

Türkiye’de Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı Üzerine Etkileri

Aytek Güngör

STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş., İstanbul, Türkiye
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

aytek.gungor@stm.com.tr, gungorayt@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9294-4679

ÖZET

Dövme, kesme, şekil verme, eğme, döküm, kaynak, lehim, haddeleme, ekstrüzyon ve talaşlı imalat gibi geleneksel üretim yöntemleri; yüzyıllardır yegâne imal usulleri olarak görülmektedirler. Bu durum, katmanlı imalat teknolojilerinin öne sürülmesi ile değişmiştir. Yaklaşık otuz yıldan beri üretim çevrelerinin gündeminde bulunan bu devrimsel imal usulü; cisimlerin üç boyutlu dijital modellerinin katmanlara ayrılması, imal edilmesi ve üst üste serilmesi prensibine dayanmaktadır. Katmanlı imalat teknolojilerinden sanayi dallarının kaçınılmaz bir şekilde etkileneceği öngörülmektedir. Gemi inşaatının bu konuda istisna olmayacağı, gemi tasarımı, inşaatı, malzeme tedariki ve lojistiği, tahrik sistemleri ve gemi makinelerinin üretimi, sertifikasyon ve eğitim konularında katmanlı imalatın uygulama alanı haline geleceği düşünülmektedir. Bu çalışmada; katmanlı imalat süreci, teknolojileri ve yöntemleri incelenecek, geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırılacaktır. Türkiye’nin katmanlı imalat konusunda akademik ve sektörel ilerlemesi irdelenecektir. Gemi inşaatında katmanlı imalat teknolojilerinin uygulama alanları değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı İmalat, Eklemeli İmalat, 3B Baskı, Gemi İnşaatı, Endüstri 4.0

Makale geçmişi: Geliş 26/08/2020 – Kabul 21/10/2020

Additive Manufacturing in Turkey and Its Influence on Shipbuilding

Aytek Güngör

STM Defense Technologies Engineering and Trade Inc., Istanbul, Turkey
Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
aytek.gungor@stm.com.tr, gungorayt@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9294-4679

SUMMARY

Conventional production methods such as forging, cutting, shaping, bending, casting, welding, brazing, rolling, extrusion and machining have been considered as sole production methodologies over the centuries until the idea of additive manufacturing have been asserted. This revolutionary method has been attracting attention for almost three decades that relies on division of digital three dimensional model of part into thin layers, manufacturing and then combining of those layers. Industry is presumably to be affected dramatically by these novel technologies. Shipbuilding would therefore be easily regarded as being no exception for application of additive manufacturing technologies with ship design, construction, procurement and logistics, production of propulsion systems and ship machinery, certification and training. In this study additive manufacturing process, technologies and methods will be examined and compared against conventional production processes. Turkey's advance in academic field and in industrial development on incremental production techniques will then be evaluated. Finally application of additive techniques in shipbuilding will be discussed.

Keywords: Additive Manufacturing, Incremental Techniques, 3D Printing, Shipbuilding, Industry 4.0

Article history: Received 26/08/2020 – Accepted 21/10/2020

1. Giriş

Bir parçanın işlevini yerine getirebilmesi iki özelliğine bağlıdır. Bunlardan biri geometri diğeri malzemedir. Geometri ve malzemenin uygun şekilde belli süreçlerden geçirilerek işlenmesi imal usulleri ile mümkün olmaktadır. Üç temel imal usulü bilinmektedir. Bunlar; şekil verme, aşındırma ve katmanlı imalat yöntemleridir. Malzeme üzerine kuvvet uygulanması ya da ergimiş malzemenin kalıba dökülmesiyle şekillendirilmesi, şekil verme imalat yöntemi olarak bilinmektedir. Dövme, eğme, döküm, kaynak, lehim, haddeleme ve ekstrüzyon bu yönetime örnek olarak verilebilir. Malzemedен parçalar çıkarılması ile cismin elde edildiği kesme, torna, freze, delme, vargelleme, planyalama, taşlama gibi talaşlı imalat yöntemleri aşındırma yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Şekil verme ve aşındırma imal usulleri, geleneksel üretim yöntemleri olarak ifade edilmekte olup çalışmanın buradan sonraki kısmında bu şekilde anılacaklardır. Gelişen teknoloji, geleneksel üretim yöntemlerine rakip ya da tamamlayıcı olarak malzemenin katmanlar halinde imal edilerek üst üste serilmesi ile cismin oluşturulması yani katmanlı imalat usulünü de beraberinde getirmiştir.

2. Katmanlı İmalat Kavramı

Katmanlı imalat; bir nesnenin dijital ortamda modellenmesi, mikrometre (milimetrenin onda biri, mikron) seviyesinde katmanlara ayrılması, bu katmanların üç boyutlu yazıcı makinesi ile katı, sıvı ya da toz malzemeden ergitilerek, sinterlenerek (malzemenin ergime ısısının hemen altına kadar ısıtılarak ergitilmeden kaynatılması), kürlenerek ya da yapıştırılarak imal edilmesi prensibini esas alır. Üretilen katmanlar nihayetinde üst üste serilerek cismi oluşturur. Katmanlı imalat terimi dışında; eklemeli imalat, üç boyutlu (3D ya da 3B) baskı, additive manufacturing, incremental techniques, layered manufacturing, 3D Printing gibi pek çok kavram bu yeni imal usulünü tanımlamak için kullanılmaktadır. İlk olarak Amerikalı Charles Hull tarafından 1984 yılında kürlenabilir reçinenin lazer ışınları ile istenen şekilde sertleştirilmesi (stereolitografi) fikriyle ortaya atılmıştır (Kyzioł, Kończewicz, Dynowski, 2019). Bu devrimsel üretim yönteminin, bilgisayar destekli tasarımdan (CAD) sonra üretimde yaşanan en büyük teknolojik ilerleme olduğu kabul görmektedir (Bryson, Clark, Mulhall, 2013).

Katmanlı imalat usulüne bağlı olarak yedi teknoloji geliştirilmiş olup bunlara bağlı pek çok yöntem farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Ürün yelpazesinde polimer, metal, seramik veya reçine gibi malzemeler bulunmaktadır. Katmanlı olarak üretilen cisimler; kaynak, lehim, yapıştırıcı gibi kimyasal ve fiziksel süreçler kullanılarak birleştirilebilmekte, talaşlı imalat kullanılarak nihai şekline getirilebilmektedir (ISO, 2018).

Hızlı prototipleme (rapid prototyping), hızlı kalıp üretimi (rapid tooling) ve hızlı imalat (rapid production) katmanlı imalat yönteminin üç temel kullanım amacı olarak bilinmektedir. Bir ürünün tasarım, analiz ve değerlendirme için kullanılacak fiziksel ve fonksiyonel bir benzerinin hızlı bir şekilde imal edilmesi anlamına gelen hızlı prototipleme, katmanlı imalat teknolojilerinin ilk ve en önemli kullanım sahası olarak ele alınmaktadır. Hızlı prototiplemenin, tekil ürünler için ideal olduğu belirtilmektedir. Çok sayıda üretilen nesnelere için kalıpların hızlıca imal edilmesi, hızlı kalıp üretimi olarak adlandırılmaktadır ve katmanlı imalat teknolojilerinde yaşanan gelişmelere paralel olarak ikinci kullanım amacı olarak ortaya çıkmıştır. Hızlı prototipleme ve hızlı kalıp üretiminden başka ürünün doğrudan doğruya katmanlı olarak imalatı, hızlı imalat olarak tanımlanmaktadır (ISO, 2018).

Katmanlı imalat, üretim konseptinin tanımlanması ile başlamaktadır. Bu aşamada fizibilite analizleri yapılmaktadır. Cismin katmanlı olarak imal edilmesi gereği, geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesine nazaran avantajları, hangi katmanlı imalat teknolojisinin ve yönteminin daha uygun olduğu belirlenmektedir. Konseptin belirlenmesinden tasarım aşamasına geçilmektedir. Gereksinimlerin ve teknik şartnamenin belirlenmesi akabinde üç boyutlu dijital model oluşturulmaktadır. Bu model üzerinde gerekli analizler yürütülmektedir. Tasarım aşaması tamamlandıktan sonra üretim safhasına geçilmektedir. Bu aşamada öncelikle üç boyutlu baskı gereklilikleri gibi imalatı ilgilendiren hususlar açıklığa kavuşturulmaktadır. Cismin üç boyutlu olarak basılmasından sonra yüzey düzeltme, freze ya da ısıl işlemler gibi imalat sonrası işlemler uygulanabilmektedir. İmalat süreci tamamlandıktan sonra görsel muayene, tahribatlı ya da tahribatsız testler ve basınç testleri gibi süreçlerin akabinde üretilen parça sertifikalandırılmaktadır. Ürünün hizmete girmesi sonrasında belli periyodik testler ve muayeneler uygulanmakta ve nihayetinde hurdaya ayrılmaktadır (DNV-GL, 2017).

Bu teknoloji, görece yeni bir oluşum olsa da önemli öngörüler mevcuttur. Wohlers Şirketi'nin öngörüsüne göre, küresel katmanlı imalat pazarı önümüzdeki yıllarda milyarlarca doları bulan dev bir sektör haline gelecektir. Bu sektörün %60'ının doğrudan ilişkili parçalar ve hizmetler; %40'ının ise malzeme ve baskı makinelerinden oluşması öngörülmektedir. Yine aynı şirket tarafından yapılan araştırmada gemi inşa ve denizcilik sektörü, üç boyutlu yazıcı satışları payında %5'in altında

konumlanmıştır (Bergsma, Zalm, Pruyn, 2016). Bir başka çalışmada Ulsan Creative Economy Innovation Center (Hyundai Heavy Industries iştiraki) referans gösterilerek gemi inşaatında kullanılan sadece 165 parçanın geleneksel yöntemler yerine katmanlı imalat usulleri ile üretilmesinin, yıllık 1,8 milyar dolar tasarruf sağlayacağı belirtilmektedir (Korsmik, et al, 2020).

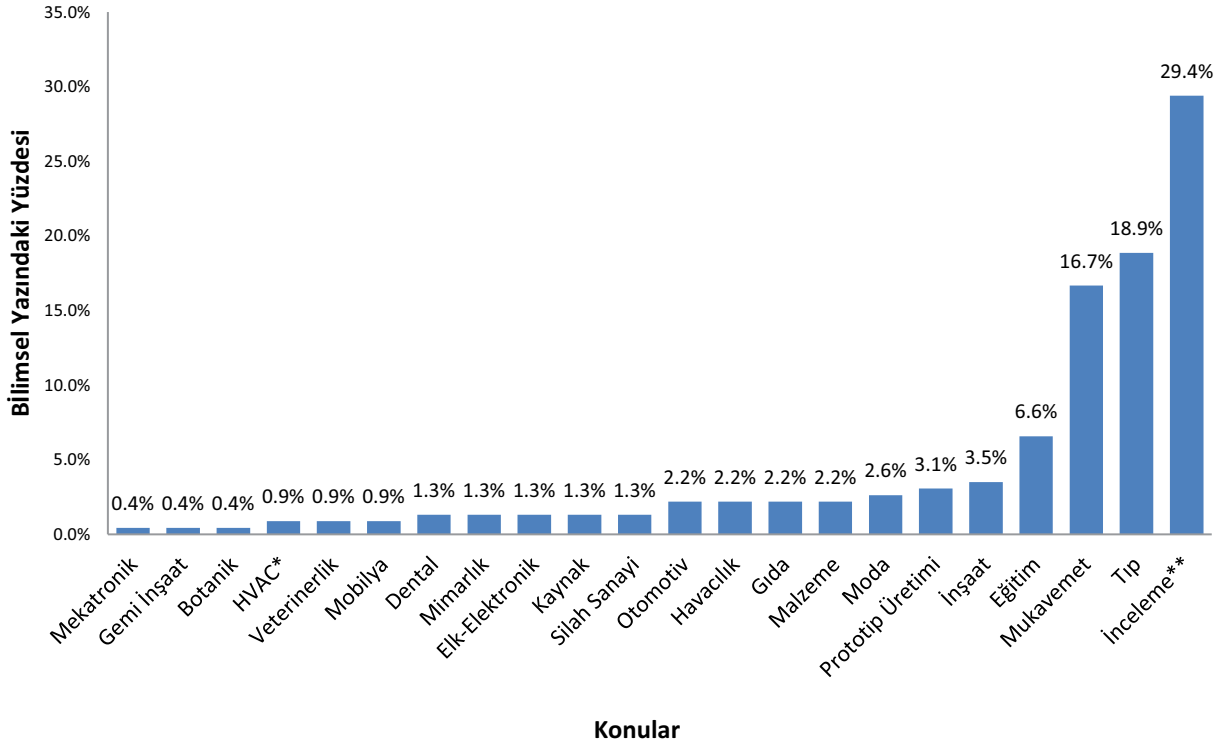
3. Katmanlı İmalat ve Türkiye

Başta hobi amaçlı ya da fonksiyonel olmayan parçaların üretimi olmak üzere polimer malzeme kullanılarak yapılan katmanlı imalat faaliyetlerinin Türkiye’de belli bir seviyeye geldiği görülebilmektedir. Buna karşın endüstriyel uygulamaların ise hala başlangıç seviyesinde olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durumun sebepleri yapılan çalışmaların akademik seviyede kalması, teknik eleman eksikliği, katmanlı imalat teknolojileri üzerine çalışma yapan ticari kurum sayısının azlığı ve metal baskı makineleri ile tozlarının üretimi konusunda bilgi birikiminin ya da isteğin kısıtlı oluşu olarak sıralanabilir. Tüm bunların ötesinde katmanlı imalat ve dijital dönüşüm konusunda farkındalığın oldukça mütevazı seviyede olması vurgulanması gereken bir diğer konudur.

Savunma Teknolojileri ve Mühendislik Ticaret A.Ş. (STM) Firması, 2016 yılında Türkiye’nin özellikle savunma sanayiinin katmanlı imalat teknolojilerinde geldiği noktanın belirlenmesi amacıyla bir rapor yayınlanmıştır. Bu raporda Türkiye’de havacılık sektöründe özelinde katmanlı imalat teknolojilerinin büyük bir potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir. Raporda Milli Muharip Uçak (TF-X), özgün helikopter, motor, iniş takımları, roket geliştirme gibi projelerde Savunma Sanayii Başkanlığı tarafından fizibilite çalışmalarının yürütüldüğü belirtilmektedir. Üç boyutlu baskı makinesi geliştirebilen ve üretebilen firmaların ağırlıklı olarak Almanya ve ABD menşeli olduğu az da olsa Japonya, Hollanda, İsveç ve İsrail firmalarının da bulunduğu raporda yer almaktadır. Türkiye’de kullanılan üretim tezgâhlarının çoğunun polimer malzeme işleme yeterliliğinde olduğu ve bunların çok azının büyük boyutlu işleme kapasitesine sahip olduğu ifade edilmektedir. Büyük işleme kapasitesine sahip makinelerin, sayılı büyük kuruluştaki bulunduğu üç boyutlu yazıcı fiyatlarının ise hayli yüksek seviyelerde konumlandığı vurgulanmıştır. 125x125x75 mm boyutlarında metal baskı kapasitesine sahip bir makinenin maliyetinin 450 bin Avro, 500x280x325 mm boyutlarında metal baskı yapabilen bir tezgâhın maliyeti ise 1,2 milyon Avroya ulaşabildiği bilgisi sunulmaktadır.

Tüm bu verilerin ışığında bu çalışma kapsamında, Google Akademik veri tabanı kullanılarak Türkiye’de katmanlı imalat konusunda bilimsel yazın taraması yapılmıştır. Araştırmanın diğer ayağı olan sektörel uygulamaları için Google arama motoru üzerinde Türkiye genelinde firmalara ulaşmaya çalışılmıştır. Bilimsel yazında örneklendirilen akademik çalışmaların (Şekil 1) büyük bölümünün katmanlı imalat teknolojileri yöntem ve uygulamaları üzerine genel inceleme çalışmaları olduğu görülmüştür. Tıp alanında özellikle hasarlı dokuların yeniden üretilmesi, protez ve doku imalatı, stereolitografi yöntemi ile kalp kası ve kalp kapakçıklarının imalatı gibi konuların işlendiği sonucuna varılmıştır. Katmanlı imalat teknolojilerinin tartışmaya en açık konularından biri olan mukavemet, bilimsel yazında üzerinde önemle durulan bir diğer konu olmuştur. Karbon takviyeli ya da takviyesiz PLA ve ABS gibi termoplastik malzemelerin nozul ekstrüzyonu yöntemi ile üretilmesi ve bu malzemeden üretilen kirşlerin mukavemet ve burkulma analizleri gibi önemli konular ele alınmıştır. Gemi modellerinin katmanlı imalat kullanılarak üretilmesi üzerinde durulmuştur.

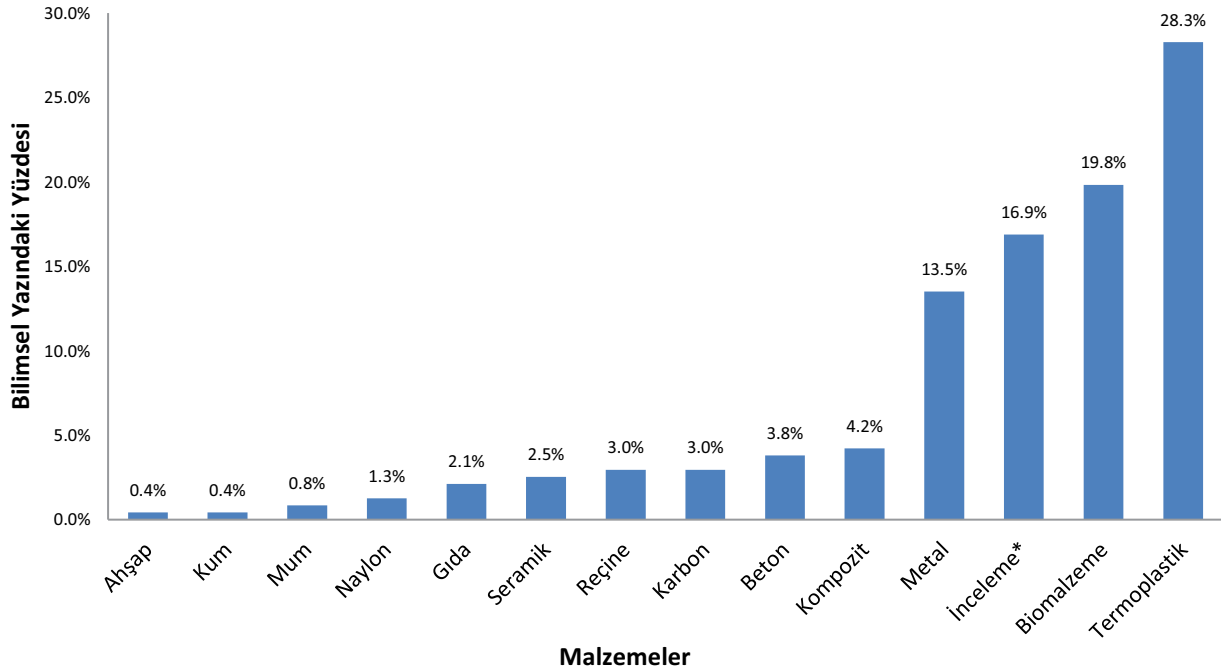
Akademik çalışmaların konu aldığı malzemelerde termoplastik üst sırada yer almaktadır. Ardından katmanlı imalatın tıbbi amaçlar ile uygulaması için yapılan yoğun araştırmalar nedeniyle biyomalzeme takip etmektedir. Akabinde metal gelmektedir (Şekil 2).



* HVAC: Heating, Ventilating and Air Conditioning (Isıtma, Soğutma ve Havalandırma)

** Belirli bir malzeme ya da konu özelinde şekillendirilmeyen, genel yöntem ve uygulamalar konusunda yürütülen çalışmalar

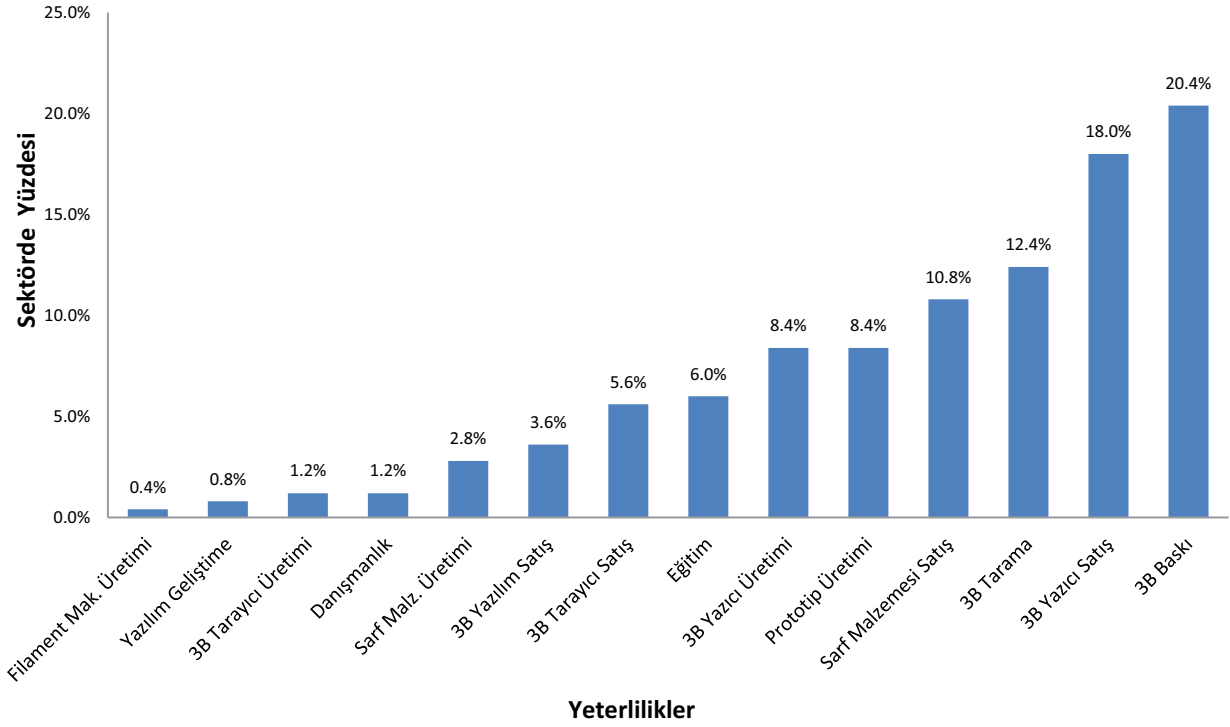
Şekil 1. Bilimsel yazında işlenen konular



* Belirli bir malzeme ya da konu özelinde şekillendirilmeyen, genel yöntem ve uygulamalar konusunda yürütülen çalışmalar

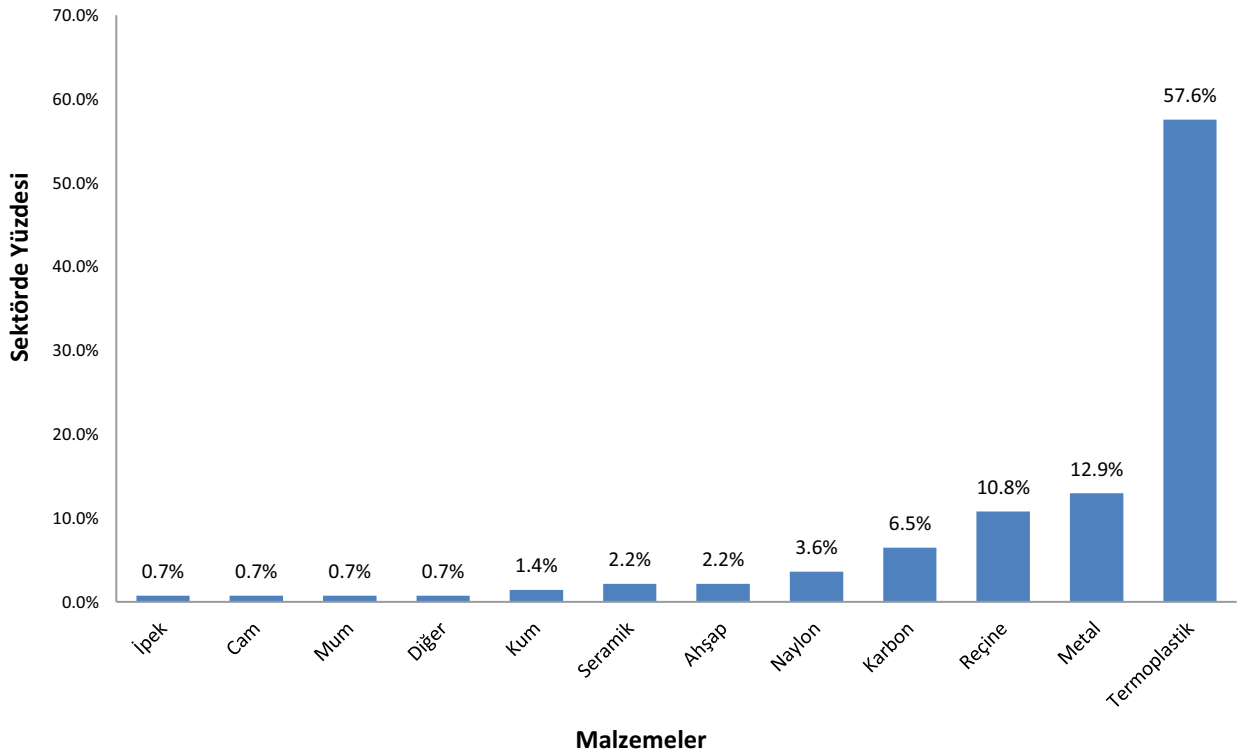
Şekil 2. Bilimsel yazında işlenen malzemeler

Türkiye’de faaliyet gösteren ve bu çalışma kapsamında örneklenen firmaların, genellikle üç boyutlu baskı faaliyeti icra ettikleri görülmüştür. Baskı hizmetlerini üç boyutlu yazıcı satış hizmetleri izlemektedir. Satış faaliyetlerinin ağırlıklı yurtdışında üretilen makinelerin ve markaların Türkiye temsilciliği boyutunda olduğu değerlendirilmiştir. Yerli yazıcı üretimi yapan firmaların da bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 3).



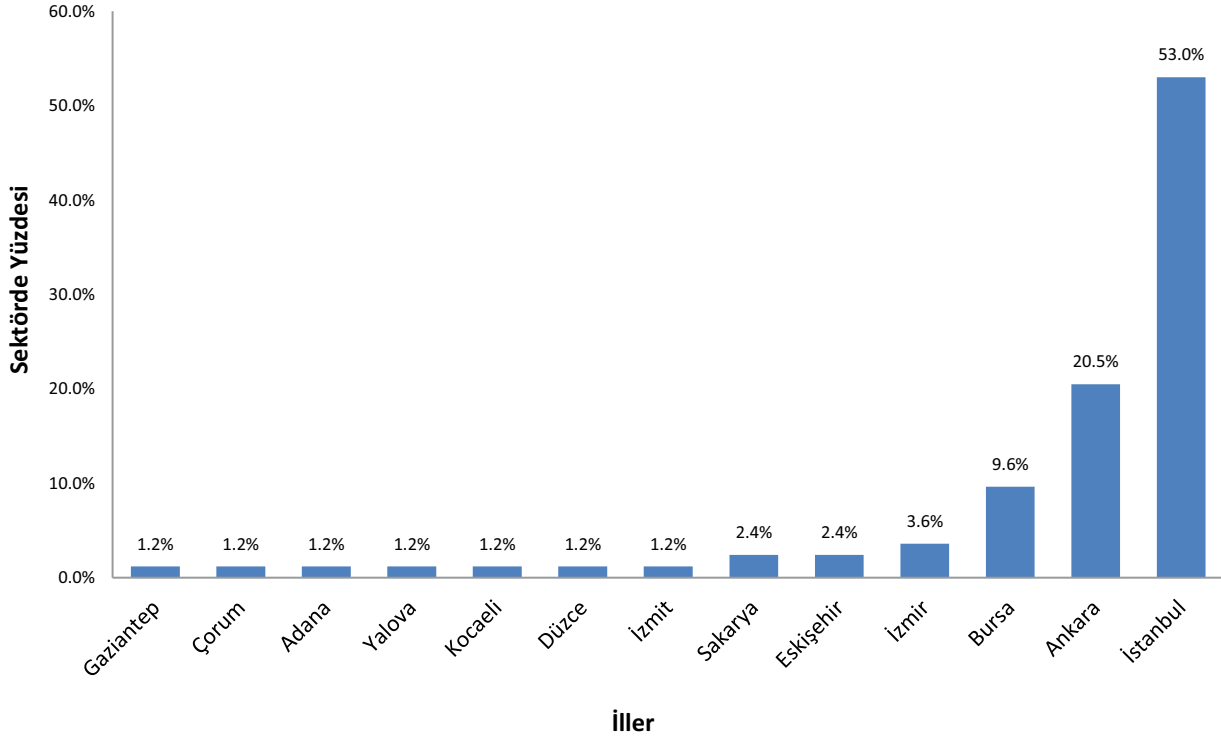
Şekil 3. Firma yeterlilikleri

Firmaların faaliyetlerinde kullandığı malzemelerin başında termoplastiğin geldiği bunu metal ve reçine takip ettiği sonucuna varılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Firmaların işlediği malzemeler

Firmaların kurulduğu bölgeler incelendiğinde ağırlıklı olarak İstanbul, Ankara ve Bursa civarında konumlandıkları tespit edilmiştir. Gaziantep, Çorum, Adana, Yalova, Kocaeli, Düzce, İzmit, Sakarya, Eskişehir ve İzmir illerinde kurulan firma sayısının gün geçtikçe arttığı gözlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Firma konumları

4. Geleneksel ve Katmanlı İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Katmanlı imalat teknolojilerinde malzeme yalnızca ürün için kullanılmaktadır. Döküm kalıbı gibi üretimi destekleyici yapılara ihtiyaç duyulmamaktadır. Talaşlı imalat sürecindeki kesilip atılan madde bulunmadığından ötürü atık madde oluşmamaktadır. Lojistik ve depo maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Düşük atık ve düşük yakıt tüketimi söz konusudur. Depo maliyetlerinin düşmesi tedarik zincirini hatırı sayılır derecede kısaltmaktadır. Karmaşık tasarımların kolayca imal edilebilmesi mümkün kılınmış, daha optimize, bütünleşmiş ve çoklu malzemeden oluşan ürünlerin elde edilebilmesinin önü açılmıştır. Tasarımın model üzerinden yürütülmesi, tasarımda yaşanan değişikliklere kolayca adapte olunabilmesini beraberinde getirmiştir. Katmanlı imalat, Dördüncü Sanayi Devriminin (Endüstri 4.0) en büyük vaatlerinden olan değişikliklere çok hızlı adaptasyon idealini bir kademe daha gerçekleştirilebilir kılmaktadır (Bergsma, Zalm, Pruyn, 2016).

Katmanlı imalat; yalın üretim, ham madde, işgücü ve lojistik konularında ciddi tasarruf ve karmaşık tasarımların üretilmesinde önemli kolaylıklar sunmaktadır. Bununla beraber bir takım olumsuzluklar da söz konusudur. Ancak uygun stratejiler ve yöntemler kullanılması, gelişen teknoloji ile sürecin daha verimli hale gelmesi ve talebin artması ile kısa ve uzun vadede aşılamayacak engeller mevzu bahis değildir.

Bir parçanın katmanlı imalat maliyeti, aynı ürünün bir sonraki üretiminde düşmemekte ve ölçek ekonomisi katmanlı imalat için uygulanabilir görünmemektedir. Mevcut teknoloji ile geleneksel imal usulleri uzun vadeli seri üretim için, katmanlı imalat ise sipariş ürünlere ya da kısa üretim tekrarlarına daha uygun görünmektedir. Burada hızlı kalıp üretimi (rapid tooling) ile parçanın değil kalıbın katmanlı olarak üretilmesi ölçek ekonomisi açısından daha uygun bir strateji olarak görülmektedir. Ayrıca teknolojinin ve talebin gelişmesi ile hızlı imalatın (rapid production) ekonomik açıdan daha cazip hale gelebilmesi de mümkün olabilecektir. Bir diğer husus malzeme özellikleridir. Malzeme özellikleri,

malzeme tabakalarının doğrultusuna göre değişmekte olup anizotropi yaratmaktadır. Bu nedenle mukavemet ve yorulma (fatigue) gibi yapısal özellikler üzerinde etkileri tam olarak bilinmemektedir. Ancak bilimsel yazında yürütülen bazı çalışmalar, ısıl işlemle ile mekanik özelliklerde ciddi düzelmeler kaydedildiğini belirtmektedir (Nemani, Ghaffari, Nasiri, 2020; Jung, et al, 2019). Katmanlı imalat sürecinde tabakalar kaba bir yüzey görüntüsü oluşturabilmekte ve basamak etkisi yaratabilmektedir. Bu durum da yine üretim sonrası işlemler ile kolaylıkla düzeltilebilmektedir. Katmanlı imalat esnasında hız ile kalite arasında bir ödünleşme söz konusu olabilmektedir. Teknolojinin gelişmesi, yeni yöntemler öne sürülmesi ya da mevcut yöntemlerin hızlanması gerekmektedir. Bir diğer konu iş sağlığı ve güvenliğidir. Plastik ve metal tozlarının sağlık açısından yeni riskler teşkil edebilmektedir. İş sağlığı ve güvenliği standartlarının katmanlı imalat süreçlerini göz önünde bulunduracak şekilde gözden geçirilmesi bu sorunun çözümüne katkı sağlayacaktır. Katmanlı imalat konusunda yeterli yasal düzenleme, standart ve kural seti henüz bulunmamakta olup yeterli kalifiye eleman sıkıntısı hissedilmektedir. Kural ve standartların geliştirilmesi konusunda özellikle klas kuruluşlarının kılavuzlarının (ABS, 2018), (BV, 2019), (DNV-GL, 2017), (LR, 2016) yayınlanmaya başlaması bu problemin beklenenden kısa sürede çözülebileceğini göstermektedir (Bergsma, Zalm, Pruyn, 2016).

5. Katmanlı İmalat Teknolojileri

5.1. Hazne polimerizasyonu (Vat polymerization)

Hazne polimerizasyonu; kürlenme (polimer malzemenin çeşitli yöntemler ile sertleştirilmesi) kimyasal işlemi üzerine kurulmuş bir teknolojidir. Kürlenebilir sıvı fotopolimer malzemenin UV ışınları kullanılarak katmanlar halinde bir hazne içinde oluşturulması amacını taşımaktadır. Kürlenmemiş sıvı malzemenin destek vazifesi görmesi sebebiyle ayrıca destek malzeme gerektirmemektedir. Bu teknolojiye hazne içindeki platform, hazne yüzeyinden katman kalınlığı kadar aşağı iner. Bu esnada UV ışını katmanı kürlenir. Akabinde platform bir katman yüksekliği kadar tekrar aşağı iner ve yüzeye dolan sıvı fotopolimer malzeme de önceki kürlenmiş katman üzerine kürlenir. Cisim oluşana kadar bu süreç devam eder. En sonunda kürlenmeyen sıvı tahliye edilir ve cisim elde edilir. Bazı makinelerde katmanları arasında hareket ederek daha pürüzsüz bir yüzey sağlanması için kullanılabilir (Loughborough University, n.d.).

Tıbbi ürünlerin imalatı, otomotiv, havacılık gibi pek çok sektörde kullanılabilir (Dehghanhadikolaei, et al, 2018).

Hazne polimerizasyonu teknolojisi çeşitli yöntemler vasıtası ile uygulanabilmektedir. Bunlardan bazıları şunlardır: Stereolitografi (Stereolithography, SLA/SL), Sıvı Termal Polimerizasyon (Liquid Polymerization, LP), Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing, DLP), Sürekli Dijital Işık İşleme (Continuous Digital Light Processing, CDLP), Film Transfer Görüntüleme (Film Transfer Imaging, FTI) (Bergsma et al., 2016).

5.2. Nozul ekstrüzyonu (Extrusion)

Nozul ekstrüzyonu, genellikle bir makaraya sarılmış filament şeklinde depolanan termoplastik malzemelerin (ABS, PLA) ısıtılarak bir nozuldaki ergitilmiş halde katmanlar halinde serilmesi ve cismin çıkarılması şeklinde gerçekleşen yöntemdir. Bu sırada katmanların serildiği platform aşağı yukarı hareket edebilmektedir. Destek yapıların imal edilmesi için ek nozul kullanılabilir. Nozuldaki ergitilmiş olarak bırakılan malzeme, ilk katmanı oluşturacak şekilde serilir. Diğer katmanlar da bir önceki katman üzerine serilir. Katmanlar serildiği anda ergimiş halden katı hale geçer (Loughborough University, n.d.).

Pürüzsüz yüzey özellikleri beklenmiyorsa, bu yöntemin akabinde ayrıca yüzey düzeltme işlemlerinin uygulanmasına pek ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntem daha çok ofis-ev tipi amatör uygulamalarda, yük taşımayan cisimlerin üretilmesinde ya da moda amaçlı baskılarda uygulanabilmektedir.

Nozul Ekstrüzyonu teknolojisi altında yer alan bazı yöntemler şunlardır: Ergiterek Biriktirme ile Modelleme (Fused Deposition Modelling, FDM), Erimiş Filament Üretimi (Fused Filament Fabrication, FFF), Ergimiş Katman İmalatı (Fused Layer Manufacturing, FLM), Robocasting, Direct Ink Writing, (Robocasting, Direct Ink Writing, DIW) (Bergsma et al., 2016).

5.3. Püskürtme (Material jetting)

İki boyutlu mürekkep püskürtmeli yazıcılara benzer şekilde kullanılan bu yöntemde malzeme bir platform üzerine sürekli ya da gerektiğinde platforma yatay olarak hareket edebilen bir nozul vasıtası ile püskürtülür. Püskürtme sonrasında UV ışını kullanılarak kürlenir ya da değdiği anda sertleşebilir. Nihayetinde destek malzemeler kaldırılır. Malzeme damlalar halinde serildiği için kullanım alanı polimer ya da mum gibi maddeler ile sınırlıdır (Loughborough University, n.d.).

Bu yöntemin diğer önemli avantajları; düşük zehirlilik, az güç tüketimi ve düşük malzeme maliyeti olarak sayılabilmektedir (All About Engineering, n.d.).

Inkjet, Polyjet, Thermojet, Aerosoljet, Multi Jet Modelling, Nano Parçacık Püskürtme (Nano Particle Jetting, NPJ), Balistik Parçacık İmalat (Ballistic Particle Manufacturing, BPM) ve Drop on Demand (DOD); püskürtme teknolojisinin uygulandığı yöntemlerden bazılarıdır (Bergsma et al., 2016).

5.4. Yapıştırımlı püskürtme (Binder jetting)

Sıvı bağlayıcının yatay düzlemde hareket edebilen bir başlıktan katmanlar halinde toz yatağı üzerine püskürtülmesine dayanan bir yöntemdir. Toz malzeme bir hazneden süpürücü ile serilir. Her bir katmanın bağlayıcı sıvı uygulanarak serilmesinden sonra platform aşağıya indirilerek yeni katman için hazırlık yapılır. Sıvı bağlayıcı kullanılarak yapıştırılması nedeniyle bu yöntem fonksiyonel parçaların imalatı için uygun değildir. İmalat sonrası işlemler işlem süresinde uzamalara sebep olabilir. Basılan cisim toz yatağında kendinden desteklidir (Loughborough University, n.d.).

Hazne polimerizasyonu teknolojisi temelinde öne sürülen yöntemlerden bazıları şunlardır: Bağlayıcı Jet Baskı (Binder Jet Printing, BJP), 3DP Yapıştırımlı Püskürtme (3DP Binder Jetting, 3DP) Yönlendirilmiş Döküm Kalıp Üretimi (Direct Shell Production Casting, DSPC) (Bergsma et al., 2016).

5.5. Toz yataklı ergitme (Powder bed fusion)

Toz malzemenin toz yatağının yanında bulunan hazneden bir çeşit süpürücü kullanılarak platforma serilmesi, katmanların lazer ya da elektron ışını kullanılarak ergitilmesi ya da sinterlenmesi prensibine dayanır. İlk katman üretildikten sonra platform bir katman yüksekliğinde aşağı indirilir ve hazneden yeni bir katman toz serilir. Ergitilmeyen ya da sinterlenmeyen toz, işlem sonunda cisimden temizlenerek geri dönüştürülür. Özellikle metal fonksiyonel parçaların üretilmesi için tercih edilebilecek yöntemler bu teknolojiye aittir (Loughborough University, n.d.).

Bu teknolojiye bağlı en yaygın yöntemler; Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS), Seçici Lazer Ergitme Selective Laser Melting, SLM) ve Doğrudan Metal Lazer Sinterlemedir (DMLS). SLS ve SLM yöntemleri, metal ve metal olmayan malzemelere uygulanabilirken DMLS yöntemi sadece metal malzemelere uygulanabilir. Bu katmanlı imalat yöntemleri, genellikle bir vakum ortamında ya da inert gazın altında yapılır. Cismin büyük kısmı, üstün mekanik ve kimyasal özelliklerle bu şekilde basılabilir.

Jig, boru parçaları, hava kanalları gibi yapıların üretilmesinde kullanılabilir (Dehghanghadikolaei, et al, 2018).

SLS, SLM ve DMLS dışında Çoklu Jet Ergitme (Multi Jet Fusion, MJF), Elektron Işını ile Ergitme (Electron Beam Melting, EBM), Seçici Isı Sinterleme (Selective Heat Sintering, SHS), Kıvılcım Plazma Sinterleme (Spark Plasma Sintering, SPS) ve Yönlendirilmiş Metal Baskı (Direct Metal Printing, DMP) gibi yöntemler toz yataklı ergitme teknolojisi metotlarına örnek verilebilir (Bergsmaet al., 2016).

5.6. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (Directed energy deposition)

Birden çok düzlemde hareket edebilen mekanik bir kola monte edilmiş nozul ile ergitilmiş malzemenin bir yüzeye serilmesi ve sertleşmesi prensibine dayanır. Tamir ve mevcut parçalara ek malzeme konulması gibi uygulamalarda da kullanılabilmesi, toz yatağına ihtiyaç duymaması, metal malzemedeki fonksiyonel yapı ve parçaların üretilebilmesi gibi özellikleri ile bu teknoloji öne çıkmaktadır. Seramik ve plastik malzemeler ile uygulanabilir olsa da daha ziyade metal uygulamaları tercih edilir. Malzeme; Lazer Mühendislik Net Şekillendirme (Laser-Engineered Net-Shaping, LENS) yönteminde olduğu gibi toz ya da Tel Ark Katmanlı İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) yönteminde olduğu gibi tel formunda kullanılır (Loughborough University, n.d.)

Tel Ark Katmanlı İmalat (WAAM), ark kaynağının kullanıldığı katmanlı imalat yöntemidir. Elektrik ark kaynağı, CNC benzeri bir robotik hareket sistemi ve tel besleme mekanizmasından ibarettir. En çok tercih edilen kaynak türleri, Metal İner Gaz (MIG), Tungsten İner Gaz (TIG) ve Plazma Ark Kaynağıdır (PAW). Bunların içinde kaynak telinin doğrudan beslendiği MIG en çok kullanılanıdır. Düşük baskı kalitesi (imalat sonrası yüzey işlemleri kesinlikle gerektirir), artık gerilme ve distorsiyonlar gibi mekanik özellikleri olumsuz etkileyen hususlar WAAM'ın en büyük dezavantajlarıdır. Yine de ısıl işlemler ve yüzey işlemleri ile beraber kullanımı umut vadetmektedir. Alüminyum, titanyum, nikel alaşımları ve paslanmaz çelik kullanılan malzemelerdir (Li et al., 2019)

Lazer Mühendislik Net Şekillendirme (LENS), SLM yönteminin farklı bir uygulamasıdır. Tıpkı SLM'de olduğu gibi metal malzemelerde uygulanmaktadır. Cismin her bir katmanı için, bir lazer ile eş eksenli bulunan bir nozul, yüzey üzerinde dolaşarak hava veya inert gaz yardımıyla toz metali yüzeye aktarır. Sonrasında eş eksenli lazer bu tozu ergitir ve püskürtme-ergitme süreci tüm cisim basılına kadar devam eder. SLM'ye benzer olarak mükemmel kimyasal ve mekanik özelliklerde ürünlerin oluşturulmasına imkân veren bu yöntem ile kesilmesi zor NiTi ve paslanmaz çelik ya da bakır ve alüminyum gibi yumuşak metaller işlenebilir. Alüminyum ve bakırın bu yöntem ile SLM'ye nazaran daha kolay işlendiği görülmüştür. Ancak; bu yöntemin SLM'ye kıyasla en büyük avantajı, yüzeye yayılan tozların ergitilmesi yerine belli bir noktaya tozların püskürtülmesi ve ergitilmesi dolayısıyla tamir, yenileme gibi işlemleri mümkün kılmasıdır (Dehghanghadikolaei et al., 2018).

Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme teknolojisi; WAAM ve LENS dışında Lazer Bazlı Metal Biriktirme (Laser Based Metal Deposition, LBMD), Telli Lazer Metal Biriktirme (Laser Metal Deposition-Wire, LMD-w), Elektron Işını ile Yönlendirilmiş İmalat (Electron Beam Direct Manufacturing, EBDM), Elektron Işın Serbest Form İmalatı (Electron Beam Free Form Fabrication, EBF3), Yönlendirilmiş Metal Biriktirme (Direct Metal Deposition, DMD), Yönlendirilmiş Işık ile İmalatı (Direct Light Fabrication, DLF), Lazer Serbest Form İmalatı (Laser Free Form Fabrication, LFF), Lazer Tümlleştirme (Laser Consolidation, LC), Kontrollü Metal Biriktirme (Controlled Metal Build Up, CMB), İyon Eritme Formasyonu (Ion Fusion Formation, IFF) gibi yöntemler ile de uygulanabilmektedir (Bergsma et al., 2016).

5.7. Katman laminasyonu (Sheet lamination)

Plastik, kâğıt, metal gibi malzemelerden imal edilmiş ince tabaka; yapıştırıcı, basınç, ısı ya da ultrasonik

kaynak vasıtasıyla lamine hale getirilir ve bilgisayar destekli bir hareket mekanizması ile çalıştırılan bıçak ya da lazer yardımıyla kesilir. Bu şekilde bir katman üretildikten sonra baskının gerçekleştirildiği platform yaklaşık bir katman kalınlığında aşağı indirilir ve yeni tabaka çekilerek ısı veya yapıştırıcı vasıtasıyla bütünleştirilir. Bıçak ya da lazer yardımıyla yeni katman kesilir. Aynı zamanda dışarıda kalan tabaka artıkları da kesilerek ardıl işlem ihtiyacı azaltılır. Tüm cisim bu şekilde oluşturulana kadar işlem devam eder (Livescience, n.d.).

Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing, LOM) ve Ultrasonik Katmanlı İmalat (Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM) katman laminasyonu teknolojisinde öne çıkan bazı yöntemlerdir (Bergsma et al., 2016).

6. Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı

Katmanlı imalatın sivil ve askeri gemi tasarımı, inşaatı, malzeme tedariki, gemi tahrik sistemleri ve gemi makinelerinin imalatına önemli etkileri olacağı öngörülmektedir. Sertifikasyon ve teknik personelin eğitimi konuları, katmanlı imalatın gemi inşaatı uygulamalarının yaygınlaşması ile aydınlatılması gereken hususlar olarak öne çıkmaktadır.

Tüm geminin üç boyutlu baskı teknolojileri ile üretilmesi yakın gelecekte mümkün görülmesi de umut verici gelişmeler de bulunmaktadır. Thermwood Corporation, Techmer PM ve Marine Concepts işbirliği ile hayata geçirilen projede bir çeşit yönlendirilmiş enerji biriktirme teknolojisi yöntemi olan Thermwood's Large Scale Additive Manufacturing (LSAM) adı verilen bir metot ile fiberglas kompozit tekne kabuğu üretimi (Şekil 6) yapılacak bir kalıp üretilmiştir (JEC Group, 2017).

Mukavemet testlerinde kullanılan detaylı ve karmaşık minyatür gemi modellerini geleneksel imal usulleri ile üretmek zahmetli ve masraflı görülmektedir. Katmanlı imalat ile detay parçalar yüksek başarı ile küçük ölçekli modellere yansıtılabilmektedir. Yapılan çalışmada (Calle, et al, 2020) mukavemet testlerinde kullanılmak üzere 316L paslanmaz çelikten borda konstrüksiyon parçası üretilmiştir. Bu parça, aynı amaçla üretilen borda konstrüksiyon parçasının 1:40 ölçeğinde küçültülmüş halidir. Yapılan çekme testinde geleneksel üretim ile yapılmış büyük model ile katmanlı olarak üretilen minyatür modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunu yaparken minyatür modelin yapısal tepkimelerinin, gerçek boyutlu eleman ile karşılaştırılabilmesi için ölçeklendirme ve kalınlık distorsiyonundan doğacak uyumsuzluklar da dikkate alınmıştır. Minyatür model ile gerçek boyutlu eleman arasında kırılma öncesi başta absorbe edilen enerji olmak üzere güzel uyum tespit edilmiştir. Minyatür model temasın başlangıcında kirşin nispeten kalın cidarı yüzünden başta bir pik değer görmüş ancak katlanma başladıktan sonra beklenen seviyeye inmiştir. Çalışmada kullanılan geleneksel yöntemle üretilen büyük model (sol üstte) ile katmalı imal edilen küçük model (sol altta) ve sonuçları (sağda) Şekil 7'de verilmektedir.

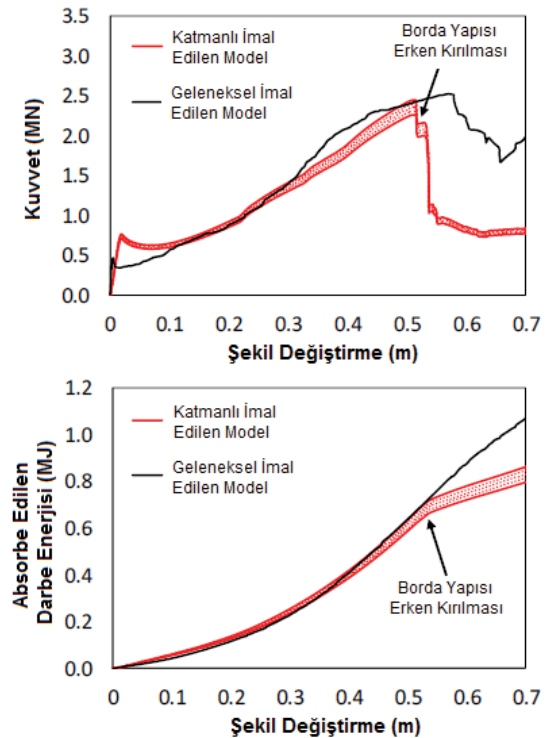
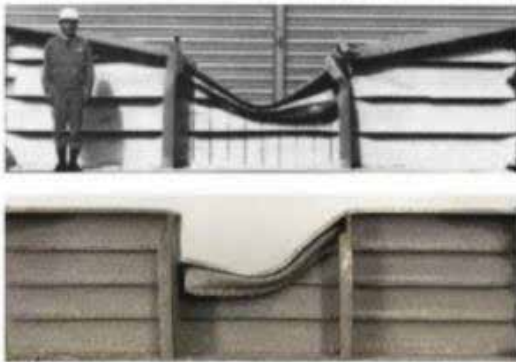
Katmanlı imalat teknolojilerinin gemi inşaatında uygulanması ile satın alma süreçlerinin, depolama, üretim ve montaj aşamalarının büyük ölçüde kısalması, daha basit ve ihtiyaç olduğu anca temin edilmesinin önü açılacağı öngörülmektedir. Sadece bir CAD programında depolanan katmanlara ayrılmış üretim modeli, baskı makinesinin olduğu herhangi bir yere gönderilebilecek ve anında imal edilebilecektir. Bu durum, gemide gereksiz miktarda yedek parça bulundurma ihtiyacını ortadan kaldıracaktır. Tüm bunların yanı sıra bu esnek üretim anlayışının malzeme stokunu tutma oranını



Şekil 6. 3B basılan kompozit tekne kalıbı (JEC Group, 2017)

azaltması, teslim maliyeti, atıl geçen zamanı ve kâr kaybını engellemesi öngörülmektedir (Bergsma et al., 2016).

Termoplastik malzemelerden hobi, ticari ve eğitim amaçlı gemi modelleri oluşturulması oldukça yaygınlaşmıştır. Bazı yardımcı sistemlerin kısmi olarak yüksek özelliklere sahip plastik malzemelerden üretilebilirliği araştırılmaktadır. Sözelimi havalandırma sistemlerinin yüksek ısı ve aşındırıcı kimyasal ortama maruz kalmayan ızgaralar gibi bazı kısımları plastik malzemelerden imal edilmesi konusunda uygulamalar da mevcuttur. Böylece metalden üretimi zaman alan ve pahalı olan bazı yapıların imalatında önemli bir verimlilik kaydedilebileceği düşünülmektedir (Ksenia, 2020)



Şekil 7. Çekme Deneysel Modelleri ve Sonuçları (Calle, et al, 2020)

Yapılan çalışmada (Wu, et al, 2014) ASTM A131 EH36 çeliği, SLM yöntemi ile başarılı bir şekilde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmeden üretilmiştir. Geleneksel yöntemler ile $7,83 \text{ g/cm}^3$ olan yoğunluk değerine %97 oranında yaklaşılmış ve $7,64 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaşılmıştır. Bu deney ile yoğunluğun artırılması, işlem sonrası ısı işlemlerin uygulanması ve sertlik, çekme testleri gibi yöntemler ile doğrulanması halinde SLM ile üretilen EH36 yüksek mukavemetli gemi inşa çeliğinin –teorik olarak– gemi yapılarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bir başka çalışmada EH36'nın ark katmanlı imalat (WAAM) ile üretimi, geleneksel haddeleme yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada su verilmiş durumda WAAM ile gemi inşa çelik saclarının üretiminin makul olduğu ortaya konulmuştur (Nemani et al., 2020).

Bir diğer önemli çalışmada (Jung, et al, 2019) Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED) teknolojisi ile 316L paslanmaz çelik ve alaşım 625'den katmanlı üretilen numuneler, korozyon testlerine tabi tutulmuşlardır. Katmanlı üretilen numunelerin mikroyapıları nedeniyle korozyon dayanımlarının döküm türdeşlerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. CPT (Kritik Çukur Korozyonu Sıcaklığı) ve CCT (Kritik Çatlak Korozyonu Sıcaklığı) deniz suyu korozyon direnci için önemli referans değerleridir. $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de uygulanacak ısı işlem ile 316L ve alaşım 625 kullanılarak üç boyutlu baskı ile üretilen numunelerin CPT ve CCT değerlerinde ciddi toparlanma görüldüğü bildirilmiştir. Fathi (2019) Yönlendirilmiş Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi ile AlSi10Mg_200C tozundan ürettiği numuneleri oldukça yakın kimyasal bileşime sahip A360.1 alaşımdan dökülen numune ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre katmanlı imal edilen parça mikroyapısı sebebiyle dökümden imal edilen numuneye göre daha iyi korozyon dayanım özellikleri sergilenmiştir. Ayrıca taşlamanın katmanlı imal edilen AlSi10Mg_200C malzemenin korozyon direnci üzerine olumlu etkisi olduğu buna karşın yüzey işlemi hiç görmemiş ya da raspa işlemine tabi tutulan numunenin daha zayıf korozyon dayanım özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. Aynı yüzey işleminin uygulandığı katmanlı imal edilen numune ile döküm parça karşılaştırıldığında DMSL ile üretilen parçanın daha iyi korozyon direnci gösterdiği tespit edilmiştir.

Gemi pervanelerinin katmanlı imalatı konusunda ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan en önemlisi "WAAMPeller" olarak görülmektedir (Şekil 8). Bu pervane, Hollanda'da Tel Ark Katmanlı İmalat (WAAM) yöntemi ile Damen Tersaneleri Grubu, RAMLAB, Promarin, Autodesk ve Bureau Veritas'ı da içeren bir şirketler işbirliği ile üretilmiştir. Katmanlı olarak imal edilip klas onaylı olarak bir gemiye monte edilen ilk pervane özelliği ile öne çıkmaktadır (Ya, Hamilton, 2018). Pervane konusunda yapılan bir diğer önemli gelişme Korskim tarafından yürütülen araştırma (2020) ile aktarılmaktadır. Bu çalışmada Lazer Metal Biriktirme yöntemi (LMD) ile çelik malzemeden katmanlı olarak imal edilen bir gemi pervanesini ele alınmaktadır. Pervane, yapılan analiz ve deneyler sonucunda mukavemet ve maliyet özellikleri bakımından döküme göre daha başarılı sonuç vermiştir. Ağırlık azaltılmış ancak dayanıklılıktan feragat edilmemiştir. Burada, LMD'nin yöntem olarak tozların lazer ile kaynatılması esasında zaten bir ısı işleminden geçmesi ve ek işleme gerek duymaması yatmaktadır. Bu çalışma, LMD teknolojisinin hareketsiz parçalar ile beraber dönen parçalara da uygulanabilirliğinin kanıtlanması açısından oldukça önemlidir. Başka bir çalışmada kavitasyon tüneline kullanılmak üzere bir gemi pervanesi modeli, katmanlı olarak imal edilmiştir (Cilia et al., 2019).

Katmanlı imalatın özellikle ABD Donanmasının dikkatini yoğun şekilde çektiği değerlendirilmektedir. Birleşik Devletler Donanması, bir askeri geminin ölçekli karmaşık modelini üç boyutlu baskı ile imal etmiştir. Metal katmanlı imalat yöntemlerinin aynı ülkenin savunma sanayiinde alüminyum şase, dizel makine, gemi soğutma sistemlerinin hava giriş, egzoz ve turboşarjer muhafazasının imalatı gibi alanlarda da kullanıldığı belirtilmektedir (Li et al., 2019). Wang ve Whitworth tarafından yapılan çalışmada (2016) Amerika Birleşik Devletleri Donanmasının, yirmi yıldan uzun süredir katmanlı imalat teknolojileri alanındaki gelişmeleri ve yapılan çalışmaları gemide kullanılan donanım ve parçaların imalatı, uçak tamirleri ve hatta yaralı askerler için kafatası gibi parçaların üretimi gibi amaçlar ile fonladığı belirtilmektedir. Tüm bu gelişmelere rağmen donanma, diğer tüm katmanlı imalat yapan tesisler gibi

sertifikasyon konusunda sorunlar yaşanmaktadır. USS Harry S. Truman uçak gemisi buhar devresi su tahliye sistemine konulan bir parçanın (Şekil 9) katmanlı imalatı yapılmış ve bu parçanın gemiye konulması NAVSEA tarafından onaylanmıştır. Bu durum, sertifikasyon sorununun aşılması yolunda bir dönüm noktası teşkil etmektedir (The Sentinel, 2019). Housel çalışmasında (2015) ABD Donanmasının 20 yıl içinde donanmasının muharip gücünü arttırma hedefine paralel olarak karşılaşılabilecek maliyet yükünün DDG (destroyer), LHA ve LPD (amfibi hücum gemisi) inşaatında katmanlı imalat yöntemlerinin kullanılmasının yıllık \$800,000 civarında maliyet düşüşünün sağlanacağı tahmini verilmiştir.



Şekil 8. WAAMPeller (Damen, n.d.)

Katmanlı imalatın gemi inşaatında yaygınlaşması önündeki en büyük engellerden biri sertifikasyon olduğu ifade edilmektedir. Katmanlı üretilen parçaların malzeme davranış özelliklerinin tam olarak bilinmemesi, sınırlı geçmiş imalat verileri ve konu ile ilgili hem teorik hem pratik bilgi ve tecrübe eksikliği sertifikasyon için kural ve standartların oluşturulması imkânlarını sınırlamaktadır (DNV-GL, 2017). Bununla beraber klas kuruluşları hâlihazırda katmanlı imalat süreçleri ile ilgili kılavuzlar yayınlamaktadırlar. Bu dokümanlarda temel olarak ilgili katmanlı imalat yöntemlerinin kısa tanımları, süreçler, onaya tabi dokümanlar, tel gibi malzemelerin tip onay gereklilikleri, katmanlı imalat yapan tesislerin uygunluk gereksinimleri, test gereklilikleri gibi bölümler mevcuttur (ABS, 2018), (BV, 2019), (DNV-GL, 2017), (LR, 2016).

Garcia, Edenfield ve Yoshida master tezlerinde (2019) katmanlı imalatın için bir eğitim modeli geliştirmişlerdir. Bu modele göre ilgili teknik personelin; katmanlı imalat teknolojileri ve yöntemleri ile ilgili bilgisinin olması, ürün isterlerine değerlendirebilecek ve üretim için geleneksel ya da katmanlı imalat arasında seçim yapabilmesinin en önemli yetiler olarak değerlendirilmiştir. İmalatı yapacak kişinin aynı zamanda yetkin bir tasarım bilgisine, CAD programı kullanım becerisine ve gerekiyorsa üç boyutlu tarama bilgisine ihtiyaç duyacağı da belirtilmiştir. Malzeme seçimi de önemli bir konu olarak görülmektedir. İmalatı yapacak kişinin ürünün kullanım yeri özelliklerine göre (nem, sıcaklık, meyil, titreşim gibi) uygun ham maddeyi seçebiliyor olması beklenmektedir. Baskı makinesi ile ilgili temel bilgilerin bilinmesi, basit arızaların giderilebilmesi ve hangi koşullarda nasıl sorunların oluşabileceği öngörüsü de oldukça önemli görülmektedir. Son olarak, katmanlı imalat sonrası sıklıkla uygulanan ısı



Şekil 9. Gemide kullanımı NAVSEA tarafından onaylanan katmanlı üretilen ilk parça
(The Sentinel, 2019)

işlem ya da talaşlı imalat gibi geleneksel yöntemler hakkında bilgi sahibi olunmasının altı çizilmiştir. Buradan üç boyutlu baskı yapacak kişinin hem geleneksel hem katmanlı imalat konusunda bilgi sahibi olması gerektiği tekrar vurgulanmış olmaktadır.

7. Sonuç ve Değerlendirme

Katmanlı imalat, yıllardan beri dikkatleri üzerine çekmektedir. Geleneksel imal usullerine göre belirgin üstünlükleri ve kullanım alanları bulunan bu imalat yönteminde özellikle metal ürünlerin üç boyutlu basılmasının mümkün kılınmasıyla yeni bir teknolojik seviyeye gelinmiştir.

Bir cismin üç boyutlu modelinin tasarım aşamasından doğrudan üretim aşamasına geçmesi, konvansiyonel üretim yöntemlerindeki lojistik ve depo ihtiyacını neredeyse sıfıra indirmektedir. Bir üç boyutlu yazıcı ve uygun bir bilgisayar bulunan her yer bir üretim atölyesi haline alabileceği değerlendirilmektedir. Oldukça karmaşık ürünlerin kolaylıkla imal edilebilmesi, tasarımın kolayca modifiye edilmesi ve üretim için herhangi bir kalıp ya da üretim makinesi adaptasyonu ihtiyacı olmaması, atık malzeme oluşmaması, zamandan tasarruf gibi hususlar katmanlı imalat usullerinin önemli avantajlarıdır. Bunun yanında katmanlı imalat teknolojilerinin geleneksel imal usullerine kıyasla bir takım dezavantajları da bulunmaktadır; ancak üretim sonrası uygun ısıl işlem, gelişen teknoloji, talebin artması ve katmanlı imalat yöntemlerinin makul üretim stratejileri ile kullanılması ile bu dezavantajlar kolaylıkla aşılabilecektir.

Türkiye’de katmanlı imalat konusunda akademik olarak belirli seviyede çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar ağırlıklı genel değerlendirme olup tıp alanında hatırı sayılır çalışmalar bulunmaktadır. Katmanlı olarak imal edilen ürünlerin mekanik özellikleri konusunda çalışmalar mevcuttur. Üç boyutlu imalat yapan firmalar kurulmuş olsa da bu firmalar daha çok baskı faaliyetleri yürütmekte olup katmanlı imalat yapabilen makinelerin Türkiye sorumluları olarak kendilerini konumlandırmışlardır. Yerli baskı makinesi ve filament üretimi konusunda umut vadeden gelişmeler mevcuttur.

Gemi tasarımı, klaslama ve sertifikasyon, malzeme ve yedek parça tedariki, inşaa süreçleri, malzeme ve askeri uygulamalar üzerinde katmanlı imalatın kayda değer etkileri olacağı bilimsel yazından

anlaşmaktadır. Özellikle mukavemet analizleri ve pervane model deneylerinde kullanılan modellerin lazer metal biriktirme yöntemleri ile oluşturulmasında yol kat edilmiş görülmektedir. Katmanlı üretim sonucu elde edilen ürünlerin mekanik özellikleri henüz beklendiği seviyede değildir; ancak üretim sonrası ısıtma işlemlerinin bu konuda fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu açıdan bakıldığında üç boyutlu baskı ile imal edilen parçaların, mevcut teknolojide dövme ile imal edilen yapısal parçaların yerini alamayacağı söylenebilir. Döküm ile imal edilen pervane kanadı gibi parçaların katmanlı olarak üretildiği örneklerin mekanik özellikleri başarılıdır. Dolayısıyla katmanlı imalatın ilk etapta gemi inşaatında dökümün yerini alabileceği iddia edilebilmektedir. WAAMPeller çalışması gibi projeler, sektörün katmanlı imalat konusundaki farkındalığını arttırabilme potansiyeline sahiptir.

8. Kaynaklar

ABS (2018). 299-Guidance Notes on Additive Manufacturing.

<https://ww2.eagle.org/en/rules-and-resources/rules-and-guides.html#/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/299-gn-on-additive-manufacturing-2018> [Online] (Erişim: Haziran 2020)

All About Engineering, Ballistic Particle Manufacturing (BPM).

<https://www.topengineeringcommunity.com/ballistic-particle-manufacturing-bpm/>[Online] (Erişim: Haziran 2020)

Bergsma, J., Zalm, M., Pruyn, J. (2016). 3D-Printing and the Maritime Construction Sector. Conference Paper: HIPER 2016, At Cortona, Italy, Volume: 10

Bryson, J. R., Clark, J., Mulhall, R. (2013). The Competitiveness and Evolving Geography of British Manufacturing: Where Is Manufacturing Tied Locally and How Might This Change. Future of Manufacturing Project: Evidence Paper 3. Foresight, Government Office for Science

BV, (2019). NI662 Additive Manufacturing - Guidelines for Certification of Product Made Using Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process.

<https://marine-offshore.bureauveritas.com/ni662-additive-manufacturing-guidelines-certification-product-made-using-wire-arc-additive> [Online] (Erişim: Haziran 2020)

Calle, M. A. G., Kujala, P., Salmi, M., Mazzariol, L. M. (2020). ASIS Web Girder Test: A Miniature Experiment. Developments in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures

Cilia, T., Bertetta, D., Gualeni, P., Tani, G. (2019). Additive Manufacturing Application to a Ship Propeller Model for Experimental Activity in the Cavitation Tunnel. Journal of Ship Production and Design DOI: 10.5957/JSPD.11170055

Damen, World's First Class Approved 3D Printed Ship's Propeller Unveiled.

https://www.damen.com/en/news/2017/11/worlds_first_class_approved_3d_printed_ships_propeller_unveiled [Online] (Erişim: Haziran 2020)

Dehghanghadikolaei, A., Namdari, N., Mohammadian, B., Fotovvati, B. (2018). Additive Manufacturing Methods A Brief Overview. Journal of Scientific and Engineering Research, 2018, 5(8):123-131 ISSN: 2394-2630

DNV-GL, (2017). DNVGL-CG-0197-Additive Manufacturing - Qualification and Certification Process for Materials and Components.

<https://www.dnvgl.com/services/additive-manufacturing-3d-printing-110872> [Online] (Erişim: Haziran 2020)

Fathi, P. (2019). On Microstructure and Corrosion Behavior of AlSi10Mg Alloy Fabricated by Direct Metal Laser Sintering. Memorial University of Newfoundland Master of Engineering in Mechanical Engineering

Garcia, G., Edenfield, B. L., Yoshida, K. (2019). Establishing an Additive Manufacturing (AM) Navy Enlisted Classification for the Machinery Repairman to Enable Efficient Use of AM and Mass Adoption of the Technology. MBA Professional Project Naval Postgraduate School

Housel, T. J., Mun, J., Ford, D. N., Hom, S. (2015). Benchmarking Naval Shipbuilding with 3D Laser Scanning, Additive Manufacturing, and Collaborative Product Lifecycle Management. Acquisition Research Program Graduate School of Business & Public Policy Naval Postgraduate School

ISO, (2018). ISO/ASTM DIS 52900 Additive Manufacturing - General Principles – Terminology Fabrication Additive, International Standardization Organization (ISO) ICS: 01.040.25; 25.030

JEC Group, (2017). Additive Manufacturing Becoming a Disruptive Force in Marine Tooling.

<http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/additive-manufacturing-becoming-disruptive-force-marine> [Online] (Erişim: Temmuz 2020)

Jung, G. S., Park, Y. H., Kim, D. J., Lim, C. S. (2019). Study on Corrosion Properties of Additive Manufactured 316L Stainless Steel and Alloy 625 in Seawater. Corrosion Science and Technology, Vol.18, No.6 (2019), pp.258-266 pISSN: 1598-6462 / eISSN: 2288-65245 [Research Paper] DOI: <https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.6.258>.

Korsmik, R., Rodionov, A. A., Korshunov, V., Ponomarev. D. A. (2020). Topological Optimization and Manufacturing of Vessel Propeller via LMD-Method. Materials Today Proceedings DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.044

Ksenia, K., (2020). Overview of High-Temperature FDM Plastics for Industrial 3D Printing, Internauka, e-Library ID: 42442037

Kyzioł, L., Kończewicz, W., Dynowski, A. (2019). The Analysis of the Possibilities of Using 3D Printer for Making Components and Parts of Marine Equipment for Example Flexible Clutch Coupling, Journal of Konbin 2019 Volume 49, Issue 3 DOI 10.2478/jok-2019-0057

Li, J., Duan, C., Zhao, M., Luo, X. (2019). A Review of Metal Additive Manufacturing Application and Numerical Simulation. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 252 (2019) 022036 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/252/2/022036

Li, J. L. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A. B. R., Hasan, R., Sudin, M. N., Ramli, F. R. (2019). Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing. International Journal of Automation Technology 13(3):346-353 DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346

Livescience, What is Laminated Object Manufacturing?

<https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html> [Online] (Erişim: Temmuz 2020)

Loughborough University, Additive Manufacturing Research Group The 7 Categories of Additive Manufacturing.

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> [Online] (Erişim: Temmuz 2020)

LR (2016). Guidance Notes for Additive Manufacturing Certification

<https://www.lr.org/en/additive-manufacturing/resources/guidance-notes-for-additive-manufacturing/> [Online] (Erişim: Temmuz 2020)

Nemani, A. V., Ghaffari, M., Nasiri, A. (2020). Comparison of Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Shipbuilding Steel Plates Fabricated by Conventional Rolling Versus Wire Arc Additive Manufacturing. Additive Manufacturing Volume 32, March 2020, 101086

STM Savunma Teknolojileri ve Mühendislik Ticaret A.Ş. (2016). Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları Sektör Değerlendirme Raporu.

https://www.stm.com.tr/documents/file/Pdf/1.katmanli_imalat_teknolojileri_raporu__2016-08-03-14-11-28.pdf [Online] (Erişim: Temmuz 2020)

The Sentinel, NAVSEA Approves First Metal Additively Manufactured Component for Shipboard Use.

https://hanfordsentinel.com/news/lemoore/navsea-approves-first-metal-additively-manufactured-component-for-shipboard-use/article_98ac16b6-0655-5e09-a32c-673997775ee9.html [Online] (Erişim: Temmuz 2020)

Wang, X. Y., Whitworth, J. R. (2016). Using Additive Manufacturing to Mitigate the Risks of Limited Key Ship Components of The Zumwalt-Class Destroyer, Naval Postgraduate School MBA Professional Report. Accession Number : AD1031546

Wu, W., Tor, S. B., Chua, C. K., Liu, Z., Lui, O. K. B., Merchant, A. A. (2014). Preliminary Investigation on SLM of ASTM A131 EH36 High Tensile Strength Steel for Shipbuilding Applications, Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2014), 158-163

Ya, W., Hamilton, K. (2018). On-Demand Spare Parts for the Marine Industry with Direct Energy Deposition: Propeller Use Case, Conference: International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications DOI: 10.1007/978-3-319-66866-6_7