

Savunma Sanayiinde Katmanlı İmalat ile Tedarik Zinciri Yönetimi

Katmanlı imalat teknolojisi (additive manufacturing [AM]) sunduğu tasarım esnekliği, optimize edilmiş yapılar ve malzemeler ile ağırlık azaltımı, daha az parça ve birleştirme adımı, daha az atık, az sayıda üretim için daha kısa üretim süresi gibi teknik avantajlarla son yıllarda popüler hale gelmiştir. Geleneksel tedarik zincirinde devrim yapma potansiyeli ile öne çıkan katmanlı imalat süreçleri, merkezîyetçi olmayan üretim ve tedarik yapısı ile savunma sanayiinde de büyük bir potansiyele sahiptir. Bu makalede, eklemeli imalat süreçleri tedarik zinciri bakış açısından gözden geçirilecektir. Gelecekteki savaş ortamlarında değer zinciri senaryolarının katmanlı imalat teknolojileri ile ulaşabileceği potansiyel değerlendirilecektir. Makalede katmanlı imalat teknolojilerinin savunma ve uzay sanayiide kullanıldığı güncel örneklere yer verilirken, bu yöntemlerin daha da çok kullanım bulabilmesi için iyileştirilmesi gereken yönlerine de değinilmiştir.

Anahtar kelimeler: Katmanlı İmalat, Tedarik Zinciri Yönetimi, Katmanlı İmalatla Değer Zinciri, Savunma Sanayii

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 24 Mart 2023

Kabul: 15 Ağustos 2023

*Sorumlu Yazar: Kıvılcım Ersoy
Email: kivilcime@aselsan.com.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1270281>

Atıf şekli/How to cite: Ersoy K., Savunma Sanayiinde Katmanlı İmalat ile Tedarik Zinciri Yönetimi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2023; 21(2): 63-73

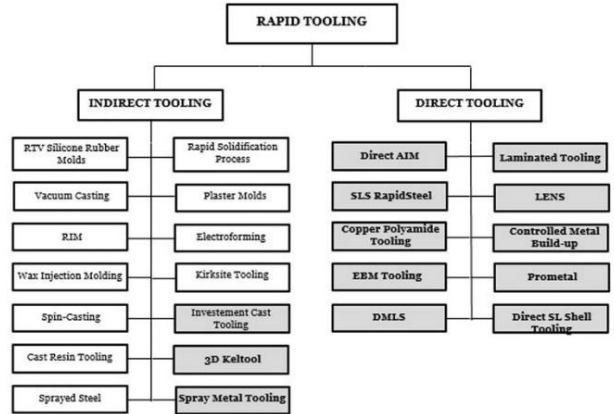
1. GİRİŞ

Dünya literatüründe adı 3D Printing ya da Additive Manufacturing (AM) olarak duyulan katmanlı imalat teknolojileri 30 yıldan uzun süredir araştırılmakta ve son yıllarda araştırma, patent ve ürüne çevrilme hızı gitgide artmaktadır. Talaş kaldırılan konvansiyonel üretim metotlarının aksine malzeme eksiltilecek değil, malzeme katman katman eklenerek 3 boyutlu parçalar direk olarak 3 boyutlu CAD modelleri kullanılarak üretilmektedir. Bu sebeple konvansiyonel üretim teknolojilerinin aksine komplekse geometriler için bile kalıp veya başka kompleks üretim yardımcısına ihtiyaç duyulmadan üretim gerçekleştirilebilmektedir [1, [2]. Bu da küçük sayılı ve merkezsiz üretimler için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Katmanlı imalat teknolojileri 1970li yıllarda ilk defa ‘hızlı prototipleme (rapid prototyping [RP])’ adıyla kullanılmaya başlandı. O yıllarda tasarlanan parçalar örnek veya prototip olarak polimer malzemelerden üretildi.

Daha sonra bu teknolojiler ile az sayıda imal edilecek parçaların kalıplarının üretilmesi

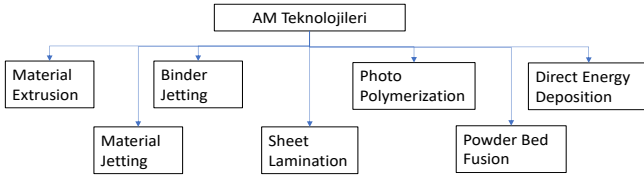
değerlendirildi. Bu literatürde ‘rapid tooling (RT)’ adı ile bilinir [3,4]. Şekil 1’de metal şekillendirme, döküm gibi konvansiyonel metotların üretim yardımcılarının imalatında kullanılan katmanlı RT metotları gösterilmektedir.



Şekil 1: Rapid Tooling Metotları

Geçen yıllarda katmanlı imalat teknolojilerinin kullanım alanı prototiplemeden kalıp imalatlarına, parça tamirinden parça yapımına, yük taşımayan parçalardan tamamen fonksiyonel parçalara doğru gelişmiştir [5]. Günümüzde katmanlı imalatla üretilen parçaların %60'ından fazlası, havacılık, biyomedikal, enerji, otomotiv, inşaat, mobilya ve kuyumculuk gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde tamamen işlevsel ürünlerden oluşmaktadır.

Katmanlı imalat teknolojileri birçok farklı metodu ve malzemeyi içermektedir. Metal, polimer ve seramik malzemelerin kullanılabilirdiği bu alanda üretim teknolojisinin sınıflandırılması malzeme deposizyon yöntemine göre yapılabilir. Günümüzde ekonomik olarak değer yaratan yaklaşık 30 çeşit katmanlı imalat prosesi bilinmektedir. The International Committee F42 on AM bu prosesleri 7 ana kategoride incelemektedir. (Bakınız Şekil 2).



Şekil 2: ASTM F42'ye göre AM teknolojileri

Üretilen malzeme, ömür ve dayanım istekleri, yüzey kalitesi, tezgâh ve parça üretim maliyetleri, üretim ve serim hızı gibi birçok parametreye göre bu teknolojilerden uygun olan seçilmektedir [6]. Birçok AM metodunda üretilen parça büyüklükleri tezgâh büyüklüğü ile sınırlıyken, WAAM gibi katmanlı imalat teknolojileriyle metal ve büyük parçaları üretmek mümkün hale gelmiştir [7, 37].

Havacılık sektöründe ağırlık azaltımı için topoloji optimizasyonu ile tasarım hafifletilip malzeme azaltılmakta, birleştirme sayısının düşürülmesi ile yekpare ya da çok daha az sayıda parça kullanılmakta, bu sayede hem üretim hem lojistik anlamda verimlilik sağlanarak sürdürülebilirlik için önemli çıktılar elde edilmektedir [8]. Katmanlı imalat teknolojileri; kompleks parçaların yekpare olarak üretilmesi, bu sayede ağırlık ve işçilik süresinin azaltılması ve aynı parça içinde farklı mikro yapılar uygulanabilmesi gibi teknik birçok avantaj sunmaktadır.

Ayrıca hızlı tasarım değiştirme ve özelleştirme imkanları sayesinde iyileştirmelerin ürüne çok daha kısa sürede dönüşmesini sağlayarak günümüz ihtiyaçlarına uygun bir üretim altyapısı oluşturmaktadır.

Son yıllarda tedarik zinciri tüm endüstrilerde önemli bir konu haline gelmiştir. Tedarik zinciri, ham malzemelerin üreticilere akışından, müşterilerden perakendecilere gelen geri bildirimlere kadar çok yönlü farklı rol ve sorumluluklara sahip çeşitli kuruluşlardan oluşmaktadır. Pandemi sonrası daha da rekabetçi hale gelen ekonomide uzun ve karmaşık tedarik zincirlerine sahip tüm endüstriler, tedarik zincirlerini daha kısa ve daha basit hale getirmeye mecbur kalmışlardır. Bu ihtiyacın karşılanmasında katmanlı imalat teknolojileri yeni ve heyecan verici imkanlar sunmaktadır [9, 10].

Katmanlı imalat teknolojileri tek bir tezgâh ile birçok parçanın her zaman ve her yerde üretilmesine imkân tanımaktadır. Bu da tedarik zincirini hızlandırmakta ve ürünlerin farklı coğrafyalarda hızlı şekilde pazara sunulabilmesi için fırsat yaratmaktadır. Diğer konvansiyonel üretim metodlarının aksine, 3 boyutlu parça modelleri ve yeteri kadar ham malzeme bulunduğu sürece 3 boyutlu yazıcı tezgâhi ile teorik olarak istenilen yerde istenilen parça kısa sürede basılabilir. Kalıp tasarım ve üretim masrafları olmadığı için de az sayıda üretim yapma maliyeti yüksek değildir AM'in 4. Endüstri devrimiyle hedeflenen nesnelerin interneti ve dijitalleşmiş üretim için de en uygun üretim metodu olduğu bilinmektedir. Bu avantajlar özellikle hazır bulunmuşluğun önemli olduğu endüstrilerde katmanlı imalat teknolojilerini ön plana çıkartmaktadır.

Tüm bu parametrelere ek olarak AM teknolojileri sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmelidir. Kısa teslim süreleri ve düşük stok gerekliliği ile gelen optimizasyon ve tasarrufun yanı sıra atıkların azaltılması ile de daha sürdürülebilir bir ekonomi için katkı sağlamaktadır. Az sayıda stok tutarak karbon ayak izi düşürülebilmektedir [11].

AM teknolojileri ile bazı üretim metot ve tezgâhları geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılmasına olanak sağlamakta, bu şekilde atık malzemeler tekrar kullanılarak doğaya ve çevreye önemli katkılar sağlanmaktadır [11].

Bu makale, geleneksel üretime kıyasla tedarik zinciri yönetimi açısından katmanlı imalat üretim süreçlerinin avantaj ve dezavantajlarına odaklanmaktadır. Savunma sanayinde katmanlı imalat örneklerine yer verilirken tedarik zinciri avantajını savunma sanayinde kullanabilmek için bu teknolojileri güvenilir ve işlevsel bir yol olarak uygulamak için bir dizi öneri getirilmiştir.

2. TEDARİK ZİNCİRİNDE KATMANLI İMALATIN POTANSİYELİ

Şirketlerin en büyük masraf ya da kazanç kalemlerinden birisi tedarik zinciridir. Son yıllarda yerel ve küresel olarak hızla büyüyen şirketlerin üretim yapan şirketlerden ziyade tedarik zincirini iyi yöneten platformlar olduğu bilinmektedir. Alibaba, Airbnb, Trendyol, Getir gibi şirketler buna örnek olarak gösterilebilir. Özellikle uzun tedarik zincirlerine sahip şirketler için tedarik zinciri yönetimindeki tasarruflar ile (nakliye, envanter tutma ve envanter yönetme) çok belirgin kazançlar sağlamaktadır.

Katmanlı üretim için tedarik zinciri, AM teknolojisi kullanılarak üretilen ürünlerin son tüketicilerinin taleplerini karşılayan, birbirine bağlı bir dizi bağımsız mal ve hizmet tedarik ağları olarak tanımlanır. Bu ağ makine satıcılarını, malzeme üreticilerini, yazılım sağlayıcılarını, lojistik operatörlerini, servis bürolarını ve araştırma merkezlerini içerir [10]. Katmanlı imalat yönteminin geleneksel tedarik zinciri yönetimine kıyasla sağlayabileceği birçok fırsat vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Minimum parça ve birleştirme sayısı ile sağlanan endüstriyel verimlilik
- Özelleştirme, kişiselleştirme ve isteğe bağlı üretim
- Minimum takım/kalıp ve hammadde kullanımı ile sağlanan endüstriyel verimlilik
- Üretim için gereken minimum adım sayısı ve (takım üretimine ihtiyaç duymadan) direk 3D Modelden yapılabilen üretim ile sağlanan endüstriyel verimlilik
- Merkezlessiz üretim
- Küçük hacimli / az sayıda üretim
- Tasarımdan üretime giden süreyi kısaltarak elde edilen endüstriyel verimlilik
- Atık azaltımı ve geri dönüşüm ile kazanılan çevresel etki ve sürdürülebilirlik

Katmanlı imalat süreçleri doğası gereği malzeme girdilerini azaltarak endüstriyel verimliliği artırır ve bu şekilde doğası gereği yalın üretime daha yakındır.

Aurora Flight Sciences and Stratasys tarafından üretilen “şimdiye kadar üretilmiş en büyük, en hızlı ve en karmaşık 3D baskılı insansız hava aracı (İHA)”, havacılık endüstrisinden özelleştirilmiş bir ürünün uygun maliyetli geliştirilmesine iyi bir örnektir [12]. Göreve özel olarak tasarlanan uçakta tasarım ve üretim süresi 50% oranında düşürülerek çok belirgin bir fayda sağlanmıştır.

Kişiselleştirme ve özelleştirme katmanlı imalat teknolojilerinin tedarik zincir açısından başka bir avantajıdır. Katmanlı imalat metodları ile müşteri kişiselleştirme ihtiyacından doğan zorluklar konvansiyonel metotlara göre daha basit bir şekilde, yani daha kısa zamanda ve daha düşük maliyet ile çözülebilir.

AM teknolojilerini kullanmanın bir diğer önemli avantajı da kalıp, takım, fişür gibi üretim yardımcılara ihtiyaç olmadığı için küçük hacimli ve/veya tek parça imalatlara uygun olmasıdır. Bu avantaj, müşteri talep ve ihtiyaçlarına göre özelleştirmeye imkân sağlamaktadır. Volvo'nun yapmış olduğu analiz sonucunda otomotiv parçalarının geleneksel üretim ile AM maliyetlerinin karşılaştırılmasındaki başa baş noktasının parça karmaşıklığına bağlı olduğu ve bunların farklı parçalar için farklılık gösterebileceğini göstermiştir [13].

Daha kısa tedarik süreleri, daha düşük maliyetler, geliştirilmiş işlevsellik ve artan özelleştirme yeteneği gibi sağlanan avantajlar nedeniyle AM, takım, kalıp ve insert imalatında da kullanılabilir [4, 14]. Takımların genellikle yüksek geometrik karmaşıklığa sahip ve düşük hacimlerde üretilmesi nedeniyle AM, dökümden işleme süreçlerine, montaj aparatlarından özel tıbbi kılavuzlara kadar çok çeşitli uygulamalar için uygun bir yöntem olacaktır. Katmanlı imalatın imalat yardımcı takımlarında kullanımı otomotivden havacılığa, savunma sanayinden biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu uygulamalarda plastikler, kompozitler, metaller, kauçuk, mum ve kum gibi birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Çek takım üreticisi Innomia firmasının tasarlayıp ürettiği konformal soğutma kanalları olan takım inserti, DMLS metodu ile üretilmiş, bu sayede güvenilirlik ve bakım aralıkları artırılarak, kalite ve maliyet iyileştirilmeleri sağlanmıştır [15].

Ayrıca, AM teknolojisinin hızlı tepki süresi nedeniyle, ürünü pazara sunma süresi (time to market) de önemli ölçüde azalmaktadır. Bu özellik sayesinde üreticiler müşteri taleplerini tam olarak karşılamak için hızlı bir şekilde prototip oluşturabilir ve bu şekilde müşterilerine mükemmel bir hizmet verebilir. Oysa ki, geleneksel yöntemlerde, ürünlerin çoğu seri üretim metodu ile üretilir ve bu da tasarım sürecine müşteri katılımını neredeyse tamamen ortadan kaldırır. Son zamanlarda kullanılan çevik metotlar ya da tasarımcı düşünce metotları için ise tasarım süreçlerine son kullanıcının geri bildirimini olmazsa olmazdır. Yani katmanlı imalat teknolojileri geleneksel üretim metotlarının aksine yeni nesil tasarım ve geliştirme metotlarını desteklemektedir. Geçtiğimiz son 10 yılın ve geleceğimizin trendleri

tüm sektörlerde kişiselleştirilmiş daha küçük sayılı ve kompleks parçaların üretimini gerektirmektedir. Geleneksel üretim metodlarının bunları karşılayabilmesi çok zor olacaktır. Tüm bu sebeplerden dolayı da dördüncü endüstri devriminin üretim metodu olarak katmanlı imalat öne çıkmaktadır.

Katmanlı imalat prosesleri yalnızca imalat sürelerini değil tasarım ve geliştirme sürelerini de kısaltabilmektedir. Böylelikle yeni bir fikrin ürüne dönüşerek müşteriye sunulma süresi kısaltacak ve AM teknolojilerini doğru kullanan firmaların pazara ürün verme ve hızla değişen Pazar isterlerini hızlı bir şekilde cevaplayabilme yetileri artacaktır [16]. Benzer şekilde müşteri isterlerinin hızla değişebildiği ve çevik proje planlarında bunların göz önüne alınarak adimsal olarak tasarım yapılan ürünler için katmanlı imalat diğer üretim metodlarına göre çok açık avantajlar sağlar. Ayrıca AM teknolojilerinin ihtiyaca hızla cevap verebilmesi envanter tutma ihtiyacını da azaltarak operatif maliyet yükünü hafifletmektedir [17].

Merkezsiz üretim avantajı ile üretim noktaları tüketim ve kullanım noktalarına yaklaştırılabilmekte ve bu şekilde transportasyon ve lojistik maliyetleri de azalmaktadır. AM, tüketicilerin ürünlerini onarmak için kendi yedek parçalarını yazdırmalarına ya da yazıcılar ile onarabilmelerine olanak tanır [18]. Parçaların kullanım noktasında veya kullanım noktası yakınında üretilmesi, müşterinin erişilebilirlik beklentilerini sağlamak için gereken envanterleri azaltır, teslimat sürelerini kısaltır, ömür ve bakım aralığı tahminlerinin doğruluğunu önemsiz hale getirir. Bu şekilde envanter tutma, depolama, nakliye, gümrük, vergiler gibi ek işlem ve maliyet kalemlerine gerek kalmadan müşteri taleplerine cevap verilebilir. [18].

Merkezsiz üretimin getireceği yeniliklerde en uç nokta olarak satıcı kontrolünden uzak üretim, yani kullanıcı tarafından üretebilen ürünler olarak görülebilir [19]. Tüketicilerin bir ürünü geleneksel şekilde perakendecilerden satın almak yerine evde üretme hakkı olması durumunda satın alma maliyetinin %80 oranında azalacağı tahmin edilmektedir [20].

Çevreye duyarlılık ve sürdürülebilirlik tedarik zincirine girdi veren bir konudur. Merkezi üretim ile tedarik zinciri adımları kısılır ve daha düşük karbon ayak izleri bırakılabilir. AM teknolojilerinde kullanılan tozlar tekrar tekrar kullanılarak hammadde miktarı azaltılabilir. Ayrıca talaşlı proseslerin aksine talaş gibi atıklar üretilmez. Bu durum özellikle de savunma ve havacılık sanayinde kullanılan yüksek bedelli ham malzemeler için önemli bir kazançtır. Ayrıca üretim süreçleri

kısalacağı ve kalıp takım gibi ihtiyaçların da üretilmesi gerekmediği için üretim için kullanılan enerji miktarı fark edilir şekilde azalır [21]. Daha az transportasyon ve emisyon oluşur. Ayrıca geri dönüştürülebilen malzemelerin kullanılabilmesi de çevreye duyarlılık açısından önemlidir. Son yıllarda ağırlık optimizasyonunu sağlayabilmek için gitgide daha sık kullanılan karbon fiber malzemelerin geri dönüştürülerek AM ile tekrar kullanımı değerlendirilmektedir [28].

Katmanlı imalat prosesleri doğası gereği zamanla aşınıp hasar görmesi muhtemel olan parça ve takımların tamir edilmesi için uygundur. Toz yatağı füzyonu (powder bed fusion) veya doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition) gibi çeşitli AM teknolojilerinin kullanılması, hasarlı takımları değiştirmek yerine onarmayı bir seçenek haline geliyor. Bu sayede takım ömrü artıp işletme maliyetleri azalacaktır. Bu da önemli miktarda zaman ve para tasarrufu sağladığı gibi daha az atık ile de sürdürülebilirliği olumlu yönde etkileyecektir. Hasarlı bir takımın örnekleri ve onarılmış durumu kaynaklarda gösterilmektedir [22].

3. KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİSİNDE GELİŞMEYE AÇIK HUSUSLAR

Katmanlı imalat 30 yıldır araştırılan metodolojilerden oluşmakla birlikte süreçleri geleneksel üretimle karşılaştırıldığında nispeten yeni olarak kabul edilebilir. AM teknolojilerinin daha geniş çapta benimsenmesi ve faydaların gerçekleştirilmesi için iyileştirilmesi gereken birçok konu bulunmaktadır.

AM'nin uygulanması, tezgâh üreticisinden teknoloji uygulayıcısına (tasarım ve üretim yapan firma) ve teknoloji uygulayıcısından müşterilerine/tedarikçilerine uzanan iki ayrı tedarik zincirinin kesişim noktasında yer alır. AM teknolojilerini başarılı bir şekilde uygulayabilmek ve üretim sürecine entegre edebilmek için, uygulama sürecinde tezgâh üreticisinin desteği, uygulama başarısının önemli bir faktörü olarak kabul edilmektedir [23]. Zaihiri'nin çalışmalarının önemli bir çıktısı olarak başarılı teknolojik inovasyonun karmaşıklık düzeyi ile kullanıcı-tedarikçi etkileşim süreçlerinin yoğunluğu arasında doğrudan bir ilişki olduğu gösterilmiştir [24].

AM endüstrisinin tedarik zincirini etkileyen bir diğer önemli özelliği, tezgâh üreticilerinin birçok uygulamada aynı zamanda ham malzeme tedarikçisi olmalarıdır. Bu durumda katmanlı imalat tezgâh üreticileri ve bunları kullanarak üretim yapan firmalar arasında tezgâh tedarikinden sonra da hammadde ihtiyacı için sürekli bir bağlantı olması gerekmektedir. Başka bir deyişle, üretici tezgâh

üreticisi ile bir nevi stratejik ortaklığa girmiş olur. Üretim tezgâhı-hammadde bağımlılığı teknolojinin henüz yeterince olgunlaşmamış olmasına bağlanabileceği gibi bir satış stratejisi olarak da değerlendirilebilir.

AM'nin tedarik zinciri yönetimine ilişkin bazı diğer sınırlamaları imalat yöntemi süreçlerinin halen gelişmekte olmasına bağlayabiliriz. Aşağıdaki konuların netleştirilmesiyle AM tedarik süreçleri daha belirli hale gelecektir:

- Farklı uygulamalar için birçok farklı katmanlı imalat metodu, sayısız tezgâh üreticisi ve farklı birçok malzeme olması az tezgâh ile birçok parçanın merkezsiz üretim avantajını engellemektedir.
- AM'nin potansiyel kullanımları ve faydaları hakkında tasarımcıların ve mühendislerin eğitim ihtiyacı bulunmaktadır. Bir başka ifade ile katmanlı imalat için tasarım (design for Additive Manufacturing) becerilerinin desteklemesi ve geliştirilmesi gerekmektedir.
- Özellikle fonksiyonel parçalar üretmek için uygun olan ekipman ve malzeme fiyatları oldukça yüksektir. Fiyat efektif çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Sertifikasyon ve kabuller için prosedürler ve standartlar geliştirilmelidir.
- Kalite ve Giriş Kalite Kabul süreç ve kriterleri belirlenmeli ve standardize edilmelidir.
- Çok sayıda üretim yapılacağı durumlarda sınırlı katman yığılma hızı ile üretim hızları düşük kalarak hızlı teslimat sağlanamayabilir.
- Bazı katmanlı üretim teknolojileri ile üretilebilecek parça boyutları tezgâh büyüklüğü ile sınırlıdır.
- AM teknolojileri ile üretilen parçaların saha kullanımları az olduğu için güvenilirliği ile ilgili az bilgi bulunmaktadır ve parça bakım tamir veya değişim süreleri tam doğru olarak tahmin edilememektedir.
- Malzemeler halen geliştirilmektedir, malzemeler standarize olmuş değildir.
- Bazı AM teknolojilerinin yüzey kalitesi ve işlem sonrası estetiği fonksiyonel yüzey olarak kullanılmaya uygun olmadığı için ekstra yüzey post-proses işlemleri gerektirmektedir.
- AM teknolojileri ile üretilen parçaların farklı çevresel koşullar altındaki performansına ilişkin bilgi eksikliği bulunmaktadır.
- AM aracılığıyla yapılan ürünlerin satış sonrası süreçlerinde (ömür ve bakım süresi tahminlemeleri, garanti süresi) belirsizlikler bulunmaktadır.
- Merkezi üretim avantajı kullanıldığı zaman IP haklarının nasıl korunacağı ile ilgili bir süreç gelişmemiştir.

- Dijitalleşmenin tüm avantajları kullanıldığı zaman siber güvenlikle ilgili tedbirler alınmalıdır.

Geleneksel teknolojilerin aksine, AM süreçleri için ürünleri üretme/satın alma kararları (make-buy decisions) konusunda oturmuş bir uygulama veya kural dizisi yoktur. Bu kararı etkileyen çok sayıda faktör vardır. Bu faktörlerin çoğu, çeşitli endüstriler için genelleştirilemeyecek kurumsal stratejik düzenlemelerle ilgilidir ve zamanla firmaların deneyimleri ile oluşturulur. Katmanlı imalat teknolojileri için bu kural dizinini oluşturabilecek veri tabanı henüz bulunmamaktadır [25].

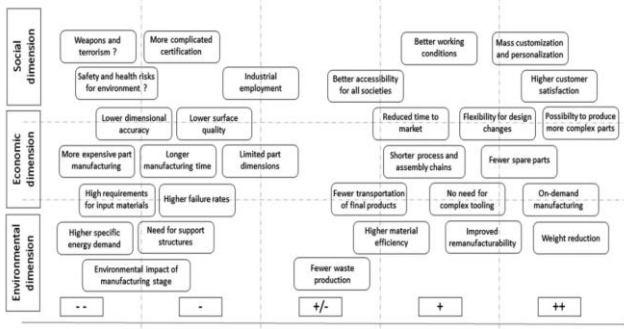
Hangi katmanlı imalat teknolojisinin seçileceği hem üretilecek ürünün isterlerin hem de operasyonel faktörlerin (ürün tasarım yetkinliği, üretim süreçlerinin planlanması, envanter yönetimi, kalite kontrol, maliyet ve entegrasyon) fonksiyonudur. Tüm bu sebeplerden dolayı katmanlı imalat ile üretilen parçalar üret-satın al kararlarının belirli standartlar ile alınabilmesi için çokça deneyim gerekmektedir.

Eğer tasarlanan parçalar katmanlı imalat teknolojileri ile üretilecekse, yapılacak üretimin nerede yapılacağı (make/buy kararı) değerlendirilmelidir. Üretilecek parçanın şirket içi bir tezgâh alımı ile mi gerçekleştirileceği ya da dışarıda halihazırda bu tezgâhı kullanan bir firmaya da mı üretileceği kararı birçok faktöre bağlıdır. Yüksek yatırım maliyeti ve yüksek genel giderler firma içi üretimin dezavantajlarını oluştururken, bilgi gizliliği, IP haklarının korunma kritikliği ve dışarıdaki firmaya üretim için ödenen bedelin şirket içi bilgi kazanımı getirmemesi başka firmadan hazır olarak satın alma kararının sınırlamalarıdır [25]. Ayrıca şirketin stratejik hedeflerinde AM teknolojilerinde gelişmek ya da bu teknolojilerle üretim olup olmaması ya da katmanlı imalat konusunda stratejik bir ortaklık yapma kararı bulunması da çok önemli bir faktördür. Bu karar üretilecek parçaların kritikliğine, miktarına ve olası stratejik ortakların yetkinliğine göre değerlendirilmelidir.

[21] çalışmasında AM uygulamaları için birçok faktörü inceleyen kavramsal bir çerçeve [21] çalışmasında önerilmiştir. Bu çalışmada AM teknolojilerinin geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırılmasının özeti Şekil 3'te sunulmuştur.

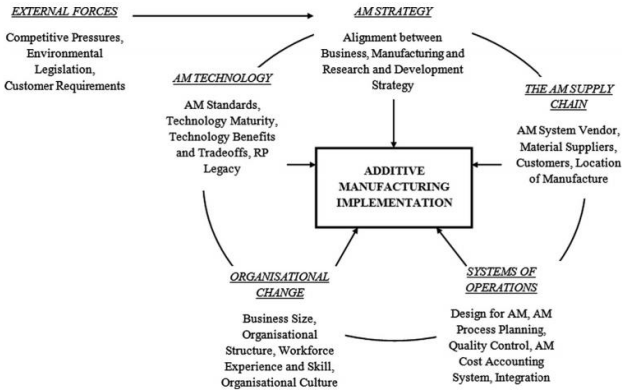
Stratejik bakış açısıyla AM ekipmanının yüksek kullanımı, herhangi bir teknoloji yatırımı için önemli bir faktördür. Bununla birlikte yapılacak yatırımların yeni üretim yetenekleri ve yeni iş fırsatları oluşturabileceği de düşünülmelidir. İş stratejisinden teknik faydalara mantıklı bir bağlantı olmadan AM yatırımları yapan bir şirket rekabet

avantajı elde edemez. Yani bir şirketin teknolojik yatırım planı, iş planı ve stratejileriyle uyumlanmalıdır. AM yatırımı yapılırken teknolojinin olgunluk seviyesi ve bunu yukarı çıkartmak için gereken Ar-Ge eforları da göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 3. Katmanlı imalat teknolojilerinin geleneksel üretim metotlarına göre avantaj (++) ve dezavantajları (-) 21

AM teknolojilerinin uygulanmasında diğer bir iyileştirilmesi gereken boyut ise, organizasyon işgücünün deneyimi ve yetkinlikleridir. AM teknolojileri kullanımında, tasarımcıların ve mühendislerin üretim için tasarım (DFM: design for manufacturing) konseptini yeniden değerlendirmeleri ve alışkın oldukları düşünce tarzından yeni bakış açılarına esneklik göstermeleri gerekir. DFM, üretim kısıtlamalarının ve fırsatların tasarım sürecinde dikkate alındığı ve bir karar faktörü olarak değerlendirildiği bir tasarım felsefesidir.



Şekil 4. Katmanlı imalat uygulama temelleri 23

İyileştirmeye açık bir diğer husus da metal parçalar için katmanlı imalat teknolojilerinin kullanılması noktasında netleştirilmesi gereken konulardır.

Katmanlı olarak üretilmiş metallerin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi birçok araştırma grubu tarafından araştırılmaktadır. Tüm bu çabalara ve gelişmelere karşın mikro yapı ve mekanik

özelliklerdeki anizotropi ve heterojenlik, yüksek güvenilirlik ve dayanım isteri olan ürünler için AM metal işlemlerinin sınırlamaları olmaya devam etmektedir. Metal AM teknolojileri tarafından üretilen parçalar, yüksek yoğunluklu enerji girişi, yönlü ısı çıkarma, eritme, yeniden eritme ve hızlı katılaşmayı içeren çok karmaşık bir döngüsel termal geçmişe maruz kalır. Anizotropik ve heterogon mikro yapılara ek olarak, gözenekler, düzensiz yüzey pürüzlülüğü, bir katman içerisinde veya katmanlar arasında füzyon eksikliği gibi birçok kusur AM işlemlerinin bir sonucu olabilir. Metal katmanlı imalat teknolojilerinin sunabileceği tüm potansiyeli anlamak için farklı malzemelerin çeşitli işleme koşulları altında oluşan anizotropik ve heterojen mikroyapı ve mekanik özelliklerin daha fazla araştırılması ve tekrar edilebilir şekilde yeterli dayanımların elde edilmesi zorunludur 26.

Katmanlı imalat süreçlerini etkin bir şekilde ticarileştirmenin önündeki engellerden birisi de, AM yapımı parçaların güvenilirliği hakkında bilgi eksikliği ve bundan kaynaklanan yapısal bütünlük ve ömür analizlerinin yeterince olgunlaşmış olmamasıdır. Ayrıca AM bileşenlerinin döngüsel yükleme altındaki mekanik davranışlarının ve bunların yorgunluk dayanımına etkisinin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı AM ile üretilen metalik parçaların farklı çevresel durumlarda ve yükler altında güvenilirlik bilgileri geleneksel üretim metotlarındaki kadar gelişkin ve güvenilir değildir. Özetle, AM ile üretilen parçaları içeren emniyet kritik tasarımlar için mekanik yorulma tabanlı bir ömür değerlendirme yönteminin geliştirilmesini gerektirir [27].

4. KATMANLI İMALATIN SAVUNMA SANAYİNE KATKILARI ve POTANSİYELİ

Gelişen teknolojiler ve 4. Sanayi devrimin getirdiği teknolojik, sosyal ve kültürel değişiklikler ile savaş ortamları ve savaş senaryolarının da değişmesi kaçınılmazdır.

Yeni dünya düzeninde ülkeler arası savaşlardan ziyade merkeziz savaşlar, meskün mahalde gerçekleşen gerilla – devlet savaşları ve siber savaşlar görülmektedir. Ayrıca birçok büyük ülke kendi topraklarında değil, başka ülke topraklarında savaşmakta ya da başka coğrafyalardaki savaşları desteklemektedir. Amerikan Savunma bakanlığı uzay ve siber uzayı da yeni çağda bir savaş alanı olarak tanımlamıştır.

Bu durumda güçlü ülke ordularının merkeziz savaşlara, yani gerektiği anda başka coğrafyalarda çatışma durumuna hazır olması beklenmektedir. Bu durumda ordular için en önemli kriterlerden birisi de envanterin çok yüksek bir hazır bulunuşluk

sağlamasıdır. Yüksek hazır bulunuşluğun farklı coğrafyalarda dahi sağlanabilmesi için envanter yönetimi, tedarik süreleri, hızlı bakım onarım yapabilmeye kabiliyetleri, hızlı tasarım iyileştirme ve uygulama yetenekleri önem kazanmaktadır. Güçlü ordular hedeflerinde her yerde savaşa hazır olma hedefini açıkça belirtmekte ve yol haritalarını buna uygun şekilde geliştirmektedir [29].

Çatışma durumlarında zaman en önemli unsurdur. Çatışma durumlarında hazır bulunuşluk insan hayatı ile direkt olarak ilişkili olduğu için diğer tüm değişkenler önemini kaybetmektedir. Operasyonlarda hasar gören sistemler için küçük hacimli özelleştirilmiş bileşenlerin üretilmesi, yine operasyonlarda hasar gören komponentlerin katmanlı imalat teknolojileri ile tamir edilebilmesi ve/veya bozulan parçaların yedeklerinin katmanlı imalat teknolojileri ile savaş alanında taşınan bir katmanlı imalat tezgâhı ile üretilmesi katmanlı imalatı savunma sanayi tedarik zinciri için vazgeçilmez kılmaktadır.

Savunma sanayinde kullanılan birçok platformun ömür devri diğer sektörlere göre oldukça uzundur. Bu da kullanılan parçaların demode olmasını ve demodelik yönetiminin yapılmasını beraberinde getirir. Bazı durumlarda komponentlerin tedarikçileri ya da üretimde kullanılan kalıplar güncel olmayabilir. Böyle durumdaki mekanik parçalar için tersine mühendislikle ve katmanlı imalat teknolojileri kullanarak üretmek mümkün ve ekonomik olacaktır. Savunma sanayi için operasyonlarda hasar gören sistemler için küçük hacimli, özelleştirilmiş bileşenlerin üretilmesi ve yedek/aşınan parça tamiri kritik bir ihtiyaçtır.

AM ile sadece üretim ve tamir zamanı değil, yeni ürünlerin tasarım ve geliştirme aşamasında gerekli zaman da azaltılabilir. Savunma sanayinde bir çatışma durumunda fark edilebilen bir tasarım iyileştirmesine AM ile yapılan parçalarda daha hızlı tepki verebilir.

Hele ki farklı coğrafyalarda savaşılması durumunda stok bulundurmaya zorunda olmamak büyük bir avantaj getirecektir [30].

Makalenin giriş kısmında anlatılan diğer tüm avantajlar göz önüne alınmasa dahi sadece AM'nin imkân tanıdığı merkezsiz ve dağıtılmış üretim avantajı savunma sanayi envanterinin kısa bir süre içerisinde belirli bir kısmının katmanlı imalat ile üretilmiş parçalardan oluşturulması gerekliliğini getirmektedir.

Amerikan Savunma Bakanlığının Amerikan Ordusunun 2017 yılında yalnızca lojistik operasyonlar için 1.194 milyar USD harcadığı açıklamıştır 28. Bunu göz önünde bulundurarak

Amerikan Donanmasının gemilerinde 3 boyutlu yazıcılar bulundurmasına şaşırılmamalıdır 32. Parçaların birçoğu aynı tezgâhlarda üretilebilecek şekilde ortaklaştırarak ve üretim yapılabilecek tezgâhın gemide konuşlandırılarak katmanlı imalat teknolojilerinin avantajlarından en iyi şekilde faydalanılabilir ve bu şekilde maliyet etkin şekilde farklı coğrafyalarda hazır bulunuşluk sağlanabilir.

Amerikan Ordusu Deniz Kuvvetleri misyonlarında da biyomedikal cihazların üretilmesi ve savaş durumunda birliklerin hayatta kalmasına katkı sağlanması öngörülmektedir. Amerikan donanması USS-Essex isimli amfibi hücum gemisinde 3D yazıcılar yerleştirdiğini ve burada plastic şırınga, neşter, güverte kapağı gibi birçok tıbbi ürün ve askeri yedek parça üretildiğini açıklamıştır [32]. U.S. Navy Proceedings'te yayınlanan bir makalede gemi filolarının eklemeli imalat fabrikalarına dönüşerek birçok bakım, onarım ve yedek parça imalatlarının bu şekilde üretilbileceği savunulmuştur. Hatta daha da fütüristik bir bakış açısıyla insansız deniz sistemleri arttığı zaman da birçok görevi icra edebilecek robot mürettebatların 3D yazıcılarda basılarak üretilbileceği ifade edilmiştir [33].

Savaş senaryolarında 3D Yazıcılar karada da hızlı saha çözümleri sunmaktadır. Amerikan Ordusu Afganistan'da hazır bulunuşluğu arttırmak için Hızlı Teçhizatlandırma Sahasını (ingilizce adıyla: Rapid Equipping Fielding [REF]) devreye almıştır. Bu Sahalarda askeri birliklerde ortaya çıkan ve daha önce öngörülmeyen ihtiyaçların hızlı bir şekilde çözümlenerek birliklere ulaştırılması hedeflenmiştir. Buralarda pil adaptörleri veya mayına karşı korumalı araçlar için (MRAP) lastik şişirme sistemleri gibi birçok başarılı uygulama yapıldığı rapor edilmiştir [34]. Bu tip hızlı saha çözüm merkezlerinde 3D katmanlı imalat prosesleri sayesinde biyomedikal uygulamalar yapılması ve askeri yedek parça ya da mühimmatların basılması da hedeflenmektedir [35].

Savaş durumlarında 3D yazıcılar ile yaralanan askerler için kişiselleştirilmiş protez, implant ve organ basılarak kayıpların minimuma indirilmesi yine katmanlı imalat teknolojilerinin en önemli savunma misyonları içerisinde yer almaktadır.

Katmanlı imalat teknolojilerinin merkezsiz üretim avantajının en önemli örneği de katmanlı olarak inşaat yapıları kurulabilmesidir. İnşaat alanında kullanılan 3 boyutlu yazıcılar ile bina, cephe, barınak gibi sığınmak için kullanılacak yapıların yanı sıra köprüler de inşa edilerek farklı coğrafyaların koşullarına hızla adapte olunabilir [36].

Bu tarz büyük yapılar yalnızca beton kullanılarak değil aynı zamanda metal ile de Shaped

Metal Deposition ya da EBAM metodlarıyla üretilebilmekte ve savunma sanayiinde kullanıma uygun hale gelmektedir [37].

Uzay sanayiinde de merkezsiz ve yerinde üretimin büyük avantajları bulunmaktadır. Uzay uygulamalarında ağırlık en önemli faktördür. Ağırlık azaltımı için yapısal olarak optimize edilmiş ve titanyum gibi hafif alaşımların kolaylıkla kullanılabilmesi AM teknolojileri uzay uygulamaları için de rakipsiz kılmaktadır. Mars'ta yaşama vizyonunda direk enerji lazer metoduyla Mars gezegeninde üretim yapabilecek tezgahlar planlanmakta, hammadde olarak da ay tozu kullanılabilmesi belirtilmektedir [38]. 2016 yılında ay tozundan lazer eritme yöntemi ile imalat yöntemi uzayda AM ile üretime yeni bir bakış açısı katmıştır [39].

Tüm bu avantaj ve bununla birlikte gelen olası kullanım alanlarının gerçekleştirilebilmesi için öncelikle sayısız metot, malzeme ve tezgâhın en uygun olanlarının seçilerek belirlenmesi ve bazı parçaların bu öne çıkan AM metot ve malzemelerine göre yeniden tasarlanması gerekmektedir. Eğer belirlenen birkaç üretim tezgâhi ile birçok farklı uygulama yapılabilirse bu verimi daha da arttıracak ve savaş alanında hazır bulunuşluğa daha da fazla katkı sağlayacaktır. Bu yüzden ümit vaat eden teknolojileri önceliklendirilerek proses en iyileştirilme süreçleri hızlandırılmalıdır. Katmanlı teknolojilerle benzersiz ve karmaşık ürünler üretilebilmesi için tasarım paradigmasının da değişmesi gerekmektedir. Katmanlı imalat için tasarım çalışmalarının yapılması faydalı olacaktır. Ayrıca, savunma sanayinde katmanlı imalatın avantajlarının en iyi uygulanıp ürüne çevrilebilmesi için aşılması gereken kalite ve sertifikasyon isterleri bulunmaktadır [40]. Niş bir kullanımdan endüstriyel kullanıma geçilebilmesi için ürünün olgunlaşması yani teknoloji hazırlık seviyesinin en üst düzeye gelmesi gerekmektedir. Bu da seri üretimde kullanıma çevrilebilmek için gereken tekrarlanabilirliği sağlayacak tutarlı ve sistematik bir mühendislik desteği ile kalite kabul kurallarının belgelenmesini sağlayabilecek kadar yeterli veri, dokümantasyon ve standardizasyon içermektedir. Tekrar edilebilirlik, kalite, üretim metot, tezgâh ve malzemelerinin önceliklendirilmesi gibi hayati meseleler belirlendikten sonra daha önce belirtildiği gibi şirketlerin make/buy kararlarının oturmuş pratiklerinin oluşturulması gerekmektedir.

Bunların yanı sıra merkezsiz ve direk 3D datadan üretimin savunma sanayinde kullanılabilmesi ve 4. Sanayi devriminin katmanlı imalatla en yüksek avantajının kullanılabilmesi için siber güvenliğinin de sistematik bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Tüm avantajlar değerlendirildiğinde tüm yukarıda belirtilen belirsizlik ve iyileştirme noktalarına rağmen AM'in sunduğu olanaklar bu teknolojilerin yaygınlaştırılmasını gerekli kılmaktadır.

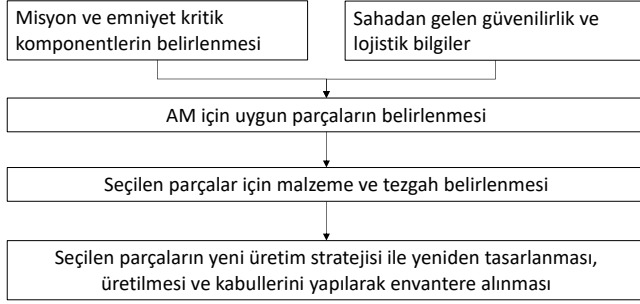
5. TÜRK SAVUNMA SANAYİİ İÇİN YAKLAŞIM ÖNERİSİ VE SONUÇ

İlerleyen teknoloji ile üretim süreci, ürün kompozisyonlarındaki hız, karmaşıklık ve çoklu malzemelerin daha önemli hale geldiği bir eğilime doğru gitmektedir. Katmanlı imalat, geniş bir uygulama yelpazesi olduğu ve yeni gelişen mega trendler için önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yüzden de muazzam bir büyüme potansiyeline sahiptir. Ancak, henüz görece yeni olduğu için katmanlı imalat teknolojileriyle ilgili birçok belirsizlik bulunmaktadır. Geliştirme alanları da göz önüne alınınca, bu teknolojinin ancak ana zorluklar sistematik bir şekilde ele alınabilirse geleceğin temel teknolojilerinden biri haline gelebilecektir.

Katmanlı imalat teknolojilerini özellikle savunma sanayiinde hazır bulunuşluk ve merkezsiz üretim avantajlarıyla geleceğin teknoloji olarak görülmektedir. Savunma sanayinde tedarik zinciri anlayışını tamamen değiştirebilecek birçok fırsatın değerlendirilebilmesi için öncelikle kullanıma uygun metot, malzeme ve bunların üretilebileceği tezgahlar belirlenmeli ve birçok komponent de bu seçime uygun olarak tekrar tasarlanmalıdır. Bunların yapılabilmesi için tüm paydaşların gerekli eğitimlerinin tamamlanması gerekecektir.

Katmanlı imalat teknolojilerinin savunma sanayi için gelebileceği en uç nokta sahada ihtiyaca göre parçaların sahra ortamında üretilmesi ve/veya tamir edilmesidir. Bunun mümkün olabilmesi için en avantajlı malzeme, tezgâh ve üretim metotlarının seçilmesi, envanterin özellikle de kritik ve ömürlü parçaların yeniden bu seçimlere uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir. AM için yeniden tasarlanacak parçalar seçilirken sahadan gelen lojistik istatistik bilgileri kullanılarak öngörülebilir bakım (predictive maintenance) önlemleri uygulanmalıdır. Seçilecek metot, tezgâh ve malzemeler, hava, kara ve deniz araçları için ortaklaştırılmaya odaklanılmalıdır. Örneğin, büyük metal parçalar ve tamir için ekonomik bir yöntem (direk enerji transferi yöntemlerinden bir tanesi), hafif tasarımlar gerektiren, iyi yüzey kalitesindeki havacılık ve uzay uygulamaları için bir yöntem ve malzeme (titanyum toz yatağı füzyonu metotlarından birisi), tıbbi yardım malzemeleri ve diğer plastik bazlı malzemeleri üretebilmek için (FDM veya SLS gibi) bir metot seçilebilir. Katmanlı imalattaki parça değişiminde ekonomik başa baş noktası yakalanmasından ziyade hazır bulunuşluk ve her an hazır durumda olma kriteri önceliklendirilmelidir.

Mobil üretim merkezleri için en uygun platform olacaktır. Bunların yapılabilmesi için personel eğitimleri tamamlanmalı ve belki de kalite/tedarikçi yetkilendirmeleri yerine personel yetkilendirmelerine giden bir yeni bir sistem kurulmalıdır.



Şekil 5. Katmanlı imalat teknolojilerinin savunma sanayi için kullanım akış şeması

Katmanlı imalat teknolojilerini ülkemiz için büyük öneme sahip olan savunma sanayi için en verimli şekilde kullanılabilmesi için yol haritası belirlenmeli ve sistematik şekilde uygulanmalıdır. En kısa sürede ve etkili katkıyı alabilmek için devletin teknoloji stratejisi, Savunma sanayi yol haritaları ve şirketlerin yol haritaları örtüşmeli ve öncelikli alanlarda yerli şirket ve araştırma kuruluşlarının ortak çalışılması için yol açılmalıdır. Sistematik bir çalışma ile katmanlı imalat teknolojileri ülkemiz için büyük bir atılım yapma potansiyeli barındırmaktadır.

SUPPLY CHAIN MANAGEMENT IN DEFENSE INDUSTRY WITH ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing (AM) gains more and more importance in the recent years due to its technical advantages (flexibility in design, weight reduction by optimized materials and design, less waste, reduced production time) and potential to revolutionize the conventional supply chain. The AM process offers a huge potential in defense industry, as it enables decentralized manufacturing and supply as well as small volume manufacturing. In this article, the AM process is reviewed from a supply chain point of view, focusing on its advantages and potential on future value chain scenarios, together with the areas open for further improvement. Up to date examples of real-life additive manufacturing applications are also discussed.

Keywords: Additive Manufacturing, Supply Chain Management, Value Chain with Additive Manufacturing, Defense Industry

KAYNAKÇA

1. Guo N., Leu M.C. (2013). *Additive manufacturing: technology, applications and research needs*, Frontiers of Mechanical Engineering, 8(3), pp.215-243.
2. Discounts, A. (2019). *Additive Manufacturing Strategies – You Can Obtain And Enjoy Discounts – Tops bag mart | Informative Articles Can Improve Your Business*. [online] Topsbagmart.com. Available at: <http://www.topsbagmart.com/business/additive-manufacturing-strategies-you-can-obtain-and-enjoy-discounts/> [Accessed 1 Apr. 2019].
3. Ersoy K. (2009): *Verschleißprognose für Ziehwerkzeuge aus alternativen Herstellungsverfahren*, Dissertation, Technische Universität Muenchen (TUM)
4. Ersoy K., Celik B.B. (2019): *Utilization of Additive Manufacturing to Produce Tools, Intech Open, Design Engineering and Manufacturing*, ISBN: 978-1-78985-865-5, 2019, doi: 10.5772/intechopen.89804
5. Holmström, J. et al. (2010). *Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment*. Journal of Manufacturing Technology Management, 21(6), pp.687–697.
6. Ersoy K., Koc B., Yasa E.: *A Technological and Business Perspective of Additive Manufacturing for Defense Industry*, The 18th International Conference on Machine Design and Production, UMTİK, 2018
7. Yıldız A. S., Davut K., Koc B., Yılmaz O., *Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.108, Pp.3391-3404, 2020
8. Khajavi, S.H., Partanen, J. & Holmström, J. (2014). *Additive manufacturing in the spare parts supply chain*. Computers in Industry, 65(1), pp.50–63. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166361513001565> [Accessed October 26, 2014]
9. Pour, M.A., Zanardini, M., Bacchetti, A., Zanoni, S. (2016). *Additive manufacturing impacts on productions and logistics systems*. IFAC-PapersOnLine. 49, pp.1679–1684.
10. Attaran, Mohsen, (2017). *Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics*. Journal of Service Science and Management

11. Mani, M., Lyons, K.W. & Gupta, S.K. (2014). *Sustainability Characterization for Additive Manufacturing*. 119, pp.419–428.
12. Stratays Ltd. (2015). *Aurora Flight Sciences and Stratays Deliver World's First Jet-Powered, 3D Printed UAV in Record Time*. [online] Available at: https://www.aurora.aero/wp-content/uploads/2015/11/SSYS_News_2015_11_9_Stratays_Corporate.pdf [Accessed 1 Apr. 2019].
13. Edlund P., (2017). *Additive Manufacturing in Low-volume Production: Business Case for Metal Components*. [online] Available at: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/251245/251245.pdf> [Accessed 1 Apr. 2019].
14. Cotteleer M., Crane J., Neier M., (2014). *3D opportunity in tooling: Additive manufacturing shapes the future*. [online] Available at: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-tooling.html> [Accessed 1 Apr. 2019].
15. EOS GmbH Electro Optical Systems, (2019). *Tooling: Innomia - Czech Tool Manufacturer Relies on Additive Manufacturing for Complex Customer Projects*. [online] Available at: https://www.eos.info/press/case_studies/Innomia [Accessed 1 Apr. 2019].
16. Michalik J., Joyce J., Barney R., McCune G., (2015). *3D opportunity for product design: AM and the early stage*. [online] Available at: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3d-printing-product-design-and-development/DUP_708_3DOpportunityProductDesign.pdf [Accessed 1 Apr. 2019].
17. Lindemann, Christian & Jahnke, Ulrich & Habdank, Matthias & Koch, Rainer, (2012). *Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing*. 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012
18. Walter, Manfred & Holmström, Jan & Yrjölä, Hannu, (2004). *Rapid manufacturing and its impact on supply chain management*. Proceedings of Logistics Research Network Annual Conference, Dublin, Ireland
19. Campbell T., Williams C., Ivanova O., Garrett B., (2011). *Could 3D printing change the world?* Atlantic Council Strategic Foresight Report
20. *Institution of Mechanical Engineers, (2011). DIY manufacture to 'slash supply chains'*. [online] Available at: [www.imeche.org/news/engineering/diy-](http://www.imeche.org/news/engineering/diy-manufacture-to-slash-supply-chains-) manufacture-to-slash-supply-chains- [Accessed 1 Apr. 2019].
21. Kellens, K., Baemers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R. and Duflou, J. R. (2017). *Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications*. Journal of Industrial Ecology, 21(S1), pp.S49-S68.
22. EOS GmbH Electro Optical Systems, (2019). *ToolRepair with Additive Manufacturing by EOS*. [online] Available at: https://www.eos.info/industries_markets/tooling/tool_repair [Accessed 1 Apr. 2019].
23. Mellor S., Hao L., Zhang D., (2014). *Additive manufacturing: A framework for implementation*. International Journal of Production Economics, 149, pp.194-201.
24. Zairi M., (1998). *Supplier partnerships for effective advanced manufacturing technology implementation: a proposed model*. Integrated Manufacturing Systems, 9(2), pp.109-119.
25. Ampower Insights, (2019). *Additive Manufacturing Make or Buy?* [online] Available at: <https://ampower.de/en/insights/cost-additive-manufacturing-make-or-buy-2/> [Accessed 1 Apr. 2019].
26. Kok Y., Tan X.P., Wang P., Nai M.L.S., Loh N.H., Liu E., Tor S.B., (2018). *Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review*. Materials & Design, 139, pp.565-586.
27. Chen, Dr B. (2017). *Cyclic Deformation and Damage Mechanisms in additive manufactured Ti-6Al-4V with Graded Microstructures*. Engineering Prioritization Panel Meeting, [online] Available at: <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOVViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P025978/1> [Accessed 1 Apr. 2019].
28. Yasa E., Ersoy K.: *Dimensional Accuracy and Mechanical Properties of Chopped Carbon Reinforced Polymers Produced by Material Extrusion Additive Manufacturing*, MDPI, Materials 12(23), 3885, 2019, doi: 10.3390/ma12233885
29. Office of the Secretary of Defense. *Summary of the 2018 National Defense Strategy*. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2018. <https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/2018-National-Defense-Strategy-Summary.pdf>
30. Office of the Secretary of Defense. *Department of Defense Additive Manufacturing Strategy*. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2021

31. Autonomous Manufacturing Ltd. (2018). *How is 3D Printing Transforming the Defence Industry?* [online] Available at: <https://amfg.ai/2018/06/19/how-3d-printing-is-transforming-the-defence-industry/> [Accessed 1 Apr. 2019].
32. Severson B., (2014). *U.S. Navy Installs 3D Printer On Their First Ship, The USS Essex.* [online] Available at: <https://3dprint.com/2554/uss-essex-3d-printer-navy/> [Accessed 1 Apr. 2019].
33. Cheney-Peters S., Hipple M., *Print Me a Cruiser! | Proceedings - April 2013 Vol. 139/4/1,322 (usni.org)*, 2013
34. Asclipiadis A., *Rapid Equipping Force uses 3-D printing on the frontline.* Rapid Equipping Force uses 3-D printing on the frontline | Article | The United States Army
35. L.E. Murr, *Frontiers of 3d printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication*, J Mater Sci Technol, 32 (2016), pp. 987-995
36. Hambling D., *U.S. Army's New Expeditionary 3D Concrete Printer Can Go Anywhere, Build Anything*, Forbes, 2021
37. Yilmaz O., Uglu A., *Shaped Metal Deposition technique in additive manufacturing: A review*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016
38. Clemens M., *Manufacturing May Be Possible on Mars Thanks to 3D Printing*, [Manufacturing May Be Possible on Mars Thanks to 3D Printing - 3Dnatives](#), 2022
39. Goulas A., Friel R.F., *D Printing with moon dust*, February 2016, Rapid Prototyping Journal 22(6):864-870, 2016
40. *3D opportunity for quality assurance and parts qualification*, [DUP 1410-3D-opportunity-QA MASTER1.pdf \(deloitte.com\)](#)