

# SAVUNMA VE HAVACILIK ALANINDA ADİTİF İMALAT TEKNOLOJİSİNİN BAKIM VE TAMİR AMAÇLI KULLANIMI\*

**Necmi Kara**

Uçak Mühendisi,  
TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.  
Kazan, Ankara  
nkara@tai.com.tr

## ÖZ

Bu çalışmada, havayolu işletmelerinin uçakların idame ve işletilmesinde katlandığı maliyete ve bunu azaltmak için alınan önlemlere değinilmiştir. Yedek parçaların aditif imalat teknolojisi ile imal edilmesiyle hava araçlarının yerinde bakım ve tamirini gerçekleştirmenin hedeflendiği vurgulanmış; yönlendirilmiş enerji yayılımı teknolojisinin kapsadığı üç yöntemden söz edilmiştir. Konunun ülkemizdeki gelişiminin sivil ve askeri havacılık açısından ayrı değerlendirilmesinin gerekliliğine işaret edilmiştir. Çalışmada, aditif imalatın barındırdığı bazı zorluklardan da söz edilmiş; savunma ve havacılık sanayinin özellikle bakım ve onarım alanında bu teknolojiyi kullanması ve yaygınlaştırmasının önemli olduğu vurgulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aditif imalat, savunma ve havacılık, tamir, bakım

## USE OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR MAINTENANCE AND REPAIR PURPOSES IN AEROSPACE AND DEFENSE SECTOR

### ABSTRACT

Cost of maintenance and repair for the airliners and some measures taken to reduce them are mentioned on this paper. Target of achieving on site maintenance and repair of air vehicles by manufacturing of spare parts by additive manufacturing is mentioned; directed energy deposition is reviewed. The possible future of the issue in our country is evaluated on the basis of civil and military usage. Also some difficulties of this technology is reminded and it is emphasized that aerospace and defence industry would drive application of this process on the maintenance and repair jobs.

**Keywords:** Additive manufacturing, defence and aerospace, maintenance, repair

Geliş tarihi : 10.07.2015

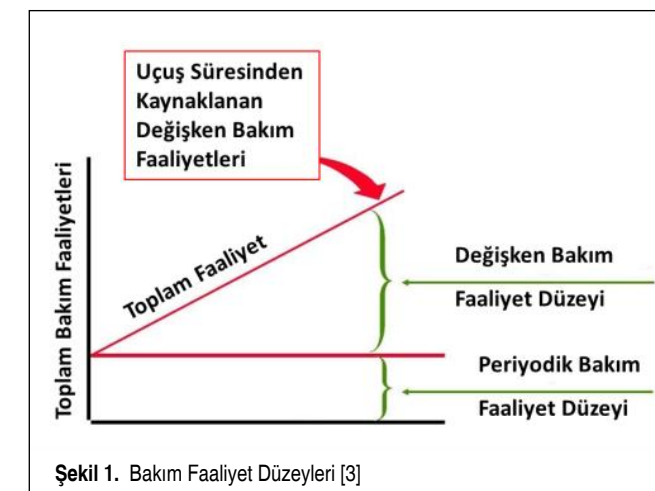
Kabul tarihi : 25.12.2015

\* 8-10 Ekim 2015 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından Eskişehir’de düzenlenen VII. Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi’nde bildiri olarak sunulan bu metin, yazarlarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

## 1. GİRİŞ

Bakım, bir sistemin kullanım ömrü boyunca bozulabilecek karakteristiklerini daha önceden belirlenmiş nitelik veya nicelik seviyelerinde tutmak veya bu seviyeye getirmek, bir ürünü restore etmek veya çalışılabilir durumda tutmak için servis, tamir, modifikasyon, revizyon, kontrol ve durum tespiti yaparak gerçekleştirilen işlemlerin tümü olarak tanımlanmaktadır. Hava aracı bakımının karakteristikleri emniyet, güvenilirlik, uçuşa hazır durumda bulunma şeklinde sıralanabilir. Onarım ise arızalanan veya hasarlanan elemanın sistem üzerinde veya atölyede daha önceden belirlenen standartlara geri getirilmesidir [1].

Bakım giderleri birçok havayolu işletmesinin toplam operasyon maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Günümüzde kullanıcı işletmeler uygun parçaları ve servis kalitesini düşük maliyetle elde etmek istediklerinden, bakım yapan işletmeler önemli bir mali baskı altında kalmaktadır. Üretici firmalar parça sayısını ve çeşitliliğini azaltmak için çalışmaktadır. Bu sayede yeni jenerasyon uçaklar daha az bakıma ihtiyaç duyacaktır. Ancak hava aracındaki parça sayısı azalınca farklı fonksiyonlar daha az sayıda komponentte toplanacağından, bunlar karmaşık hale gelecek ve bakım/tamir işlemlerinin daha teknolojik yöntemlerle yapılması gerekecektir. Ayrıca maliyet açısından optimum işlem yapabilmek için her bir komponentin değiştirilmesi, tamir edilmesi ya da yeniden imal edilmesi kararının verilmesi önem arz etmektedir. Eğer karmaşık komponentlerin üretim ve tamirinin maliyeti önemli ölçüde azalabiliyorsa, karar otomatik olarak 'satın alma'dan 'imal etme'ye dönüşecektir. Aynı şekilde, maliyeti düşürmek için işletmelerin, bakım tesislerinin olmadığı havaalanlarında neredeyse talebe bağlı olarak hafif bakımları yapacak şekilde yapılanması ihtiyacı ortaya çıkacak ve müşteriye yakın yerde parça imalatı söz konusu olacaktır [2]. Ayrıca şekil 1’de görüldüğü gibi, her türlü gereksinimi öngörülebilir periyodik bakımların yanında, uçuş süresinden kaynaklanan değişken bakım faaliyetleri



Şekil 1. Bakım Faaliyet Düzeyleri [3]

bakımlar önemli yer tutmakta olup, bu tür bakımların aniden ortaya çıkabilecek yedek parça ihtiyacının karşılanma hızı ve kolaylığı da önemlidir [3].

Yukarıda sayılan nedenlerle, uçakların bakım ve onarımı konusunda büyük avantaj sağlayacağı öngörülen aditif imalat teknolojisi ve bu teknolojinin bir alt kategorisi olan yönlendirilmiş enerji yayılımı (directed energy deposition) önem kazanmaktadır.

## 2. ADİTİF (KATMANLI) İMALAT

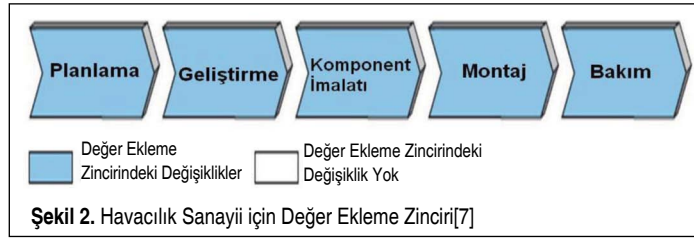
3 boyutlu model datasından objeler yapmak için, subtractive (azaltarak) imalat metodolojilerinin tersine, malzemeleri genellikle tabaka tabaka birleştirme prosesi olan aditif imalat veya daha çok bilinen ismi ile 3 boyutlu baskı teknolojisi ASTM F2792-12A standardında 7 ana kategoride değerlendirilmektedir [4]. Bunlar:

- I. Vat Fotopolimerizasyonu:** Bir tanktaki sıvı fotopolimerin, ışığın etkinleştirdiği fotopolimerizasyon ile seçici olarak püskürtüldüğü bir aditif imalat prosesisidir.
- II. Malzeme Püskürtme:** İnşa malzemesi damlacıklarının seçmeli olarak yayıldığı bir aditif imalat prosesisidir.
- III. Bağlayıcı Püskürtme:** Toz malzemeleri birleştirmek için sıvı yapıştırıcı bir ajanın seçmeli olarak yayıldığı bir aditif imalat prosesisidir.
- IV. Malzeme Çekme:** Malzemenin seçmeli olarak bir lüle veya orifisten dağıtıldığı bir aditif imalat prosesisidir.
- V. Toz Yatağı Füzyonu:** Termal enerjinin, bir toz yatağının bölgelerini seçici olarak eritip birleştirdiği bir aditif imalat prosesisidir.
- VI. Tabaka Laminasyonu:** Tabaka malzemelerin, bir obje oluşturmak için yapıştırıldığı bir aditif imalat prosesisidir.
- VII. Direkt Enerji Yayılımı:** Malzemelerin, gaz halinden katı hale geçerken odaklanmış termal enerji kullanılarak eritilip birleştirildiği bir aditif imalat prosesisidir.

Bu yöntemlerden toz yatağı füzyonu ve direkt enerji yayılımı savunma ve havacılık uygulamalarına elverişli olup, prototipleme, takım/kalıp ve nihai parça yapmak için kullanılmaktadır.

## 3. HAVA ARACI BAKIM VE ONARIMINDA ADİTİF İMALATIN YERİ

Aditif imalat, parça veya ürünlerin yeniden kullanımına ya da yeniden imalatına büyük katkıda bulunabilir. Bir parça veya ürün, orijinal görevini yerine getirecek biçimde tamir edilerek kullanılabilirse, hem malzeme sarfiyatı ve atık alanı azalacak, hem de imalat için daha az enerji ve malzeme gerekecektir. Klasik yöntemler olan kaynak, yüzeye metal püskürtme veya



mekanik basınç gibi tamir prosedürleri ile yapılan çatlakları kapatma ve doldurma gibi işlemler kalite ve maliyeti olumsuz etkilemektedir [5].

Artık, bir niş (özel) pazar konumundan çıkmakta olan aditif imalat yöntemleri hava aracı bakım, onarım ve revizyon (Maintenance, Repair and Overhaul, MRO) alanında uygulanmaya başlanmış olup, gelecek açısından da büyük potansiyel taşımaktadır. Birçok ülkede yürütülen araştırma ve geliştirme çalışmaları aditif imalat proseslerinin teknoloji hazırlık düzeylerini artırmaktadır. Şu anda bu pazarın %10'dan fazlasını savunma ve havacılık sektörü temsil etmektedir [6].

Şekil 2'de görüldüğü gibi, aditif imalat prosesleri havacılık sanayinin her aşamasında değer yaratacak bir potansiyel taşımaktadır. Komponentlerin planlama ve geliştirme safhalarında mühendisler bu teknolojinin tasarım kaynaklı faydalarını hayata geçirebilir. İlave olarak, karmaşık ve hareketli geometriler daha kolay, hatta daha hızlı bir montaja imkan sağlamaktadır. Bir başka değer yaratma potansiyeli ise gerek hasar görmüş parçaların tamirinin desteklenmesi, gerekse stok miktarının azaltılması yoluyla uçağın bakımında ortaya çıkmaktadır [7].

Hava araçları öngörülen ömürlerinden daha uzun süre kullanılabilir; bu gibi durumlarda yedek parçaların yönetilmesi karmaşık, zaman alıcı ve pahalı olmaktadır. Bu yedek parçaların birçoğunun da ihtiyaç duyulduğunda üretimden kalkmış olduğu görülmekte ve klasik yöntemlerle yeniden imal edilmeleri uzun sürebildiği için hava araçlarının yerde kalmasına da neden olabilmektedir. Havacılık alanında aditif imalatın bakım ve onarım faaliyetlerinde kullanılması birçok fayda sağlayacaktır:

- I. Parça değil dijital tasarım aktarılacaktır.
- II. Envanterde tutulan parça sayısı azalarak lojistik verim artacaktır. İsteğe veya ihtiyaca göre hızlı biçimde imal edilebileceği için envanterde daha az parça bulunacaktır.
- III. Takım, kalıp gerekmemesi, parçalarda yapılacak mühendislik değişikliklerinin de hızlı ve maliyet etkin olarak uygulanmasına imkan verecektir.
- IV. Minimum parti miktarı gerekmediği için tek parça imalatı bile yapılabilir.
- V. Özel bir üretim tesisi gerekmediğinden pazar ihtiyaçlarına karşı daha hızlı hareket etmek mümkün olacak;

ihtiyaç sahiplerinin ve malzeme tesislerinin yakınlarına konuşlandırılabilen mobil imalat tesisleri veya yerel branşlar açılacaktır.

- VI. Bu yöntem, hasar görmüş değerli parça ve takımların tamiri için de kullanılabilir.
- VII. Mevcut parçalara ilave özellikler kazandırılabilir. Şekil 3'te, bir uçak motorunun özellik kazandırılmış titanyum fan muhafazası görülmektedir [8].
- VIII. Parça yapımında polimer ve plastiklerden reçine ve metaller kadar değişen aralıkta farklı malzemeler kullanılabilir.
- IX. Bakım, test ve servis amaçlı kullanılan yer destek ekipmanları da hızla üretilebilir.



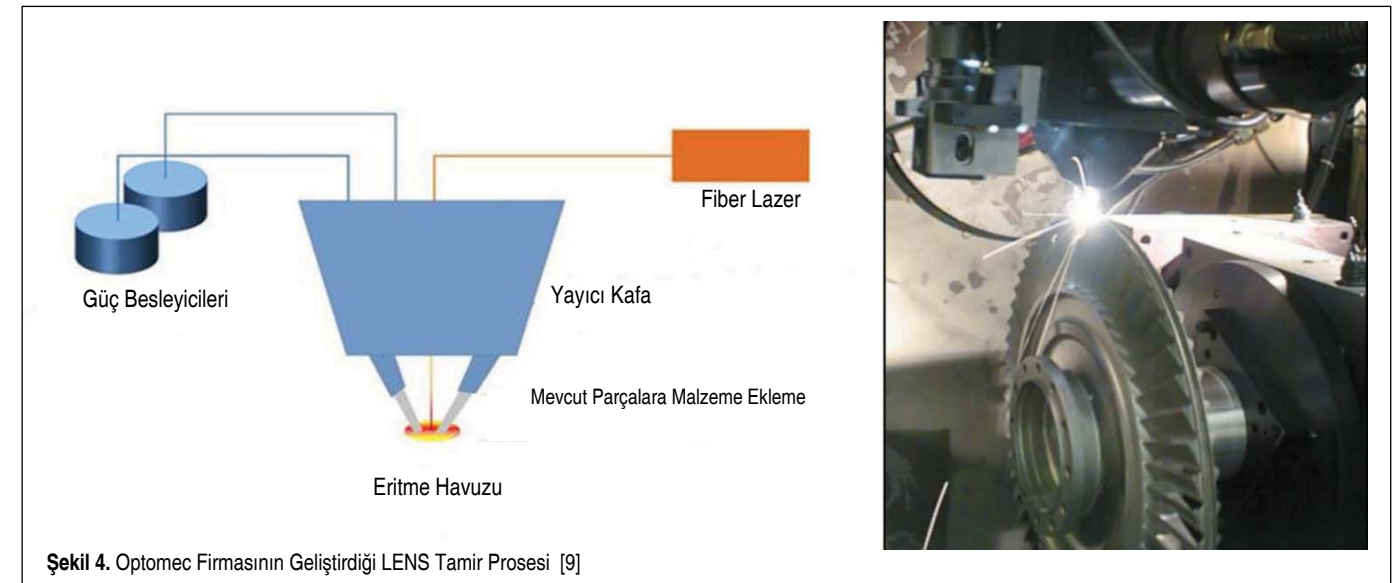
Şekil 3. Aditif İmalatla Özellik Eklendi Döküm Fan Muhafazası [8]

## 4. YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ YAYILIMI

Yönlendirilmiş Enerji Yayılımı (Directed Energy Deposition) adı verilen ve odaklanmış termal enerji kullanılarak malzemelerin gaz halinden katı haline geçerken eritilip birleştirildiği bir aditif imalat yöntemi olan proses, şu anda hava aracı bakım ve onarımında en fazla yer tutmaktadır. Proseste polimerler ve seramikler de kullanılabilir; ancak genellikle toz veya tel şeklindeki metaller tercih edilir. Yönlendirilmiş enerji yayılımı prensibine uyan başlıca yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

### 4.1 Lazer ile Net Şekillendirme (LENS)

America Makes, Optomec ve diğer 23 şirket ile 4 milyon Dolar değerinde "Re-Born in the USA" adlı bir proje imzaladı. Proje, ABD Hava Kuvvetleri için metal komponentlerin tamirinde aditif imalat teknolojilerinin kullanımına odaklanacaktır [9]. Kaynak ve diğer geleneksel tamir proseslerinin yerine, aşınmış ya da hasar görmüş parçaların tamirinde maliyet et-



Şekil 4. Optomec Firmasının Geliştirdiği LENS Tamir Prosesi [9]

kin bir yaklaşım geliştirmek için, hali hazırda kullanımda olan Optomec firmasının Lazer ile Net Şekillendirme (Laser Engineered Net Shaping, LENS) 3 boyutlu metal baskı teknolojisi seçilmiştir. Paslanmaz çelik, titanyum ve kobalt alaşımları, takım çeliği gibi yaygın mühendislik alaşımlarının yanında bazı seramiklerin, ısıya dayanıklı (refractory) metallerin ve diğer bazı malzemelerin kullanılabildiği proseste yaklaşık olarak 3 kW gücündeki bir lazer ile 1 kg/saat hızında yayılım yapılabilir. Şekil 4'te görüldüğü gibi LENS makinasının güç besleyicileri, hassas yayıcı kafa ve fiber lazer desteklerinden oluşan modüler komponentleri uçak parçalarının tamirine son derece uygundur.

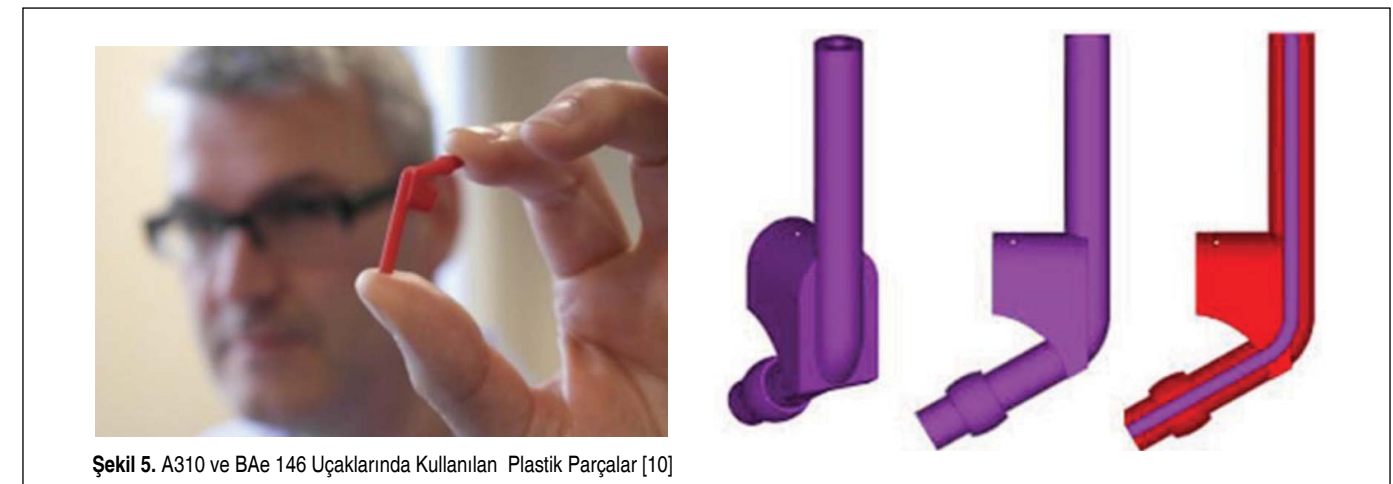
İşletmeler parça tamirinin yanında bu yöntemle bakım işlemlerine de başladılar. BAE Sistemler BAe 146 bölgesel jeti için aditif imalatla yedek parça üretip sertifikalandırdı. Şimdi, diğer ticari uçakları için aynı yöntem üzerinde çalışmaktadır. Şekil 5'te görülen ve orijinal kalıpları artık mevcut olmadığı

için aditif imalat yöntemi ile imal edilen küçük boyutlardaki plastik yedek parçalar, A310 ve BAe 146 uçaklarında servistedir [10]. Orijinali enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen plastik boruların kalıplarını yeniden yapmak, yaklaşık 23,255 Dolar maliyet ve aylar mertebesinde süre demektir.

İmalat ile bakım arasındaki çizgiler belirsizleşirken, ST Aero gibi bazı firmalar kalıp yapma süresini azaltacak biçimde döküm parçaları için aditif imalat teknolojisine yatırım yapmaktadır.

### 4.2 Yönlendirilmiş Metal Yayılımı (DMD)

Oluşturduğu güçlü metalürjik bağ ve ince, uniform mikro yapı sebebiyle bakım onarımda kullanılabilir potansiyel aditif imalat yöntemlerinden en önemlisi, malzeme püskürtme yöntemlerinden direkt metal yayılımı (Direct Metal Deposition/DMD) prosesidir. Yüksek güçlü lazerin, gaz şeklinde



Şekil 5. A310 ve BAe 146 Uçaklarında Kullanılan Plastik Parçalar [10]

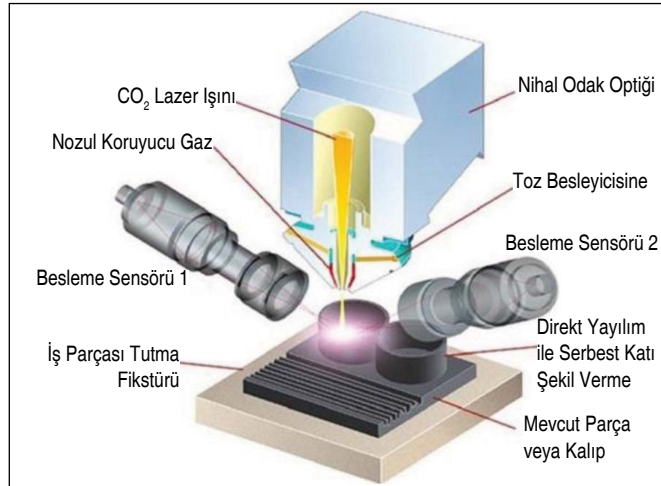
atomize edilmiş metal tozlarından tabaka tabaka parça oluşturduğu bu yöntemin hareketli optikler sayesinde büyük parçalar yapma imkanı, hızlı imalat çevrimi, tasarım serbestliği gibi avantajları olup, temel karakteristikleri şunlardır [11]:

- 0.005" boyutsal hassasiyet
- Tamamen dolu metal
- Kontrol edilebilir mikro yapı
- Heterojen malzeme imalat kabiliyeti
- İç geometri üzerinde kontrol

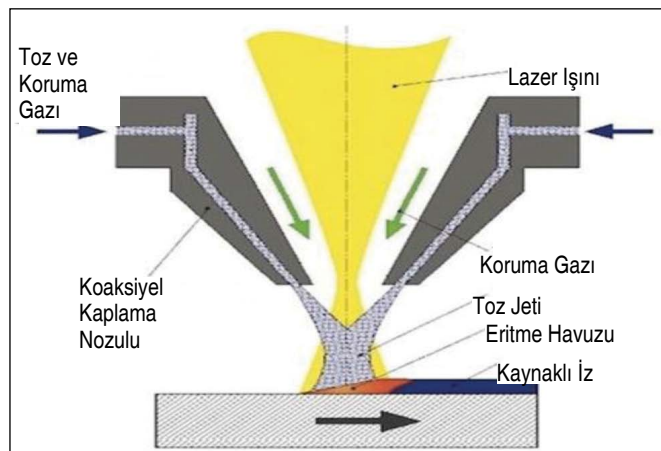
Bu yöntemle, parçalardaki aşınma ve korozyona karşı yüzey iyileştirme uygulamaları yapılmakta; gerektiğinde tamiri, yeniden imalatı ve yeniden konfigüre edilmesi (şekil, uygunluk ve fonksiyonellik değişikliği yapılması) mümkün olmaktadır.

### 4.3 Lazer Metal Yayılımı (LMD)

Bir başka yöntem ise Lazer Metal Yayılımı (Laser Metal Deposition/LMD) prosesisidir. Şekil 7'de görüldüğü gibi bu yön-



Şekil 6. Yönlendirilmiş Metal Yayılımı Prosesi (DM3D Teknolojisi) [11]



Şekil 7. Lazer Metal Yayılımı Prosesi [12]

temle, iç ve dış tamir yüzeylerine tabaka eklenebilmektedir [12]. Yöntem, 1500\*1500\*2100 ebatlarına kadar olan parçaların tamiri için kullanılabilir.

## 5. ÜLKEMİZ AÇISINDAN DURUM

Ülkemizdeki muhtemel gelişmeleri sivil ve askeri havacılık açısından ayrı değerlendirmek uygun olacaktır. Havayollarının bu konudaki gelişimi, büyük oranda üretici firmaların izleyeceği yola bağlıdır. Askeri alanda ise hem gereksinimin daha fazla olması hem de sınırlayıcı faktörlerin azlığı sebebiyle geçiş daha kolay olabilir.

Ülkemizde değişik amaçlarla kullanılan birçok hava aracı bulunduğu göz önüne alınırsa, bu yöntemin kullanım potansiyelinin yüksek olduğu görülür. Örneğin savunma ve havacılık alanında yeni geliştirilen bir takım özgün ürünlerin denenmesi için ihtiyaç duyulan test platform ihtiyacının nispeten eski hava araçları ile karşılanması, pratik bir yol olup, bunların bakım ve idamesinde de aditif imalat ile üretilen parçalar kolaylık sağlayacaktır. TUSAŞ'ta böyle bir test platformuna başarıyla dönüştürülen S2-E deniz karakol uçağının idamesi buna bir örnek olabilir.

Savunma ve havacılık alanında birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de bu teknolojiye gereken önemin verilmesi, özellikle teknolojik hazırlık düzeyini yükseltecek AR-GE projelerinin daha çok desteklenmesi ve prosese yönelik tasarımcı, teknisyen gibi kadroları yetiştirmek için eğitimlerin düzenlenmesi önemlidir.

## 6. SONUÇ

'Endüstri 4' adı altında yeni bir sanayi devriminin konuşulduğu günümüzde bakım, onarım ve revizyon (MRO) açısından da yeni yaklaşımların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bakım için tasarım, kendi kendini iyileştiren malzemeler, kaplamalar, kompozit tamirleri, aviyonik yazılımları ve ileri imalat yöntemleri bunlardan bazılarıdır. Bu kapsamda değerlendirilen ve tasarım ile imalata farklı bir yaklaşım sergileyen aditif imalatın bakım/idame açısından dünyadaki durumu gelişmekte, mevcut teknolojik ve ekonomik sınırlamalar her gün biraz daha azalmaktadır. Bu gelişmiş teknoloji sadece istendiği yerde ve zamanda parça imalatını mümkün kılmakla kalmayıp, özel beceri gereksinimini de büyük oranda ortadan kaldıracaktır. O nedenle, belirli bakım senaryoları için verimli ve kabul edilebilir çözümler sunacak ve şirketlerin bakım yapma ve tedarikçi konusunda yerleşik iş yapış şekillerinden kolay vazgeçmek istememelerine rağmen bakım, onarım ve revizyon kavramını yeniden şekillendirecektir.

Ancak halen aşılması gereken engeller vardır. Bunlardan en

kritik olanı kalifikasyon ve sertifikasyondur. Kalite ve tekrarlanabilirlik, malzemelerin özellikleri ve maliyet de şu an için dezavantaj yaratan hususlardır.

Barındırdığı yüksek teknoloji nedeniyle her zaman için diğer sektörler için yol gösteren savunma ve havacılık sanayi, aditif imalatı prototip, takıp, kalıp ve nihai ürün üretmek amacıyla kullanan ilk sektörlerden olup, bütün zorluklara rağmen bakım ve onarım alanında da bu teknolojiyi sürüklemesi sürpriz olmayacaktır.

## KAYNAKÇA

1. <http://genelhavacilik.blogspot.com/2011/08/01/>, son erişim tarihi: 04.03.2015.
2. Aviation Week, December 9, 2013, p.12,
3. <http://ataibaviationservice.co.uk>, son erişim tarihi: 04.03.2015.
4. ASTM F2792-12A, 2013. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
5. Roadmap for Additive Manufacturing Identifying the Future of Freeform Processing, 2009, p.30
6. <http://www.additivemanufacturing-summit.com>, son erişim tarihi: 05.04.2015.
7. Gausemeier, J. Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing, Analysis of Promising Industries, Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn Product Engineering, Paderborn, p.14
8. Qian, Ma., Froes, F. H. 2015. Titanium Powder Metallurgy, 978-0-12-800054-0, Elsevier Inc., Waltham, USA
9. <http://www.optomec.com>, son erişim tarihi: 04.03.2015.
10. Aviation Week. 31 March 2014, 2014, p.18
11. Dutta, B., Robles, J. C., Giglio, J. 2015. Manufacturing and Remanufacturing of Aerospace Components with Direct Metal Deposition (DMD), Long Beach, Rapid.
12. Efesto Druckt Metal Bis Über 2 m Höhe, <http://3druck.com>, son erişim tarihi: 04.03.2015.

## DEĞERLİ ÜYELERİMİZE

**Bugün, her zamankinden daha fazla siz değerli üyelerimizin örgütlü gücüne ihtiyaç duymaktayız.**

İktidarın, kamusal denetimi geriletken uygulamaları, halkın can güvenliğini ortadan kaldırmakla birlikte, Odamızın hizmet alanlarının daralmasına da yol açmaktadır.

Bütün ekonomik zorluklara rağmen, bilimsel gerçeklikler ışığında, mühendislik uygulamalarının önemini ortaya koyan raporlar yayınlama; mesleğimizi geliştirmeye ve toplumu bilinçlendirmeye yönelik bülten, dergi, kitap, broşür vb. yayın çalışmalarımızı sürdürme kararlılığımızdır.

Bu nedenle sizlere ve halkımıza verdiğimiz hizmetlerin yanında çok temsili kaldığına inandığımız üyelik aidatlarının ödenmesi konusunda katkılarınızı bekliyoruz.

<https://aidat.mmo.org.tr>