolojilerin bir araya getirildiği üç boyutlu (3-B) katı model esaslı bir dijital tasarım ile polimer, metal ve seramik esaslı malzemelerden katman katman eklemeli bir şekilde kullanışlı mühendislik parçasının imal edilebildiği bir yöntemle tanışmıştır. Bu yöntem, "eklemeli imalat" olarak literatüre girmiş ve günümüzde başta medikal olmak üzere otomotiv, uzay-uçak, bilgisayar ve ev aletleri sektörlerinde de özellikli ve karmaşık geometriye sahip parçaların prototipinin ve/veya kullanışlı mühendislik parçasının imalatı mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, modern imalat bilimi alanında yapılan çalışmalar değerlendirilerek, 3-B eklemeli imalatta gelinen nokta, eklemeli imalat yöntemleri ve uygulama alanları araştırılmış ve bu alanda ülkemiz imalat sektörüne faydalı olabilecek bilgiler verilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: -B eklemeli imalat, lazer teknolojisi, dijital tasarım.

METALLURGY AND METHOD OF NEW TREND 3-D ADDITIVE MANUFACTURING IN INDUSTRY

Abstract

Today's manufacturing sector has introduced to a manufacturing method depending on developments in materials, engineering software and laser technologies which are combined to manufacture as a useful engineering part of 3-D digital design by layer upon layer from polymer, metal, ceramic materials. This method has entered into the literature as "Additive Manufacturing" and today it has been used in mainly medical, automotive, space-airplane, computer and home appliances sectors and also prototypes of parts with specific and complex geometries and / or make it possible to produce a useful engineering part. In this study, the studies conducted in the area of modern manufacturing science were evaluated and the point reached in 3-B additive manufacturing, additive manufacturing methods and application areas were investigated and it was tried to give information that could be projected to our manufacturing sectors.

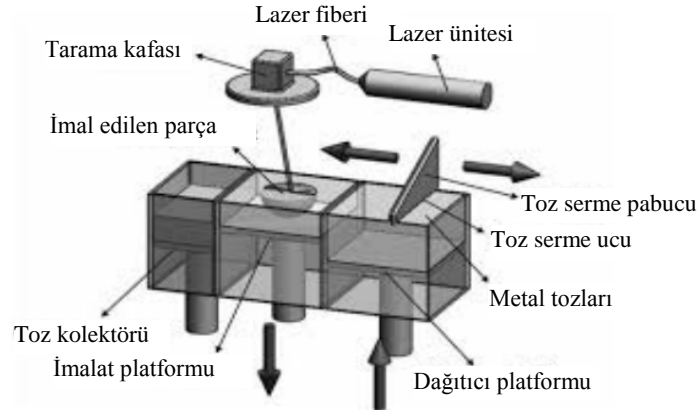
Key Words: 3-D additive manufacturing, laser technology, digital design.

1. Giriş

Eklemeli imalat, bilgisayar destekli tasarım (BDT) ile başlamış ve bu tasarımın nasıl nihai ürün haline dönüşeceğinden yola çıkılarak BDT tasarımlarının Stereolithography (STL)' ye dönüştürülebilmesinden sonra ortaya çıkmış ve ilk olarak 1987 yılında lazer ultraviyole ışını kullanılarak ışığa duyarlı termoset polimerin tabakalar halinde katılaşmasını sağlayabilecek ticari bir 3-B polimer yazıcı (SLA-1) geliştirilmiştir (Wöhler ve Gornet, 2014). Bu imalat

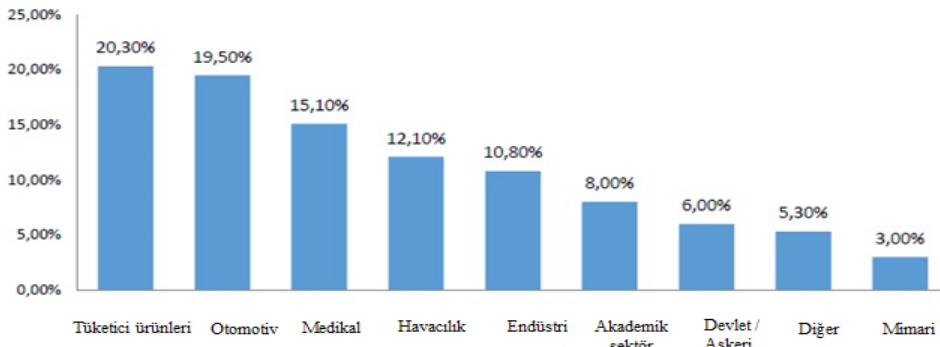
* Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta,
E-posta: bekiryalcin@sdu.edu.tr

metodu, geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak üretilmek istenen parça, blok ham malzemeden talaş koparma veya kütsel şekillendirme yerine, ham malzemenin yönleme bağı olarak lazer kaynağı ile eritilerek veya akmaya elverişli durumunda katmanlar halinde birbirine eklenmesi ile üç boyutlu parça imalat prensibine dayanır. Bu metotla gerçekleştirilen üretimler, dijital tasarımın direkt olarak üç boyutlu parça haline dönüşümü söz konusu olduğundan, üç boyutlu yazdırma olarak ifade edilmektedir. Şekil 1’ de, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan direkt metal lazer sintereleme (DMLS) metodunun şematığı verilmiştir.



Şekil 1. DMLS ile imalatın şematığı (Longhitano, 2015)

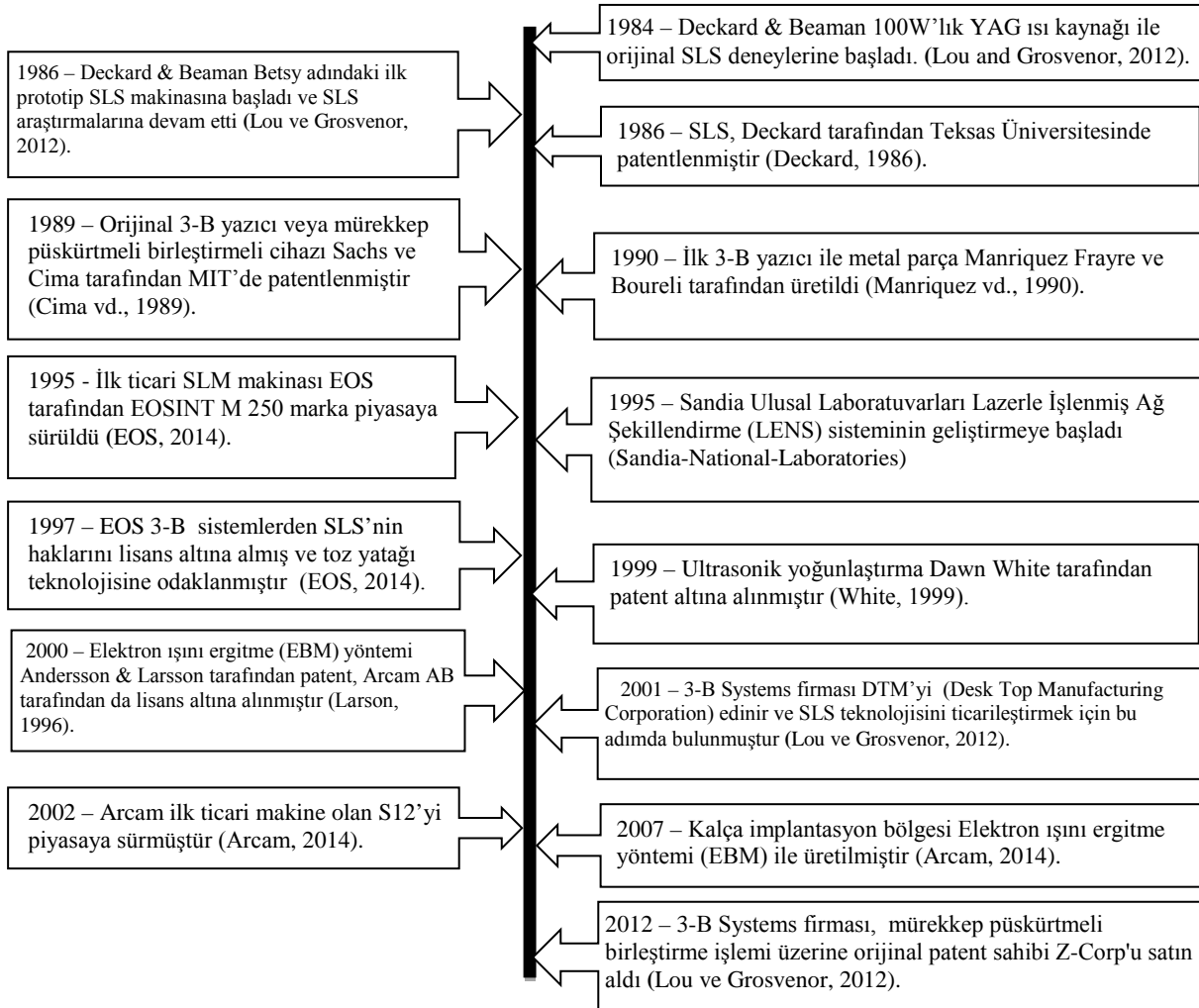
Prototip imalat amaçlı sektöre giren, kalıp-model imalatı ve 1980'lerin sonunda sağlık masraflarını düşürme ve hasta bakımını ve sonuçlarını iyileştirme amaçlı kullanılan bu dinamik teknoloji, karmaşık şekilli medikal parçaların imalatı ile tıbbi alana girmiştir. Günümüzde 3-B yazıcılar, protezlerin, implantların, işitme cihazlarının, medikal ve teşhis aygıtlarının imalatında önemli bir yere sahip olmuştur. Üretim maliyetinde yapılan nispi iyileştirmelerle birlikte daha iyi malzeme özellikleri, parça kalitesi ve boyutsal tamlık sonuçları ile de endüstrinin gereksinim duyduğu karmaşık şekilli parçaların imalatı mümkün hale gelmiştir. Bu sayede, eklemeli imalat Şekil 2’ de verilen sektörlerde yaygınlaşmaya başlamış (Pucci vd., 2017; EOS, 2013; Stratasys Ltd, 2014) ve özellikle uzay-uçak sektörünün eklemeli imalatın yaygınlaşmasında anahtar rol oynadığı rapor edilmektedir (Sofos, 2014). Bir diğer çalışmada ise (Yılmaz, 2015), Boeing, F/A 18 Super Hornet’in gövdesinin ön kısmında bulunan yaklaşık 150 parçanın, eklemeli imalat metotlarından biri olan DMLS ile üretildiğini rapor edilmektedir.



Şekil 2. Farklı sektörler içerisinde eklemeli imalatın dağılımı (EOS, 2013)

Sektörlerin imalat taleplerini karşılamak için değişik eklemeli imalat metotları geliştirilmiştir. Bir sonraki bölümde, ASTM F42 standardına göre detaylı sınıflandırılan eklemeli imalat yöntemleri ile üretim yapılabilmesi için uygulanan prensip veya aşamalar mevcuttur. Bunlar;

ilk olarak imal edilecek parçanın 3-B tasarımı, bu 3-B tasarımının dış yüzey geometrisini ve parçanın katmanlarının hesabını veren STL formatına dönüştürülmesi, STL formatının eklemeli imalat makinasına gönderilmesi, makine parametrelerinin (lazer gücü, tarama yönü ve hızı, yapım yönü, kullanılan toz karakteri, sıcaklık gibi) seçilmesi, parçanın katman katman inşa edilmesi (imalat süreci) ve üretilen parçanın ikincil işlemleri (ısıl işlem, kesme, çapak alma gibi) ve montaj olarak sıralanmaktadır (Sofos, 2014). Dwivedi ve Rai (2016), eklemeli imalatla, imalat öncesi veri hazırlığı aşaması olan BDT tasarımı ve bu tasarımın STL formatına dönüştürülmesi parametrelerinin parça kalitesi üzerine anahtar role sahip olduğunu rapor etmektedirler. Yaptıkları çalışmaya göre, imalat öncesi BDT ve STL verilerinin hazırlığı, üç boyutlu dijital tasarımın iki boyutlu kesitlere dilimlendikten sonra dijital ortamda seçici lazer sinterleme (SLS) makinasının tarayacağı alana yerleştirilerek yapılmaktadır. Ayrıca, dilimlemeden önce STL'ye dönüştürülen iki boyutlu model üzerinde, küçük radyüsler, keskin ince köşeler, üstü üste binen yüzeyler, değişen kenar çizgileri ve yüzeyler kontrol edildikten sonra dilimleme işleminin yapılması gerektiğini ve dilimlemede üçgen serinin verimli olduğunu, üçgen dilimleme sayısının ve büyüklüğünün keskin köşeler ve radyüsler dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini aksi halde parça hassasiyetini etkileyen dönüştürme ve dilimleme hatalarının meydana gelebileceğini önemle vurgulamaktadır.



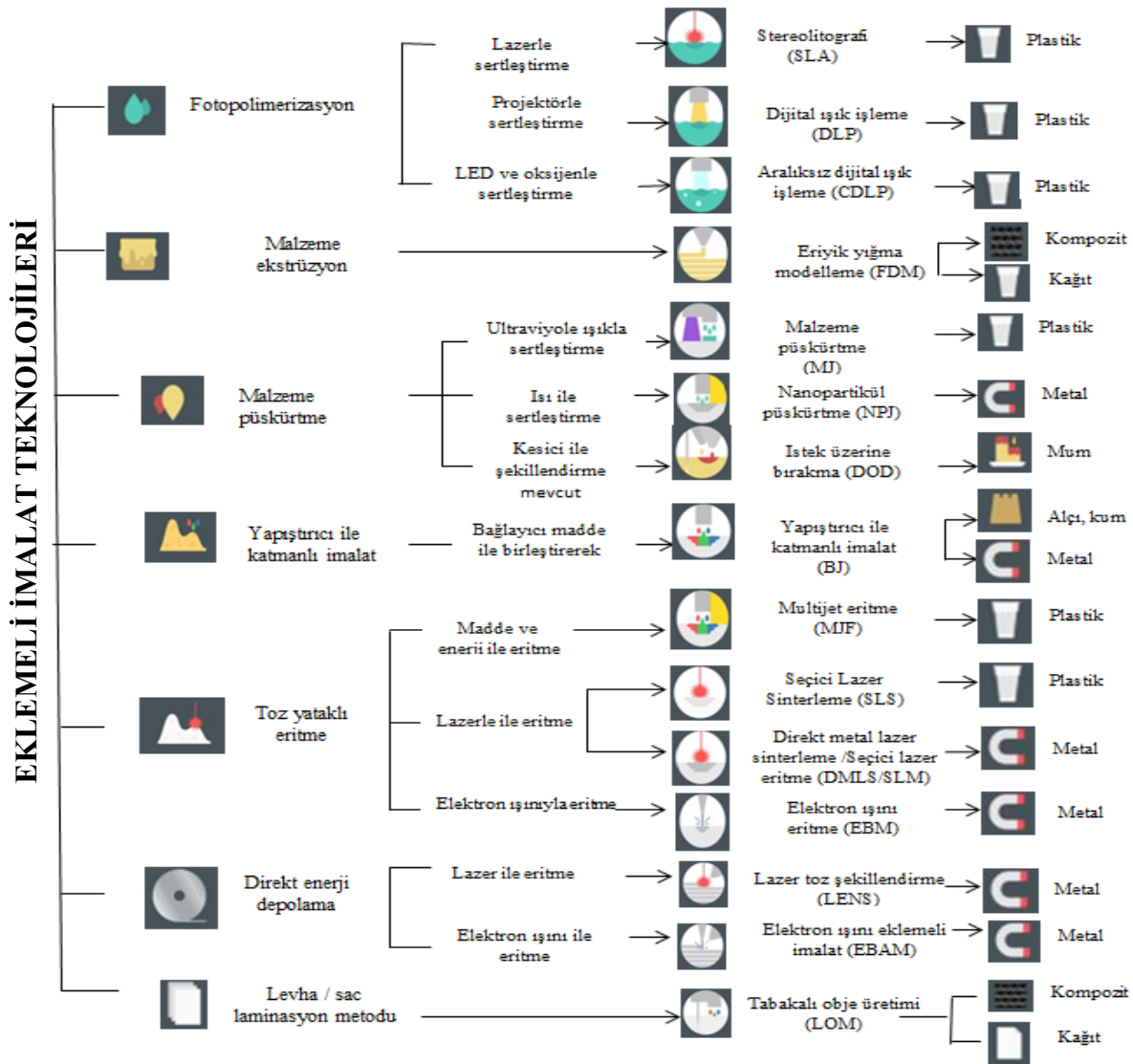
Şekil 3. Metal eklemeli imalatın kronolojik gelişim süreci (Arcam, 2014; Sames vd., 2016)

Eklemeli imalatla kaliteli ve ekonomik bir üretim yapılabilmesi için ilgili prensiplerin çok iyi optimize edilmesi ve seçilmesi gerekir. Polimer esaslı eklemeli imalatla başlayan süreçte, bu yöntemle metal parça üretimini anlamak için, 3-B polimer partiküller kullanılarak öncü

sayılabilecek bilimsel/deneysel çalışmalar yapılmıştır (Deckard, 1988; Bourell vd., 1992; Marcus vd., 1993). Bu araştırmalarda, toz (partikül) beslemeli lazer sinterlemeye odaklanılmış ve bu yöntem seçici lazer sinterleme (SLS) olarak patent altına alınmıştır. 1990 yılında Manriquez- Frayre ve Bourell (1990) tarafından bakır, Pb-Sn metal tozlarından SLS ile 3-B parça yapılabildiği rapor edilmiş ve bugün polimer, seramik, metal tozlarından tümüyle ark, elektron ışını ve lazer kaynağı ile ergitme/sinterleme prensibine dayalı seçici lazer ergitme/sinterleme ile parça imalatı yapılabilir hale gelmiştir. Bu bağlamda, Sames vd. (2012)' nin araştırmasına göre metal eklemeli imalatın kronolojik gelişim süreci Şekil 3' de verilmiştir.

2. Eklemeli İmalatın Sınıflandırılması

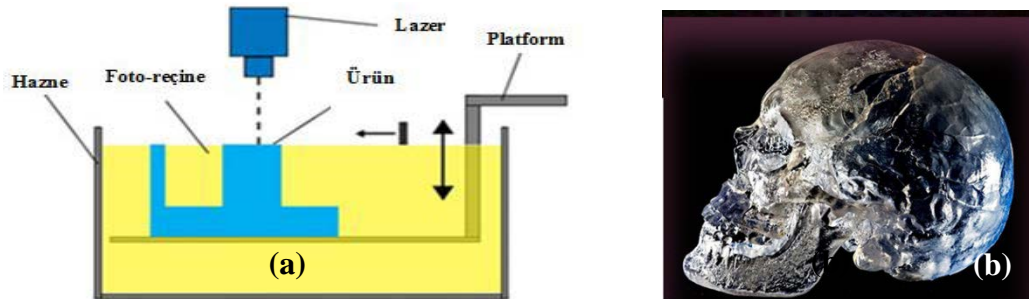
Genel olarak, eklemeli imalat besleme malzemesinin formuna göre sınıflandırılmaktadır. Besleme malzemesi eriyik, toz, tel ve sac formda olabilmekte ve aslında imalat sırasında üretilen yapının katılaşması besleme malzemesinin formuna göre sırasıyla eriyik katılaşması ve katı durumda birleşme şeklinde gerçekleşmektedir.



Şekil 4. Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2012)

Esas olarak, ASTM eklemeli imalat grubu, bu dinamik yapıya ve yüksek teknolojiye sahip imalat metodunu, ASTM F42 standardı altında yedi kategoriye ayırmıştır (Annual Book of ASTM Standards, 2012). Bunlar, fotopolimerizasyon (photopolimerization), malzeme püskürtme (material jetting), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), malzeme ekstrüzyon (material extrusion), toz yataklı eritme (powder bed fusion), levhalı sac yöntemi (sheet lamination process) ve direkt enerji depolama (directed energy deposition) olarak ifade edilmektedir (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2012). Sistematik olarak bu yöntemler Şekil 4’ de verilmiştir. Bu bölümde, eklemeli imalat teknolojileri ASTM F42 standardında belirtilen yedi alt başlık altında incelenmiştir.

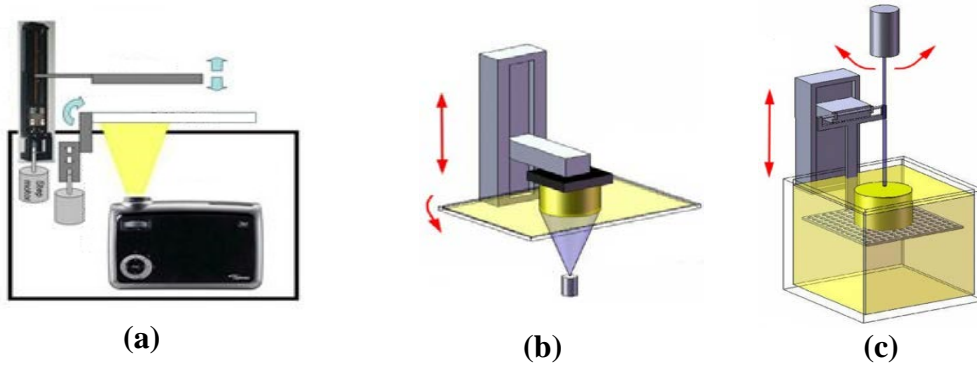
Fotopolimerizasyon: Başlangıçta kaplama ve baskı endüstrisi olmak üzere kısa sürede bir çok ticari alanda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanılmıştır. Kâğıt ve kartonların üzerinde parlak kaplamaların yanı sıra diş hekimliği alanında dişlerde oluşabilecek oyukları engellemek amacıyla kullanılan foto-sertleşebilir reçineler, bir ışın tarafından kürlenerek kullanılabilir hale gelmektedir. Fotopolimerizasyon işleminde sıvı, ışın ile kürlenebilen reçineleri veya ultraviyole (UV) dalga uzunluklarında radyasyona tepki veren ve sonrasında kimyasal reaksiyona giren fotopolimer malzemeler kullanılmaktadır (Gibson vd., 2015). Şekil 5’de görülen lazer ve optik kullanılarak gerçekleştirilen fotopolimerizasyon işleminde, öncelikle imalatın yapılacağı platform, reçine haznesinin üstünden katman kalınlığına göre aşağıya indirildikten sonra, bir UV ışığı reçineyi katman katman katı hale dönüştürmektedir. İlk reçine tabakası katılaştıktan sonra üzerine inşa edilen diğer katmanın mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen pürüzlülükler, sistemdeki kesiciler ile katman üzerinden geçerek giderilir. Daha sonra, platform aşağıya doğru hareket eder ve katılaştıran katmanın üzerine ek katmanlar inşa edilmeye devam edilir (Additive Manufacturing Research Group, 2017). Son olarak ise, reçine dolu hazne boşaltılır ve ürün çıkarılır. İşlem için tipik katman kalınlığı 0.025 - 0.5 mm'dir (Chua vd., 2010). Fotopolimerizasyon ile imalat işleminin avantajları, yüksek düzeyde boyut hassasiyeti, yüzey kalitesi ve nispeten hızlı bir süreç olarak sayılabilirken, dezavantajları ise pahalı olması, imalat işleminin uzun sürmesi, foto-reçine malzemelerin kullanımının sınırlı olması ve üretilen parçaların yüksek mukavimli olması için destek yapı kullanımına ihtiyaç duyulması olarak sıralanabilir.



Şekil 5. a) Fotopolimerizasyon ile imalat işlemi, b) imal edilen örnek ürün (Additive Manufacturing Research Group, 2017).

Fotopolimerizasyon yöntemi, kendi içerisinde Şekil 6’da gösterildiği gibi, Stereolitografi (SLA), direkt ışık işleme (DLP) ve sürekli direkt ışık işleme (CDLP) olarak üçe ayrılmaktadır (Redwood, 2017). SLA yönteminde, sıvı fotopolimer reçinesi ile dolu yarı saydam bir tanka batırılmış bir yapı platformu kullanılmaktadır. İmalat platformu batırıldıktan sonra, makinenin içinde bulunan tek nokta lazer, malzemenin katılacağı için tank tabanından ürünün enine ilk kesit alanını ve katmanını oluşturur. İlk katman oluşturulduktan sonra platform yukarı kaldırılır ve parçanın altında yeni bir reçine tabakasının akışı sağlanır. Bu işlem, katman

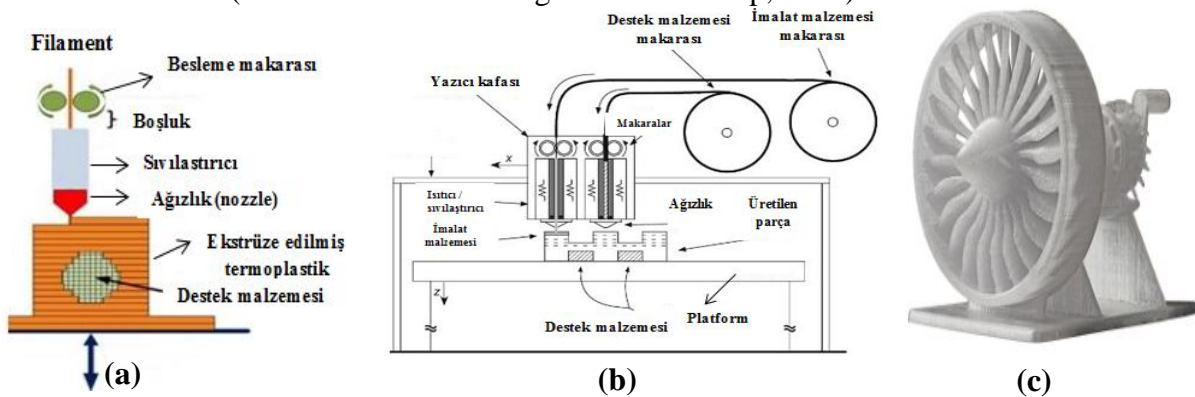
katman tekrarlanır. Mekanik özellikleri iyileştirmek için parçalar genellikle UV ile sertleştirilmektedir (Redwood, 2017).



Şekil 6. a) DLP yöntemi (Aniwa, 2017), b) CDLP yöntemi, c) SLA yöntemi (Wallace vd., 2014).

DLP imalat yöntemi, hemen hemen SLA ile aynı prensibe sahiptir. SLA ve DLP arasındaki temel fark, DLP’de projektör tarafından ultraviyole ışık ile tabaka sertleştirilirken, SLA’da ise, lazer kaynağı ile ışığa duyarlı reçineler katmanlar halinde sertleşmektedir. Bu nedenle, DLP’ye göre SLA daha hassas ve daha yavaş bir imalat işlemi olarak nitelendirilmektedir (Aniwa, 2017). CDLP ile, DLP’ye benzer prensiple parça imalatı yapılmakta ve aralarındaki temel fark ise CDLP’de, katman imalatı sırasında imalat plakası Z yönünde yukarı doğru sürekli hareket etmektedir. İlk katman katı hale geldikten sonra bu katman, reçine varilinden yukarı doğru çıkarılır ve inşa edilecek sıradaki katman projektör tarafından yayılan ışığın etkisinde katılaştırılarak imalat gerçekleştirilmektedir (Redwood, 2017).

Malzeme Ekstrüzyon: Şekil 7’de görülen malzeme ekstrüzyon imalat sürecinde, filamentlerin besleme makarası vasıtasıyla hareketi sağlanır ve bu filamentler sıvı hale getirilip x ve y yönlerinde yatay hareket yapabilen ağızlık tarafından z ekseninde boyunca hareket kabiliyetine sahip imalat platformuna dökülmektedir. Eriyik yığıma modelleme (FDM) olarak ta bilinen bu yöntemde, polimerler, plastikler, ve kompozit malzemelerden oluşan filamentler kullanılmaktadır. (Additive Manufacturing Research Group, 2017)

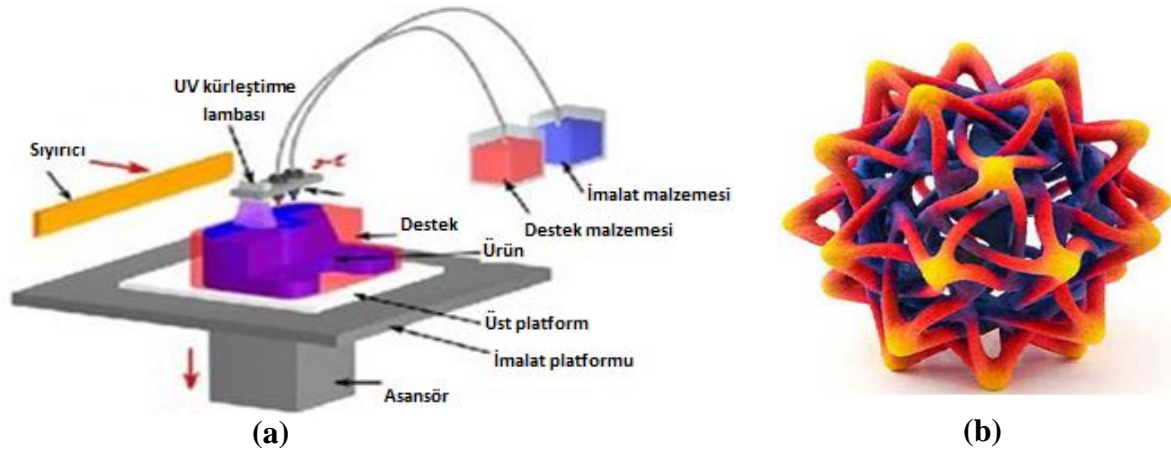


Şekil 7. a) Malzeme ekstrüzyon yöntemi (Dreams, 2017), b) çift ağız içeren FDM yöntemi (Gibson vd., 2010), c) FDM ürünü (Marhellabs, 2017).

Eklemeli imalat araştırma grubu tarafından (2017), bu metot düşük hacimli ürünlerin imalatında, enjeksiyon kalıplamaya göre daha ekonomik bir yöntem olarak nitelendirilmektedir. Chua vd.(2010)’da, bu yöntemle yüksek kaliteli bir yüzey elde etmek için kontrol edilmesi gereken birçok faktörün olduğunu ancak en önemli unsurun ise

malzemenin aktığı ağızlığın (nozzle) kare olması gerektiğini rapor etmektedirler. Krar ve diğerleri (2003)' de, bu yöntemi diğer eklemeli imalat yöntemleri ile karşılaştırarak, imalattaki hızın düşük ve nihai ürün kalitesinin ağızlık (nozzle) kalınlığı ile ilişkili olduğunu ileri sürmektedirler. Gibson ve arkadaşları (2010), yüksek boyut hassasiyetine ihtiyaç duyulan ürünler imal edilirken yer çekimi ve yüzey geriliminin hesaba katılması gerektiğini ve doğru sonuçların elde edilmesi için ağızlıktan çıkan malzemenin sabit basınç ve hızda tutulmasının önemini vurgulamaktadırlar. Chua ve diğerleri (2010) ise, tabaka kalınlığının 0.178 mm - 0.356 mm arasında değişebileceğini belirtmişlerdir. FDM ile imalat edilen parçanın mekanik özellikleri, anizotropik doğasından dolayı katman yönüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Katman yönü, uygulanan çekme yükü ile 90° lik bir açı yapıyorsa ürünün mukavemetinin düşük olduğu, katman yönü uygulanan çekme yükü ile paralelse ürün mukavemetinin daha yüksek olduğu, katmanlara paralel bir eğilme yükü varsa ürün mukavemetinin düşük olduğu ve eğilme yükünün katmanlara dik olması durumunda da ürün mukavemetinin daha yüksek olduğu ifade edilmektedir (Redwood, 2017).

Malzeme Püskürtme: Bu yöntemde, iki boyutlu bir mürekkep püskürtmeli yazıcıya benzer ve birden çok renkte polimer, mum ve metal kullanılarak imalat yapılmaktadır. Yani, malzeme, sürekli ya da talep üzerine bırakma (DOD) yaklaşımıyla imalat platformu boyunca yatay olarak hareket eden bir ağızlıktan püskürtülerek tabakalar elde edilmekte ve tabakalar ultraviyole (UV) ışık kullanılarak sertleştirilmektedir. Şekil 8'de bu prensibin sistematığı verilmiştir. Görüldüğü üzere, baskı kafası öncelikle imalat platformunun üzerine konumlandırılmakta ve malzeme baskı kafasından termal ya da piezoelektrik kullanılarak damlacıklar halinde platforma düşürülmektedir. Platforma düşen damlacıklar, UV ışığı ile katılaştırılarak ilk katman oluşturulmakta ve bu katman üzerine diğer katmanlar aynı prensiple imal edilmektedir. Son işlem olarak, destek malzemesinin çıkarılmasından önce, tabakalar soğutulmaya bırakılır ya da UV ışık ile daha da sertleştirilerek daha mukavim bir yapı elde edilmektedir (Additive Manufacturing Research Group, 2017).

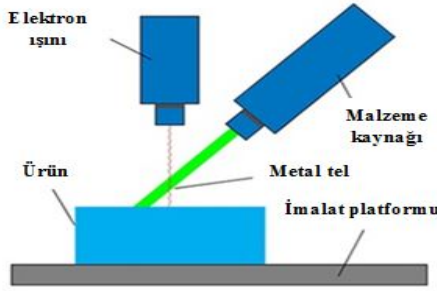


Şekil 8. a) Malzeme püskürtme imalatının şematığı (Sign, 2017), b) ürün (Molecule, 2017).

Malzeme püskürtme prensibine dayalı olarak geliştirilen parçacık püskürtme (NPJ) yönteminde ise, metal nano partikülleri ile özel bir sıvı karışımı, yazıcıya bir kartuş olarak yüklenir ve bu karışım son derece ince damlacıklar halinde imalat platformuna püskürtülerek katmanlar imal edilmektedir. Sistemde, tabaka katılaştırma için UV ışığı kullanılmakta ve bu sırada ortaya çıkan ısı ile karışımdaki sıvı buharlaştırılarak malzeme bünyesinden uzaklaştırılmaktadır. Malzeme püskürtme yöntemlerinden biri olan DOD (Drop on Demand) yönteminde, iki baskı ağızlığı kullanılmakta ve bunlardan birisi ana malzemenin biriktirilmesi ve diğeri ise çözünebilen destek malzemesini püskürtmek için kullanılmaktadır. Geleneksel eklemeli imalat yöntemlerine benzer olarak, DOD yazıcıları, püskürtme malzemesini

kullanıldığı ve EBM yönteminde de, titanyum, kobalt krom, alüminyum ve bakır alaşım tozları ile daha yüksek performansın elde edildiği rapor edilmektedir (Arcam, 2014).

Direkt enerji depolama: Doğrudan enerji depolama (DED), malzemeyi ergiterek parçaların oluşturulması prensibine dayanmaktadır. DED' in sistematığı Şekil 11'de görüldüğü üzere, ekstrüzyon prensibine benzer olarak çok eksenli hareket kabiliyetine sahip bir ağızlıktan, tel veya toz formdaki malzeme imalat platformuna aktarılır ve lazer/elektron ışını ile ergitilerek katılaştırılmaktadır. Bu metotta, genellikle toz veya tel formuna sahip metal, polimer ve seramik malzemeler kullanılmaktadır (Redwood, 2017).



(a)

(b)

Şekil 11. a) Doğrudan enerji depolama imalat yöntemi (Additive Manufacturing Research Group, 2017), b) Ürünü (Sinkora E., 2017).

Direkt enerji depolama yöntemlerinden biri olan lazer toz şekillendirme (LENS) teknolojisi, katmanlı bir tabakayı ergitmek ve katılaştırmak için lazer optiği, toz ağızlığı ve inert gaz bileşenlerinden oluşan sistematığe sahiptir. Bu yöntemde, imalatın yapılacağı metal bir plaka kullanılır ve lazer ile bu plaka üzerine eriyik havuzu oluşturulduktan sonra bu eriyik havuzunun üzerine ağızlık vasıtasıyla tozlar püskürtülerek tozların eritilmesi ve katılaştırılması ile katman katman imalat yapılmaktadır. Elektron ışını ile eklemeli imalat (EBAM) ise, elektron ışını ile vakum ortamında metal tozları veya telleri kullanılarak LENS' e benzer prensiple katman katman imalat yöntemi olarak nitelendirilmektedir. Eklemeli imalat araştırma grubuna göre (2017), LENS metodunun orijinal tasarımların imalatında daha verimli olduğu ifade edilmektedir.

Levha/sac laminasyon metodu: Bu imalat yöntemi, Şekil 12'de görüldüğü üzere, imalat platformu üzerinde tabakayı ilerleten besleme mekanizması, tabakayı aşağıdaki tabakayla birleştirmek için basınç uygulamak üzere ısıtılmış merdane ve parçaların her bir katmanının dış hattını kesmek için lazer bileşenlerinden oluşmaktadır. Parçalar, yapışkan kaplı sac tabakalarının üst üste istiflenmesi, birleştirilmesi ve kesilmesi ile üretilmektedir. Her bir kesme işlemi tamamlandıktan sonra platform seviyesi tabaka kalınlığı kadar indirilerek daha önce imal edilmiş tabakanın üstüne yeni bir tabaka eklenmektedir. Platform daha sonra hafifçe yükseltilerek ısıtılmış merdane ile yeni katmanı birleştirmek için haddemeye benzer bir şekilde basınç uygulanmakta ve lazer imal edilen levhanın kullanışlı bölümünü keser ve ürün geometrisi elde edilene kadar bu işlem tekrarlanmaktadır. Kullanışlı olmayan ve lazerle kesilmiş atık saclar atık toplama silindiri vasıtasıyla toplanmaktadır (Custom, 2017). Bu imalat yönteminde, rulo haline getirilebilen plastik ve sac metal malzemeler kullanılmaktadır. (Additive Manufacturing Research Group, 2017) Krar ve Gill (2003) yaptıkları çalışmada, hızlı ve düşük maliyetli bir yöntem olmasına karşın ürün mukavemetinin ve tamlığının kullanılan yapıstırıcıya bağlı olduğunu ifade etmişlerdir (Additive Manufacturing Research Group, 2017).

Diğer yandan dezavantajlarına bakıldığında, standart toz destek sistemi boyutlarının sınırlı olması sonucu metal esaslı imal edilecek parçanın boyutlarında sınırlama, toz katmanlarının oldukça düşük kalınlıkta olması ile büyük parçaların imalatının yavaş ve yüksek maliyetli olması, kütesel seri imalat için değil de küçük seri imalat için uygunluğu, kaynaklanabilir olmayan malzemelerin şekillendirilmesinde zorluk ve ilave gereksinimlere ihtiyaç duyulması, imal edilen parçaların dikey (Z eksen) yönde anizotropik davranış göstermesi, %99,9 yoğunluğa ulaşılabilir olması ancak yapıda oluşan artık gerilmelerden dolayı büzülme, çatlak ve çarpılma gibi hataların oluşması, döküme göre daha iyi ancak dövme yöntemine göre daha zayıf mukavemet özellikleri, tozun inşa edileceği desteğin açısı 45° nin altında olması durumunda çıkarılabilir destek plakalarına ihtiyaç duyulması ön plana çıkmaktadır (EPMA, 2015). Bu bağlamda, bu imalat yönteminin tüm sektörlerde kullanılabilirliğini arttırmak için eklemeli imalatla ilgili yapılan bazı bilimsel çalışmalarda, elde edilen ürünün kalite unsurlarının yanı sıra imalat hızının iyileştirilmesinin gerektiği vurgulanmakta ve eklemeli imalat değişkenlerinin imalat hızına etkisini araştırmak için pek çok çalışma yapılmış ve Tablo 1’de SLM ürünleri için yapılmış çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

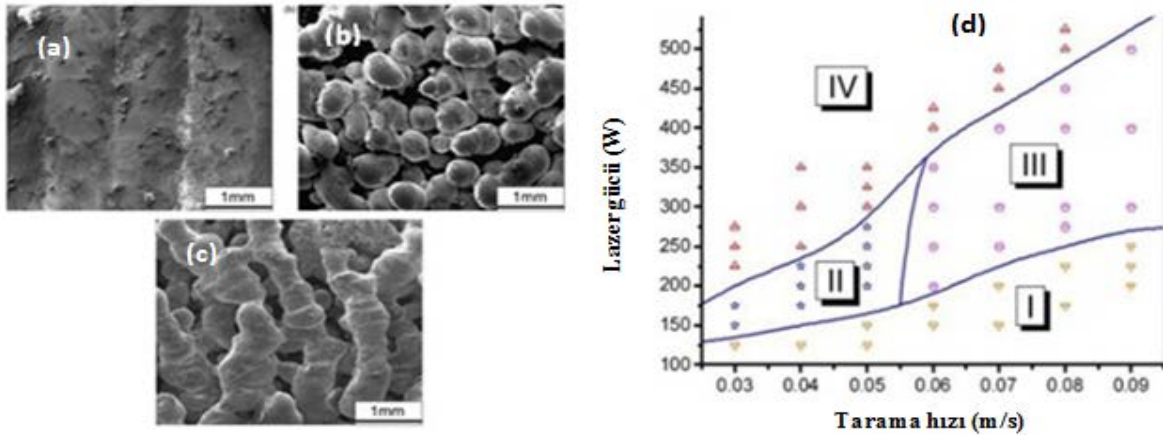
Tablo 1. Metalik tozların eklemeli imalatı etkileyen değişkenlerin ve imalat hızlarının özeti

Kaynak	Malzeme	Lazer kaynağı	Lazer gücü (W)	Işın çapı (mm)	Tarama hızı (mm/s)	Tabaka kalınlığı (mm)	Teorik imalat hızı (mm ³ /s)
(Meiners, 1999)	Paslanmaz çelik (X2CrNiMo17 12 3, X2 CrNi24 12) takım çeliği (1.2343), Nikel	Nd: YAG (cw)	105 W	0.2 (0.14)	<200	<0.1	<2.8
(Over, 2003)	Takım çeliği (X38 CrMoV 5-1) Titanyum (TiAl6V4)	Nd: YAG (cw)	120 W	0.2	<250	<0.1	<3.5
(Zhang, 2004)	Alüminyum (AlSi25, AlSi10Mg, vd.)	Nd: YAG (cw)	330 W	<0.4	<250	<0.1	<7
(Wagner, 2003)	Paslanmaz çelik (1.4404), sıcak iş takım çeliği (1.2714), Nikel bazlı alaşım (IN718)	CO ₂	200 W	0.1	50	0.05-0.1	0.5
(Petersheim, 1997)	Paslanmaz çelik (X38 CrMoV 5-1 ve X40 CrMoV 5-1)	Bilgi yok	Bilgi yok	≈0.4	Bilgi yok	≈0.4	-
(Kobyrn ve Semiatin, 2001)	Titanyum (Ti6Al6V4)	Bilgi yok	Bilgi yok	<0.5	Bilgi yok	0.13-0.38	-
(Su W-N vd., 2003)	Takım çeliği	Nd: YAG (darbeli)	550 (150)	0.9 (0.6)	<10	0.4	<2.4
(Wang vd., 2002)	Volfram karbür kobalt	Nd: YAG (cw)	60	0.8	30	0.2	2.5
(Kruth vd., 2005)	Cu, Ni, Fe3P	CO ₂	60	0.3 (0.2)	<100	0.2	<4
(Schuh vd., 2007)	Paslanmaz ve takım çeliği (1.4404 ve 1.2343)	Nd: YAG (cw)	250	0.2 (0.15)	160	0.05	1.2

Schleifenbaum vd. (2011), eklemeli imalat hızının yetersiz olduğunu, bu imalat sürecinin anlaşılabilmesi için, toplam imalat zamanını ikiye ayırmaktadır. Bunlar, ana işlem zamanı ve yardımcı işlem zamanı olarak ifade edilmektedir. Ana işlem süresi sadece bir bileşenin her bir tabakasını eritmek/sinterlemek için gereken zamandan oluşmakta ve tabaka indirgeme, toz biriktirme gibi işlemler ise yardımcı işlem süresi olarak nitelendirilmektedir. Aslında ana işlem zamanı toplam üretim zamanının %80’ini oluşturmakta ve bu işlem zamanına etki eden en önemli parametreler ise; tabaka kalınlığı (D_s), tarama hızı (V_{scan}) ve tarama çizgi aralığı (Δy_s) olarak tanımlanmaktadır. İşleme ilgili teorik imalat hızının aşağıdaki denkleme (Eşitlik 1) göre hesaplanabildiği ifade edilmektedir (Schleifenbaum vd., 2011). Tablo 1’de, bazı bilimsel çalışmalarda yapılan ve belirtilen imalat değişkenlerinin teorik imalat hızına etkisi verilmiştir.

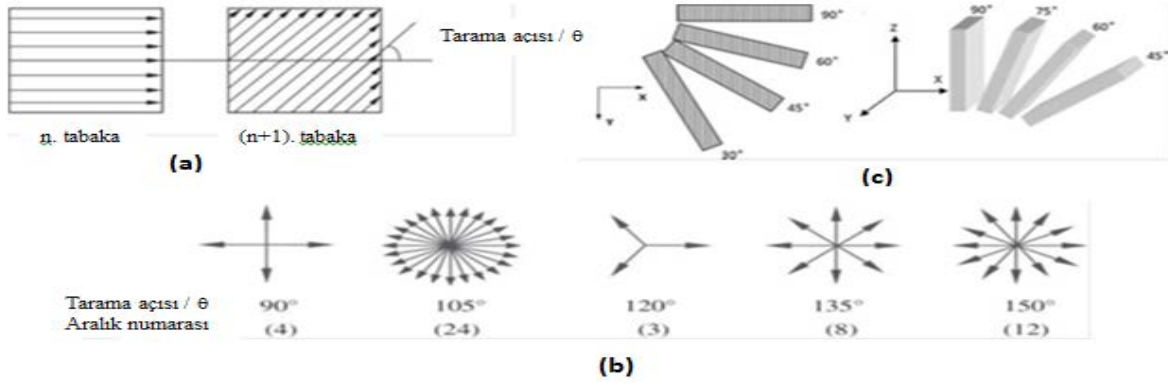
$$V_{işlem} = D_s \cdot V_{scan} \cdot \Delta y_s \quad (1)$$

Meiners (1999)' e göre, tarama hızı ve katman kalınlığı mevcut lazer gücüne bağlı iken ve tarama çizgisi aralığı (Δy_s) ise ışın odak çapına bağlıdır. Örneğin, tipik olarak yaklaşık tarama çapı ışın çapının 0.7 katıdır. Gibson ve Rosen (2010)' de, en iyi yüzey ve boyut hassasiyetinin, optimum imalat hızı ve mekanik özelliklerin, ham toz besleme sıcaklığı, lazer gücü, lazer tarama hızı, lazer ışın boyutları, tabaka kalınlığı, tarama mesafesi ve tarama yönünün optimize edilmesi ile sağlanabildiğini rapor etmektedirler. Bir başka çalışmada, eklemeli imalat parçalarının mekanik ve metalürjik özelliklerinin işlem parametreleri ile değişim gösterdiği (Gu ve Shen, 2009) ve özellikle de lazer gücü ve tarama hızının bu özellikler üzerine etkisinin en önemli olduğunu ileri sürmektedirler (Hanzl vd., 2015). Gu ve Shen (2008) ise, lazer gücünün ve tarama hızının paslanmaz çelik morfolojik yapısına etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, Şekil 14-a' daki yapının 300 W lazer gücü ve 0.05 m/s tarama hızı ile, Şekil 14-b' deki gözenekli küresel yapının 300 W lazer gücü ve 0.08 m/s tarama hızı ile, Şekil 14-c' deki yapının ise 250 W lazer gücü ve 0.05 m/s tarama hızı ile elde edildiğini deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında, Şekil 14-b' deki yapının gevrek olmadığını taneler arası bağın yeterli olduğunu ve küresel etkiye sahip bir yapı olduğunu ifade etmektedirler.



Şekil 14. Eklemeli imalatla üretilen 316L paslanmaz çeliğin morfolojik yapısına lazer gücü ve tarama hızının etkisi (Gu ve Shen, 2008)

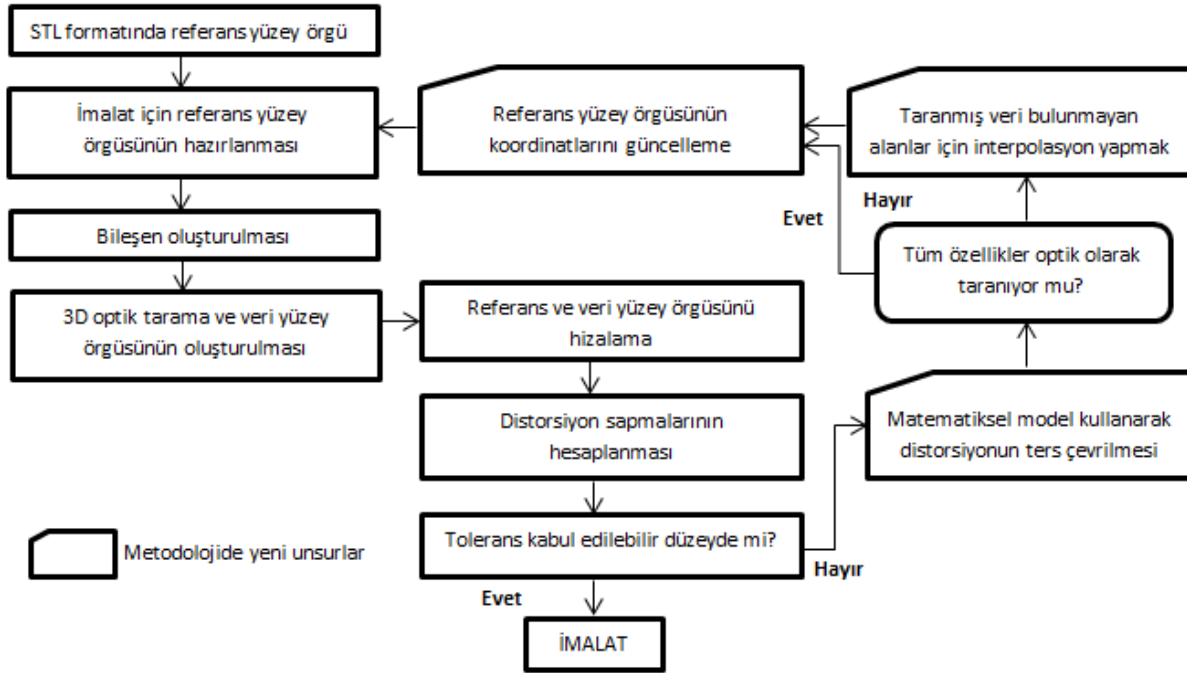
Metal eklemeli imalatta, ergitme esaslı ve ergitme olmaksızın sınıflandırmanın da yapıldığı bilinmekte ve metal partiküllerin ergime sıcaklığına bağlı olarak uygulanan lazer gücü ve tarama hızının seçilmesi gerektiği yapılan bir çalışmada ortaya konulmuştur (Gu ve Shen, 2008). Gu ve Shen (2008), Şekil 14-a,b,c' deki morfolojik yapıların, Şekil 14-d' de verilen lazer gücü ve tarama hızının metal partiküllerin ergime mekanizmalarını etkilediğini, I. durumda ergimenin olmadığı, II. durumda kısmi ergimenin olduğu (düşük tarama hızı < 0.06 m/s), III. durumda küreselleşme etkisiyle ergimenin olduğu ve IV. durumda ise tamamen ergitme yapılarak imalatın gerçekleştiği rapor edilmektedir. Şekil 14-b' de verilen küresel morfolojiye sahip yapının III. durumda gerçekleştiği, Şekil 14-a' daki yapının ise IV. durumda gerçekleştiğini tayin etmişlerdir. Bir başka çalışmada (Gibson ve Shi, 1997), seçici lazer ile imal edilmiş parça özelliklerinin toz malzeme özelliklerine, işlem parametrelerine, parça oryantasyonuna ve uygulanan ikincil işlemlere bağlı olduğu ifade edilmektedir. Şekil 15' de, eklemeli imalatta tarama yönleri ile ilgili bilgilere yer verilmiş (Guan vd., 2013) ve endüstriyel uygulamalarda SLM ürünleri için 105° lazer tarama açısıyla daha iyi sonuçlar alındığı ifade edilmektedir (Hanzl vd., 2015).



Şekil 15. a) Lazer tarama açısı, b) farklı lazer tarama açılarıyla tarama c) yapım yönü (Guan vd., 2013; Shifeng vd., 2014)

Şekil 15’ de görüleceği üzere, lazer tarama açısı (θ), x eksenine ile lazer tarama yönü arasındaki açı olarak bilinmektedir ve örneğin Şekil 15-b’ de görülen 90° lazer tarama açısı dört katmanda biriktirilmiş tarama çizgisini ifade etmektedir. Kruth vd. (2010) ise, yüksek yoğunluğa sahip parça imal edebilmek için zikzaklı tarama tipinin daha etkili olduğunu ifade etmektedirler. Lazer tarama yönleri arasındaki açının mekanik dayanım üzerine etkisinin diğer çalışmalar tarafından da desteklendiği görülmektedir (Hanzl vd., 2015; Guan vd., 2013). Lazer tarama açısının yanlış seçilmesi durumunda anizotropik olarak yönlendirilmiş yapının meydana geldiği bilinen bir gerçektir. Bir başka çalışmada (Shifeng vd., 2014), dikey ve yatay inşa etmenin parça dayanımına etkisini incelenmişlerdir ve yatay yönde inşa edilen 316L paslanmaz çelik test numunesinin çekme dayanımını yatay yönde 624 MPa ve dikey yönde 669 MPa elde etmişlerdir. Hanzl ve diğerleri (2015), katman kalınlığının parça dayanımından ziyade yüzey pürüzlüğünü daha fazla etkilediğini rapor etmektedirler. Diğer yandan, Shi vd. (2004)’ de yüksek viskoziteye sahip tozlar ile daha yüksek yoğunluğa sahip parça imal edilebildiğini ve polimer esaslı SLS parçaların imalatında 75-100 μm partikül büyüklüğüne sahip tozlar ile iyi sonuç alındığını ileri sürmektedirler. Ayrıca, ergime sıcaklığı ile kristalleşme sıcaklığı arasındaki farkın büyük olduğu malzemeler SLS ile şekillendirildiğinde, yüksek boyutsal hassasiyetin ve düşük çekme karakteristiğinin (shrinkage) sağlanabildiği de ifade edilmektedir. Bir başka kaynakta (Renishaw Apply Innovation, 2017), eklemeli imalatta verimli bir şekilde kullanılan metal tozlarının özellikleri verilmiştir.

Konvansiyonel imalat ile parça üretimi sırasında termal prosesten dolayı boyutsal büzülme (shrinkage), şekillendirme prosesinden dolayı da meydana gelen elastik enerji ile geri yaylanma (springback) sonucu oluşan iç gerilmeler ürünün geometrisinde değişimlere (çarpılma veya distorsiyon) neden olmaktadır. Eklemeli imalatta da, işlem parametrelerinin etkilediği bir diğer önemli unsur, termal ve deformasyon mekanizmalarından kaynaklanan iç gerilmeler (residual stresses) ve bunun neden olduğu ürün geometrisindeki değişimdir ve bu istenmeyen bir durumdur (Afazov vd., 2017). Eklemeli imalatta, oldukça önemli olan iç gerilme ve boyutsal değişimi azaltmak için farklı yaklaşımlar araştırılmaktadır. En yaygın yaklaşımlardan birisi, imal edilen katmanlarda ve parçada daha az ısı oluşumunu sağlayacak işlem parametrelerinin optimize edilmesidir (Murr vd., 2012). Bazı araştırmacılar da (Bagg vd., 2016), çarpılma düzeyinin azaltılması için farklı lazer tarama yönleri üzerine çalışmışlardır. Bu yaklaşımın, parçadaki iç gerilmeleri tümüyle gideremediğini ancak çarpılma düzeyinin düşürülmesi adına faydalı bir yöntem olduğunu ileri sürmektedirler. Diğer bir yaklaşımda da (Colegrove vd., 2016), parça yüzeyinde oluşan çekme gerilmelerinin, deformasyon sertleştirmesini sağlayabilecek haddeleme ile basma gerilmesine dönüştürülmesi önerilmektedir.



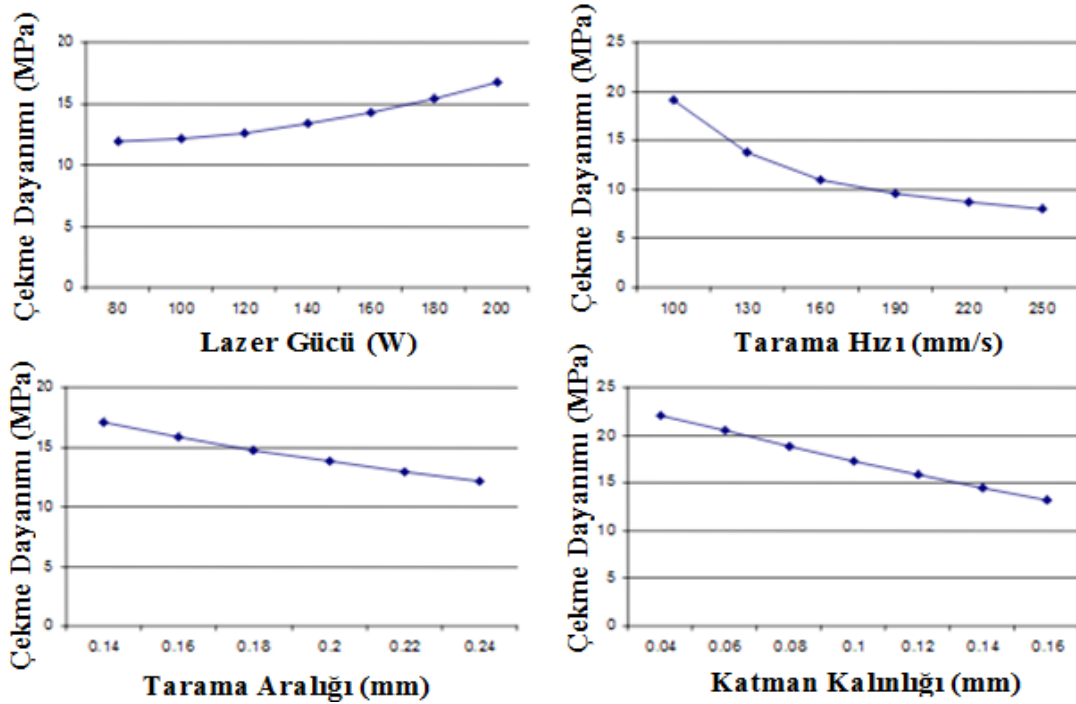
Şekil 16. Afazov vd. (2017)' nin önerdiği yeni distorsiyon dengeleme metodunun akış diyagramı

Başka bir yaklaşımda da (Buchbinder vd., 2014), seçici lazer ile toz ergitme sırasında oluşan sıcaklığın kullanılmasından bahsedilmektedir. Bunun amacının ise, toz katmanları oluşturulurken termal değişim (thermal gradient) seviyesini azaltmak ve distorsiyon düzeyini düşürmek olarak ifade edilmektedir. Afazov vd. (2017) ise, eklemeli imalatta yaşanan bu iç gerilme ve çarpılma problemine yeni bir metot önermiş ve bu metodu distorsiyon dengeleme olarak adlandırmıştır. Geliştirmiş olduğu metodun akış diyagramı Şekil 16' da verilmiştir. Metodoloji iş akış diyagramında 3-B optik tarama ölçüm verilerini kullanarak bozulma telafisi için neler yapılabileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak bu metot, metodolojideki yenilikçi unsurların, geometride dahili özellikler gibi erişim sınırlamaları nedeniyle 3B optik tarama ölçümlerinin mümkün olmadığı bozulma ters çözümü ve bozulmanın interpolasyonu için matematiksel bir modelin geliştirilmesi ve uygulanmasına dayanmaktadır.

Delgado vd. (2012), eklemeli imalat parametrelerinin mekanik dayanım ve kalite üzerine etkisini belirlemek için, DMLS ile DS H20 tozlarını ve SLS ile de AISI 316 L paslanmaz çelik tozlarını kullanarak, ISO 6892-1:2009 standardına göre çekme ve ISO 2740:2007 standardına göre de eğme deneyleri yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, DMLS DS H20 numunelerde, yapım yönü (building direction) ve katman kalınlığının kalite ve mekanik özellikleri etkileyen parametreler olduğunu ve katman kalınlığındaki artış ile çekme dayanımı ve % uzama değerlerinde azalma görüldüğünü, eğilme dayanımı üzerine hiç bir etki olmadığını ifade etmektedirler. Ayrıca, SLS AISI 316 L çelik paslanmaz numunelerde parça boyutsal kalitesi üzerine yapım yönü ve katman kalınlığının etkili olduğunu, mekanik özelliklere yapım yönünün etkili olmadığını, imalat sürecinde tarama hızı ve katman kalınlığının artırılması ile mekanik özelliklerde kötüleşme meydana geldiğini rapor etmektedirler (Delgado vd., 2012). Simchi vd. (2006)' de, lazer sinterleme metodunda, sinterleme atmosferinin ve lazer tarama stratejisinin parçanın yoğunlaşmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu, iyi mekanik özelliklerin eldesi için daha iyi yoğunlaşmanın sağlanması gerektiğini ve bunun ise yüksek lazer gücü, düşük tarama hızı, düşük tarama çizgi aralığı ve

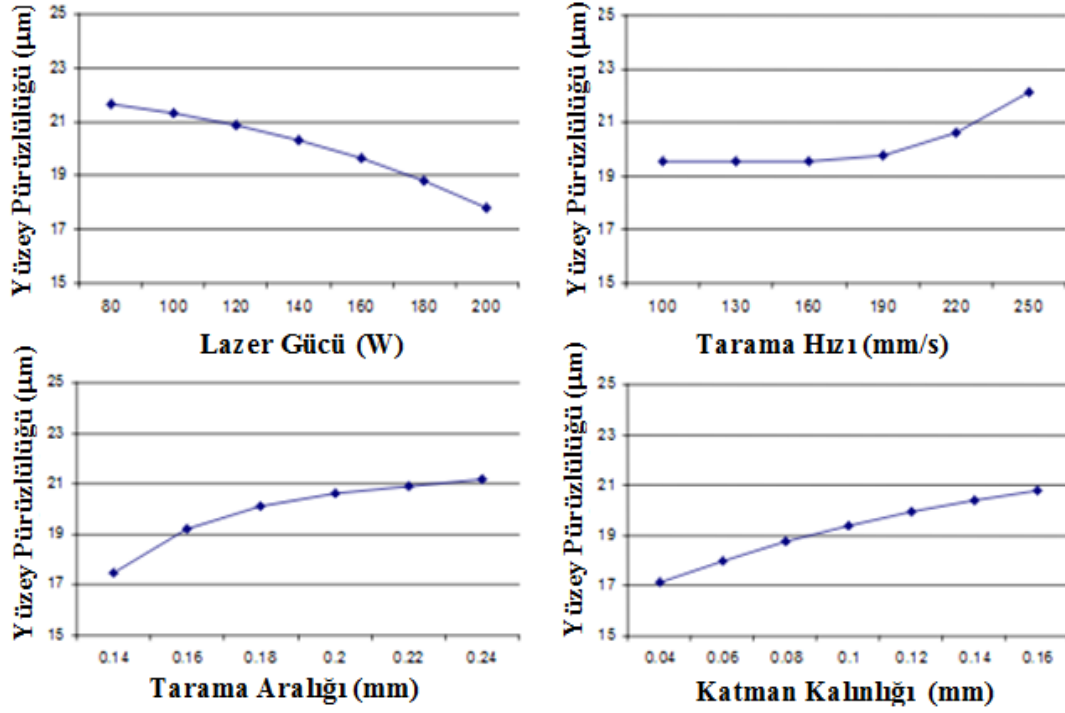
düşük katman kalınlığı ile sağlanabildiğini rapor etmektedirler. Ayrıca çalışmalarında, lazerle metal tozların yoğunlaşmasının aşağıdaki denklemle ifade edilebildiği vurgulanmaktadır.

$$\ln(1 - D) = -K \cdot \psi \quad (2)$$



Şekil 17. Metal lazer sinterlemedeki işlem parametrelerinin çekme dayanımına etkisi (Yu, 2005)

Eşitlik 2' de, K metal partiküllerin kimyasal içeriğine, partikül şekli ve büyüklüğüne, oksijen içeriğine bağlı yoğunlaşma katsayısıdır, ψ lazer spesifik enerjisinin üstel fonksiyonu ve D ise, metal partikülün yoğunlaşmasını vermektedir. Yu (2005), DMLS işlem parametrelerinin optimizasyonu üzerine yapmış olduğu doktora tezinde, Şekil 17 ve Şekil 18' de verilen sonuçlara ulaşıldığını rapor etmektedir. Yu (2005)' nun elde ettiği sonuçlar ile Simchi vd. (2006)' nin ortaya koyduğu sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Buna göre, lazer gücünün artmasıyla çekme dayanımında artış görülürken, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığının artmasıyla da çekme dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Yu (2005), DMLS' de, lazer gücündeki artış ile enerji yoğunluğunun artmasından dolayı toz partiküllerinin birbiriyle temas alanları artarak daha fazla sinter bağının (neck) oluşmasıyla gözenegin azaldığı ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünde düşüş görüldüğünü, 190 mm/s tarama hızından sonra yüzey pürüzlülüğünün arttığını, tarama mesafesi ve katman kalınlığının artmasıyla da yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, lazer gücünün artırılmasının veya tarama hızının azaltılmasının, sinterleme yönü boyunca parçada daha fazla boyutsal değişime (shrinkage) neden olduğunu belirlemişlerdir. Bu yüksek boyutsal değişime sebep olan sinter ve termal büzülmenin, metal partiküllerin sinterleme sırasında daha yüksek lazer enerjisini absorbe etmesi sonucu oluştuğunu ifade etmektedirler.



Şekil 18. DMLS işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Yu, 2005)

Kruth vd. (2005), sinter mekanizmasını ve parça yoğunluğunu etkileyen lazer enerji yoğunluğunun Eşitlik 3' te verilen denklemle hesaplanabildiğini ileri sürmektedir ve bu denklemde E lazer enerji yoğunluğu (J/mm^3), P lazer gücü (W), v tarama hızı (mm/s), s tarama aralığı (mm) ve t ise katman kalınlığı (mm) olarak tanımlanmaktadır. Turhan ve Özsoy (2016)' da, lazer parametrelerini değiştirerek farklı enerji yoğunlukları ile Ti-6Al-4V tozunu sinterlemişler ve $1,36 J/mm^3$ lazer enerji yoğunluğu ile parça yoğunluğunu $4,41 g/cm^3$, $3 J/mm^3$ lazer enerji yoğunluğu ile de parça yoğunluğunu $4,44 g/cm^3$ elde etmişlerdir. Elde ettikleri yoğunluk artışının, DMLS Ti-6Al-4V malzemesinin mikro sertliğini %27 mertebesinde arttırdığını göstermektedir.

$$E = \frac{P}{v \cdot s \cdot t} \quad (3)$$

4) Sonuç ve Gelecekte Eklemeli İmalat

Çok sayıda bilimsel, deneysel ve endüstriyel araştırma incelenerek hazırlanan bu makalede, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Son şekle yakın ve minimum malzeme sarfiyatı ile yapılan bu imalat yönteminde, polimer esaslı malzemeler ile birlikte başta takım çeliği, paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımları, karbür metal partikülleri kullanılarak ve kaynak kabiliyeti iyi olan tüm metal esaslı malzemelerden endüstriye parça imalatı yapılabilir hale gelmiştir. Bu dinamik yapıya sahip yüksek teknolojinin, başta medikal olmak üzere, havacılık, savunma, otomotiv, ev aletleri ve akademik sektörlerde artan ivme ile yaygınlaştığı görülmüştür.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, eklemeli imalatta ürün kalitesini etkileyen birincil ve ikincil parametreler vardır. Birincil parametreler, BDT ve STL datalarının hazırlama aşamasıdır ve bu

aşamada, 3-B tasarımın STL' ye dönüştürülmesi sırasında ortaya çıkan dilimleme ve yerleştirme hatalarının giderilmesi oldukça önemlidir. Üç boyutlu modelden iki boyutlu modele geçtikten (STL formatı) sonra, imal edilecek tasarımda küçük radyüslerin, keskin köşelerin, eğik yüzeylerin ve çizgilerin, deliklerin daireselliği ve üst üste binen yüzeylerin kontrol edilmesi ve daha sonra tavsiye edilen üçgen seri ile dilimleme ve bu dilimlerin boyutları ve yoğunluğunun yukarıda sıralanan karmaşık geometrilere göre belirlenmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu iki boyutlu STL modelin, dijital ortamda SLS makinesinin yazdıracağı alana ve destek elemanı sınırları içerisine yerleştirilmesi bir diğer önemli unsurdur.

Ekleme imalatta veri hazırlama aşamasından sonra, toz malzemesi, şekli ve boyutu, lazer gücü, tarama yönü, tarama hızı, tarama çizgi aralığı ve katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin ürün mekanik dayanımı, boyutsal değişimi (shrinkage-springback) ve yüzey kalitesi üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Örneğin, literatürde bir dizi yapılan deneylere göre, lazer gücünün artması çekme dayanımını arttırırken, tozların yüksek lazer enerjisini absorbe ettiklerinden dolayı daha fazla boyutsal değişime neden olduğu ve dolayısıyla yüzey kalitesini düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Ekleme imalatta bir diğer önemli çıktı, üründe sinterleme sırasında termal ve şekillendirme mekanizmalarından kaynaklanan iç gerilmelerin neden olduğu istenmeyen çarpılma, çatlama ve boyutsal değişim olarak tanımlanmakta ve bu kalitesizliklerin giderilmesi için katmanlarda aşırı ısınmaya neden olan işlem parametrelerinin çok iyi seçilmesi önerilmektedir. Ayrıca, iç gerilme giderme amaçlı, parça yüzeyindeki çekme gerilmelerini basmaya dönüştürecek plastik deformasyon prensiplerinin uygulanması, lazer seçici eritme sırasında oluşan sıcaklığın kullanılarak parçada termal değişimin azaltılması gibi yaklaşımların kullanılabilmesi ve yeni bir metot olarak tanımlanan (Şekil 16) distorsiyon dengeleme metodunun (Afazov vd., 2017) geliştirildiği görülmüştür.

Ekleme imalat ülkemizde yeni bir teknoloji olarak görülmekte ancak Şekil 4' de görüleceği üzere, ASTM F 42 standardına göre geniş yelpazeye sahip bir şekilde sınıflandırılmış ve bu yüksek teknolojilerin (hightech) dünya imalat sektöründe etkin bir şekilde kullanılmaya başlandığı ve geliştirilmeye devam edildiği görülmektedir. Bu bağlamda, metodun en önemli dezavantajlarından biri olan düşük imalat hızı ve maliyetin iyileştirilmesi adına pek çok çalışmanın (Tablo 1) yapıldığı görülmüştür. Johnson (2015)' un yayınladığı rapora göre, 2023 yılında eklemeli imalat hızının mevcut duruma göre % 88 oranında arttırılacağı ve bu sayede endüstride potansiyelinin oldukça genişleyeceği ileri sürülmektedir.

Son olarak, ülkemiz sanayisinde ciddi gelişmeler mevcuttur ancak bu yüksek teknolojiye sahip imalat proseslerinin ve giriş malzemesi olan polimer, metal ve seramik partikül imalatının ülkemizde de çalışılması ve geliştirilmesi, ülkemiz havacılık, savunma, medikal ve otomotiv sanayinin gelişmesi bakımından oldukça önem arz etmektedir. Son zamanlarda bu teknoloji ile ilgili yapılan dikkat çekici açıklamalarda (Gov2020, 2017), bioprinting teknolojisi ile yapay organ ve doku imalatının yapılacağından ve çoğu sektörde yaygınlaşarak (Custom Market Research Service, 2013), endüstride konvansiyonel imalat yöntemlerinin (talaşlı imalat, döküm, kaynak gibi) giderek payının düşeceği, 2013 yılında eklemeli imalatın 3 milyar dolarlık pazar payının 2020 yılında 21 milyar dolar seviyesine çıkacağı rapor edilmektedir (Weider, 2017).

Kaynaklar

Additive Manufacturing Research Group. (2017). About Additive Manufacturing. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (30.09.2017).

Afazov, S., Okioga, A., Holloway, A., Denmark, W., Triantaphyllou, A., Smith, S.A., Smith, L.B. (2017). A Methodology for Precision Additive Manufacturing Through Compensation. *Precision Engineering*, 50, 269–274.

Ahn, N., Kweona, J.H., Choi, J., Lee, S. (2012). Quantification of Surface Roughness of Parts Processed By Laminated Object Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 339–346.

Aniwaa. (2017). Categories of 3D printing technologies and processes. <http://www.aniwaa.com/3d-printing-technologies-and-the-3d-printing-process/> (26.09.2017).

Annual Book of ASTM Standards Book (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. International, West Conshohocken, USA.

Arcam. (2014). Arcam history. <http://www.arcam.com/company/about-arcam/history/> (21.09.2017).

Bagg, S.D., Sochalski, K.L.M., Bunn, J.R. (2016). The Effect of Laser Scan Strategy on Distortion and Residual Stresses of Archesmade with Selective Laser Melting. American Society of Precision Engineering (ASPE) 2016 Summer Topical Meeting: Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing, USA.

Bourell, D.L., Marcus, H. L., Barlow, J. W. and Beaman, J. J. (1992). Selective Laser Sintering of Metals and Ceramics, *Int. Journal of Powder Metall.*, 2, 28, 369–381.

Buchbinder, D., Meiners, W., Pirch, N., Wissenbach, K. (2014). Investigation on Reducing Distortion by Preheating During Manufacture of Aluminum Components Using Selective Laser Melting. *Journal of Laser Appl.*, 26(1), 012004.

Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S. (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd edition. World Scientific. Singapore.

Cima, M.J., Haggerty, J.S., Sachs, E.M., Williams, P.A. (1989). Three dimensional Printing Techniques. US Patent US5204055 A, USA.

Colegrove, P.A., Donoghue, J., Martina, F., Gu, J., Prangnell, P., Hönnige, J. (2017). Application of Bulk Deformation Methods for Microstructural and Material Property Improvement and Residual Stress and Distortion Control in Additively Manufactured Components. *Scripta Materialia*, 135, 111-118.

Custom Market Research Service. (2013). New market research report on 3-B printing, <http://www.3ders.org/articles/20131111-3d-printing-market-worth-billion-by-2020.html> (28.09.2017).

Custom. (2017). Laminated object manufacturing (LOM). <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing> (19.09.2017).

Deckard, C.R. (1986). Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering. PCT/US Patent WO1988002677 A2, USA.

Deckard, C.R. (1998). Selective Laser Sintering. Univeristy of Texas, PhD Thesis at Department of Mechanical Engineering, Austin, USA.

Delgado, J., Ciurana, J., Rodríguez, C.A. (2012). Influence of Process Parameters on Part Quality and Mechanical Properties for Dmls and Slm with Iron-based Materials. *Int. Journal of Adv. Manuf. Technol.*, 60, 601–610, 53.

Dreams. (2017). Material extrusion. <http://seb199.me.vt.edu/dreams/material-extrusion/> (24.09.2017).

Dwivedi, S., Rai, S. (2016). Rapid Prototyping Technology and Its Applications. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3,10, 332-339.

Edwards, T. (2017). mechanical prototyping processes: what to use and when. <http://mindtribe.com/2009/06/been-there-prototyped-that-what-process-and-when/> (03.10.2017).

EOS. (2013). Industries and markets. http://www.eos.info/industries_markets (21.09.2017).

EPMA (2015). Introduction to Additive Manufacturing Technology, A Guide for Designer and Engineer. EPMA Executive Director Shrewsbury, UK.

Exone. (2017). Binder Jetting. <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>. (20.12.2017).

Explaining. (2017). Powder bed fusion. <http://explainingthefuture.com/3dprinting.html>. (22.09.2017).

Gibson, I., Shi, D. (1997) Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process. *Rapid Prototyping Journal*, 3, 4, 129-136.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). Vat Photopolymerization Processes. *Additive Manufacturing Technologies*, 63-106, Springer, New York.

Gibson, I., Rosen, W.D., Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, 1. Edition, Springer Publishers, United Kingdom.

GOV2020. (2017). Additive Manufacturing. <http://government-2020.dupress.com/driver/additive-manufacturing/> (30.09.2017).

Gu, D., Shen, Y. (2008). Processing Conditions and Microstructural Features of Porous 316L Stainless Steel Components by Dmls. *Applied Surface Science*, 255,1880–1887.

Gu, D., Shen, Y. (2009). Balling Phenomena in Direct Laser Sintering of Stainless Steel Powder: Metallurgical Mechanisms and Control Methods. *Materials and Design*, 30, 2903–2910.

Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., Zeng, X. (2013). Effects of Processing Parameters on Tensile Properties of Selective Laser Melted 304 Stainless Steel. *Materials and Design*, 50, 581–586.

- Hanzl, P., Zetek, M., Bakša, T., Kroupa, T. (2015). The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts. *Procedia Engineering*, 100,1405 – 1413.
- Kobryn, P.A., Semiatin S.L. (2001). *Mechanical Properties of Laser-Deposited Ti-6Al-4V. Solid Freeform Fabrication*. The University of Texas, Austin, USA.
- Krar, S.F., Gill, R.A. (2003). *Exploring Advanced Manufacturing Technologies*. 1. Edition. New York.
- Kruth, J.P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L., Humbeeck, J.V. (2010). *Part and Material Properties in Selective Laser Melting of Metals*. 16th International Symposium Electro Machining, Shanghai, China.
- Kruth, J.P., Kumar, S. (2005). Statistical Analysis of Experimental Parameters in Selective Laser Sintering. *Journal of Adv. Eng. Materials* 7(8), 750–755.
- Larson, R. (1993). *Method and Device for Producing Three-Dimensional Bodies*. US Patent US5786562 A, USA.
- Longhitanoa, G.A., Larosaa, M.A., Munhoza, A.L.J., Zavagliaa, C.A.C., Ierardia, M.C.F. (2015). Surface Finishes for Ti-6Al-4V Alloy Produced by Direct Metal Laser Sintering. *Materials Research* 18(4), 838-842.
- Lou A. and Grosvenor C. (2012). Selective laser sintering, birth of an industry. http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php (22.09.2017).
- Manriquez-Frayre, J.A., Bourell, D.L. (1990). *Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder*. Solid Freeform Fabrication Symposium, 99–106, Austin, USA.
- Marcus, H.L., Bourell, D.L., Beaman, J.J., Manthiram, A., Barlow, J.W., Crawford, R.H. (1993). *Challenges in Laser Processed Solid Freeform Fabrication*. Processing and Fabrication of Advanced Materials III, TMS Materials Week Conference, 127–133, Pittsburgh, USA.
- Marhellabs. (2017). Fused deposition modeling. <https://www.marhellabs.com/en/3d-manufacturing-processes/fused-deposition-modeling-fdm/> (23.09.2017).
- Meiners, W. (1999). *Direktes Selektives Lasersintern Einkomponentiger Metallischer Werkstoffe*. Dissertation, Aachen. Germany.
- Molecule. (2017). Material jetting. <https://www.molecule.ink/markets/3d-printing/material-jetting.html> (22.09.2017).
- Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N. (2012). Metal fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science Technology*, 28(1), 1–24.
- Ouden, A.D. (2017). Rapid prototyping for 3D prototypes and visual models. <http://www.alexdenouden.nl/08/rapprod5.htm> (23.09.2017).

Over, C. (2003). Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAL6V4 mit “Selective Laser Melting. Dissertation, Aachen, Germany.

Petersheim, J. (1997). Selektives Laserschweißen—Ein Neuartiges Verfahren zur Schnellen Fertigung Mechanischer Bauteile. Elektrowarme Int., 55, B3, B80–B85.

Pucci, J.U., Christophe, B.R., Sisti, J.A., Connolly, E.S. (2017). Three-Dimensional Printing: Technologies, Applications, and Limitations in Neurosurgery. *Biotechnology Advances*, 35, 5, 521-529.

Redwood, B. (2017). Additive manufacturing technologies overview. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview> (25.09.2017).

Renishaw Apply Innovation. (2017). Data sheets – Additive Manufacturing, <http://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862> (29.09.2017).

Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R., Babu, S.S. (2016). The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing. *International Materials Reviews*, 61, 5, 315-360.

Sandia-National-Laboratories. (2017). Creating a complex metal part in a day is goal of commercial consortium. <http://www.sandia.gov/media/lens.htm> (20.09.2017).

Schleifenbaum, H., Diatlov, A., Hinke, C., Bultmann, J., Voswinckel, H. (2011). Direct Photonic Production: Towards High Speed Additive Manufacturing of Individualized Goods, *Journal of Prod. Eng. Res. Devel.*, 5, 359–371.

Schuh, G., Klocke, F., Brecher, C., Schmitt, R. (2007). Excellence in Production. Apprimus, Aachen, Germany.

Shi, Y., Li, Z., Sun, H., Huang, S. and Zeng, F. (2004). Effect of the Properties of the Polymer Materials on the Quality of Selective Laser Sintering Parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 218, 3, 247-252.

Shifeng, W., Shuai, L., Qingsong, W., Yan C.H., Sheng, Z., Yusheng, S. (2014). Effect of Molted Pool Boundaries on the Mechanical Properties of Selective Laser Melting Parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2660–2667.

Sign. (2017). The digital eye: 3D print Technology. <https://sdgmag.com/features/digital-eye-3d-print-technology> (22.09.2017).

Simchi, A., vd. (2006). Direct Laser Sintering of Metal Powders: Mechanism, Kinetics and Microstructural Features. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 428, 148-158.

Sinkora, E. (2017). The pluses and minuses of combining additive & subtractive machining. <http://advancedmanufacturing.org/pluses-minuses-combining-additive-subtractive-machining/> (20.09.2017).

Sofos, A.B.K.K. (2014). Additive Manufacturing and Production of Metallic Parts in Automotive Industry, Master Thesis in Production Engineering and Management, Kth Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. (2012). The 7 categories of Additive Manufacturing. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (29.09.2017).

Stratasys Ltd. (2014). PolyJet technology. <http://www.stratasys.com/3dprinters/technology/polyjet-technology> (20.09.2017).

Su, W.N., Erasenthiran, P., Dick, P.M. (2003). Investigation of Fully Dense Laser Sintering of Tool Steel Powder Using A Pulsed Nd: Yag (Neodymium-Dopedyttrium Aluminium Garnet) Laser. Proceedings of the Institution of Mech. Engineers Part C. Journal of Mech. Eng. Sci., 217, 127–138.

Threading. (2017). Binder jetting 3-B printing technology. <https://www.threading.com/blog/%E2%80%8Bbinder-jetting-3d-printing-technology> (24.09.2017).

Turhan, S., Özsoy, A. (2016). DMLS Yöntemiyle İmal Edilen Ti-6Al-4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi. SDU Uluslararası Teknolojik Araştırmalar Dergisi, 8, 2, 15-27.

Wagner, C. (2003). Untersuchungen zum Selektiven Lasersintern von Metallen. Dissertation, Aachen, Germany.

Wallace, J. vd. (2014). Validating Continuous Digital Light Processing (cDLP) Additive Manufacturing Accuracy and Tissue Engineering Utility of a Dye-initiator Package. Biofabrication, 6, 015003, 14.

Wang, X.C., Laoui, T., Bonse, J., Froyen, L. (2002). Direct Selective Laser Sintering of Hard Metal Powders: Experimental Study and Simulation. Int. Journal of Adv. Manufact. Technol., 42, 351–357.

Weider, Z.S. (2017). The future of additive manufacturing. Imperial College London. http://www3.imperial.ac.uk/newsandeventspggrp/imperialcollege/engineering/imse/newsummary/news_30-5-2017-12-2-51 (30.05.2017).

White, D. (1999). Ultrasonic Object Consolidation. US Patent US6519500B1, USA.

Wohlers, T., Gorne, T. (2014). History of Additive Manufacturing, Wöhler Reports. Wöhlers Associates Inc. USA.

Xometry. (2017). Binder jetting. <https://www.xometry.com/blog/3d-printing-processes> (21.09.2017).

Yılmaz, D. (2015). Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları. Sektör Değerlendirme Raporu, STM Mühendislik Teknoloji Danışmanlık, 1-22, Ankara.

Yu, N. (2005). Process Parameters Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS). A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor Philosophy, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore.

Zhang, D. (2004). Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) für Aluminium Werkstoffe. Dissertation, Aachen, Germany.