

Havacılık Komponentlerinin Bakım Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanımı

Özgür Poyraz ^{*1}

Melih Cemal Kuşhan ²

ÖZ

Havacılık alanında yapılan bakım operasyonları her türlü hava platformu ile bu platformlara ait alt sistemler ve komponentler için sıklıkla uygulanmaktadır. Komponent maliyetlerinin yüksek olduğu hava platformları için eski komponentlerin yenileri ile değişimi yerine tamir edilmesi, havacılık firmalarının tercih ettiği seçeneklerin başında gelir. Komponentlerin tamir döngüsü içerisinde aşınmış bölgenin muayene ile tespiti, aşınmaların yeni malzeme veya kaplamalar ile doldurulması ve final geometriyi sağlamaya yönelik yeniden işleme süreçleri yer almaktadır. Bu süreçler arasından yeni malzeme ile doldurulma adımı için geçmiş yıllarda kaynak uygulamalarından faydalanılmıştır. Bununla beraber, gelişmekte olan katmanlı (eklemeli) imalat teknolojileri gün geçtikçe kaynağın yerini almaktadır. Bu durumun sebepleri arasında, katmanlı imalatın kaynağa göre daha esnek olması, malzemeye daha düşük ısı girdisi oluşturması, dolgu sonrası daha iyi malzeme ve yüzey özellikleri elde edilmesi vardır. Bu çalışmada, pek çok avantaj sağlayan ve önemi gün geçtikçe artan katmanlı imalat teknolojilerinin bakım uygulamalarında kullanımı hakkında bilgiler aktarılmakta ve ülkemizdeki ilgili endüstriyel-akademik kurumlar ve çalışanlar açısından farkındalık yaratılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bakım, havacılık, katmanlı imalat, lazerle yığıma

The Use of Additive Manufacturing Technologies in Maintenance Applications of Aviation Components

ABSTRACT

Maintenance operations carried out in the field of aviation are frequently applied to all kinds of air platforms, subsystems and components belonging to these platforms. For air platforms with high component costs, repairing old components instead of replacing them with the new ones is one of the preferred options for aviation companies. The repair cycle of the components includes the inspection of the worn area, the addition of the new materials and/or coatings to the abraded parts and re-machining of the component to ensure final geometry. In the previous years, welding processes have been utilized for adding the new materials to the components. Along with this, developing additive manufacturing technologies take the place of welding process day by day. This is due to the fact that additive manufacturing is more flexible comparing to welding, it inputs lower heat to the material, and it presents better material and surface properties. This publication provides information on the use of additive manufacturing technologies, which have many advantages and which are becoming increasingly important, in maintenance applications. This publication also aims to raise awareness of the relevant industrial-academic institutions and employees in our country about additive manufacturing.

Keywords: Repair, aviation, additive manufacturing, laser metal deposition

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 23.10.2017

Kabul/Accepted : 10.02.2018

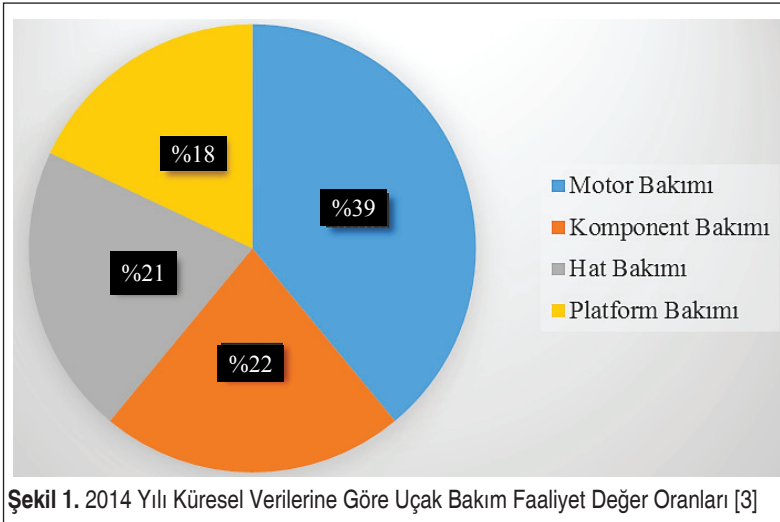
¹ TEI Tusaş Motor Sanayii A.Ş., Esentepe Mahallesi Çevreyolu Bulvarı No:356, Eskişehir - ozgur.poyraz@tei.com.tr

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Mühendislik-Mimarlık Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, Eskişehir - erzesk@gmail.com

1. GİRİŞ

Bakım en genel anlamda canlı veya cansız bütün varlıkların ve cisimlerin iyi durumlarının korunması ve devamının sağlanması ile ilgili tedbir ve faaliyetlerinin sürekli olarak yerine getirilmesi işlemidir. Makine, teçhizat ve üretim sistemlerine bakıldığında ise bakım, tüm üretim sistemini veya belirli donanımı faal durumda bulundurmak için yapılan faaliyetleri tanımlamak için kullanılmaktadır [1]. Bu faaliyetler arasında kontrol, durum tespiti, onarım, yenileme ve modifikasyon gibi pek çok aşama yer almaktadır.

İnsanları ve kargo yüklerini kilometrelerce uzağa güvenli bir şekilde taşıması gereken hava araçları bakımının temel amacı ise uçağın operatöre tesliminden sonra da güvenilirlik ve performansını belirtilen tasarım limitleri içinde tutmaktır. Özellikle güvenilirlik ve uçuş emniyeti gibi kritik hedefleri sağlaması gereken bakım uygulamaları için detaylı ve özenli olarak hazırlanmış talimatların dikkatli bir şekilde takip edilmesi gerekmektedir. Uçak bakımları periyodik ve periyodik olmayan bakımlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Koruma bakımı olarak da adlandırılabilir periyodik bakımlar uçak üreticisine göre değişim göstermekle beraber günlük, haftalık, 300/400 uçuş saatlik (A Bakım), 3000/4000 uçuş saatlik (B / C Bakım) ve 5 yıllık aralıklarla yapılmaktadır [2]. Bakıma alınan uçaklar üzerinde gerçekleştirilen temel işlemler sırası ile dış temizlik, uçağın hangar içindeki bakım dokuna alınması, gerekli kontrol kapaklarının açılması, gözle kontrol veya tahribatsız muayene işlemlerinin gerçekleştirilmesi, uygunsuzlukların kaydedilmesi ve raporlanması, tespit edilen uygunsuzlukların giderilmesi ve tekrar kontrol edilerek onaylanması, ayar işlemleri, testler ve gerekiyorsa test uçuşudur. Aktarılan bakım periyodları ve işlem sıralarına göre, 300/400 uçuş sa-





atlık bakımda platforma ait komponentler ve 3000/4000 uçuş saatlik bakımda motor ve motor komponentleri için söz konusu işlemler gerçekleştirilir. Bu iki işlem Şekil 1'de görüldüğü gibi, uçak bakım faaliyet alanlarında en yüksek maliyete sahip iki alanı oluşturmaktadır.

Havayolu işletmelerinin rekabet gücünün artırması için işletme maliyetlerini ve bunların ana sebeplerinden bir tanesi olan bakım giderlerini azaltması gerekmektedir. Bu kapsamda değerlendirilen bakım maliyetleri açısından ise motor ve komponent bakımı en yüksek iki değer oranını oluşturmaktadır. Bu faaliyetler kapsamında eskimiş ve/veya ömrünü doldurmuş komponent veya motor komponentlerinin yenisi ile değiştirilmesi, parça satış fiyatları çok yüksek olan havacılık komponentleri açısından uygun bir yöntem değildir. Bu sebeplerle havacılık ve havacılık bakım firmaları son yıllarda komponentlerin yenisi ile değiştirilmesi yerine, onarılması üzerinde çalışmalar yapmaktadır [4].

Bu çalışmada, aktarılan bakım ihtiyaçları doğrultusunda, havacılık komponentlerinin bakım ve onarım uygulamalarında kullanılan teknolojilere yer verilmektedir. İlk bölümde, komponent onarımı için kullanılan farklı teknikler anlatılmakta ve sonraki bölümlerde sırası ile komponent onarımlarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı açıklanmaktadır. Bu konuda yapılacak çalışmalar için potansiyel ihtiyaçlara dikkat çekilmekte ve ileri seviye araştırma ihtiyaçları vurgulanarak çalışma sonuçlandırılmaktadır.

2. HAVACILIK KOMPONENTLERİNİN ONARIMINDA FARKLI TEKNİKLERE GENEL BAKIŞ

Havacılık komponentleri için gerçekleştirilen onarım faaliyetleri kompozit ve metal olmak üzere iki ana malzeme grubu için ayrılmış olsa da faaliyetlerin büyük çoğunluğu metal malzemeli parça onarımları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durumun temel sebebi, metal malzemelerin daha zor koşullar ve ağır yükler altında çalışan parçalarda kullanılması ve bu nedenle bu parçaların onarım ihtiyacının daha sık ortaya çıkmasıdır. Bu doğrultuda hava araçlarında çoğunlukla motorlarda ve güç ünitelerinde kullanılmakta olan metal komponentlerin çalışma koşullarına örnek vermek gerekirse, yüksek seviyede merkez kaç kuvvetleri, yüksek sıcaklık, yüksek basınçlı gaz akışlarına maruz kalma, yanma sonucu oluşabilecek kimyasal etkileşimler ve yabancı madde hasarı sıralanabilir. Aktarılan bu çalışma koşullarına maruz kalan komponentlerde akma, sürünme, yorulma, kırılma, aşınma ve korozyon gibi farklı hatalar ortaya çıkabilmektedir [5].

Çalışma sonrası hataların görüldüğü komponentlerin onarımı için mümkün olduğu durumlarda farklı teknikler uygulanmakla beraber, izlenmesi gereken temel süreç

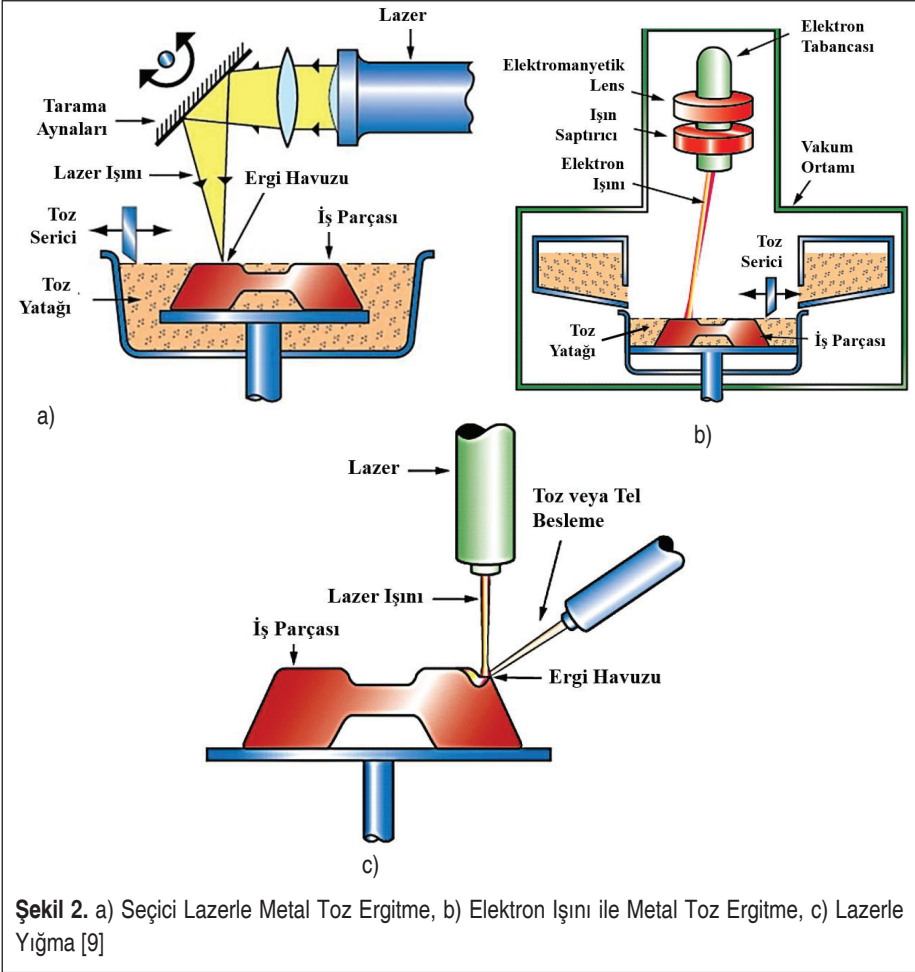
adımları benzerdir. Bu süreç sırası ile komponent sökümü, muayene, hatalı bölgenin belirlenmesi, onarımın planlanması, belirlenen hatalı bölgenin kaldırılması, kaldırılan parça malzemesi ve/veya kaplama yerine yenisinin eklenmesi, komponentin nihai ölçüye getirilmesi, son muayene ve montaj adımlarını içermektedir. Sıralanan adımlar dahilinde yapılacak işlemler için günümüze kadar farklı teknolojiler kullanılmıştır. Kullanılan bu teknolojiler arasında kaynak, sert lehimleme, metal sprej, kaplama, talaşlı işleme, titreşimli işleme, bilye ile dövme ve boyama gibi pek çok yöntem bulunmaktadır [6, 7].

Sıralanan bu yöntemlerin olgunluk seviyeleri yüksek olmakla beraber, ortaya çıkan bazı dezavantajlar sebebi ile yeni yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. Bu kapsamda komponentlerin hatalı bölgelerine yeniden malzeme eklenmesi için kullanılan kaynak, sert lehimleme ve metal sprej proseslerine alternatif arayışlar sürmektedir. Yapılan araştırmalarda hem yeni eklenecek malzemenin aslına uygun olması hem de oluşacak geometrinin nihai duruma yakın inşa edilmesi ile işleme gereksinimlerinin en düşük seviyeye indirilmesi hedeflenmektedir. Bu ihtiyaca yönelik olarak, en yaygın kullanılan teknolojilerden bir tanesi katmanlı imalat teknolojisi olup, onarım faaliyetlerinde kullanımı günden güne yaygınlaşmaktadır.

3. METALLERİN KATMANLI İMALATI

Katmanlı imalat, konvansiyonel imalat teknolojilerine göre oldukça yeni teknolojilerden oluşmasından dolayı, bu konuda ortaya koyulan ilk standartlar temel terminoloji üzerindedir. Bunlardan biri olan ASTM F2792.429494 -1 standardına göre katmanlı imalat, nesnelere 3B (3 boyutlu) model verisinden, genelde üst üste dizilen katmanlar halinde malzemelerin birleştirilerek oluşturulduğu bir imalat yöntemidir. Benzer şekilde, VDI 3404 Katmanlı İmalat Terminolojisi Standardı'nda tanımlandığı haliyle, iş parçasının birbirini takip eden katmanlar veya birimlerle inşa edildiği üretim prosesine katmanlı imalat denilmektedir [8]. Katmanlı imalat teknolojileri oldukça geniş bir proses grubunu içermekle beraber, metal malzemelerde kullanılan ve doğrudan bir parçayı veya parçanın bir bölgesini üretmeye yarayan üç temel proses mevcuttur. Bunlar sırası ile seçici lazerle metal toz eritme (Selective Laser Melting), elektron ışını ile metal toz eritme (Electron Beam Melting) ve lazerle yığıma (Laser Cladding) prosesleridir. Söz konusu proseslerin temel prensipleri Şekil 2'de ve karşılaştırmaları Tablo 1'de verilmektedir.

Farklı proseslerin karşılaştırması değerlendirildiğinde, inşa hızı olarak elektron ışını ile eritme ve lazer yığıma proseslerinin daha hızlı olduğu görülmektedir. Bunun yanında, boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi açısından lazerle metal toz eritmenin daha hassas sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Malzeme çeşitliliği açısından ise lazerle metal toz eritme ve lazer yığıma prosesleri daha çok seçenek sunmaktadır.



Tablo 1. Katmanlı İmalatta Kullanılan Metallerin Temel Proses ve Özellikleri

PROSES	Malzeme Ekleme	Enerji Girdisi	İnşa Hızı (cm ³ /saat)	Boyutsal Doğruluk (mm)	Yüzey Kalitesi (µm)	Uygun Malzemeler
Lazerle Metal Toz Ergitme	Toz Yatağı	Lazer Işını	7-70 [10]	0,1 – 0,2 [10]	Ra 11 [10]	Al, Co, Fe, Ni, Ti [11]
Elektron Işını ile Ergitme	Toz Yatağı	Elektron Işını	55-80 [10]	0,4 [10]	Ra 25-35 [10]	Fe, Ni, Ti [11]
Lazerle Yığıma	Biriktirme	Lazer Işını	10-70 [10]	0,3 [10]	Ra 10-25 [10]	Al, Co, Fe, Ni, Ti [11]

Havacılık komponentlerinin onarımı açısından bakıldığında, farklı malzemeden parçaların onarılabilmesi için malzeme çeşitliliğın fazla olması temel gereksinimdir. Bunun yanında, onarım sürelerinin uzun olmasının istenmemesi sebebi ile inşa hızının yüksek olması da tercih sebepleri arasında yer alır. Diğer taraftan boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesinin iyiliğı temel gereksinimler arasında yer almamaktadır. Bu durumun temel sebebi de onarılan komponentlerin çoğunlukla nihai ölçüye getirilmesi için talaşlı imalat ve benzeri tekniklerin kullanılmasıdır.

Bakım - onarım açısından yapılacak bir değerlendirmede en önemli hususlardan bir tanesi de prosesin gerçekleşme prensibidir. Bu kapsamda, toz yatağı içerisinde gerçekleştirilen katmanlı imalat prosesleri onarılan parçanın toz yatağı içerisinde hizalanması açısından zorluk oluşturacağından, yığıma prensibi kullanılan prosesler onarım faaliyetleri açısından daha yaygın kullanılmaktadır.

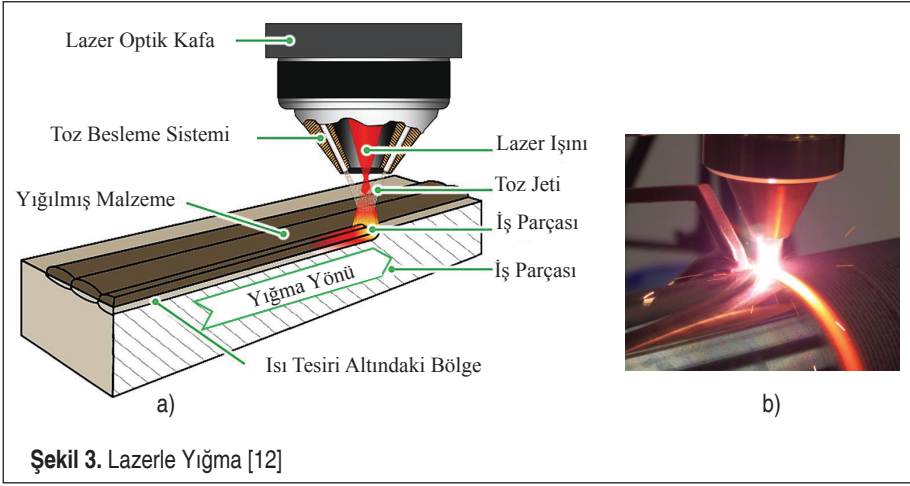
3.1 Lazerle Yığıma

Metallerin katmanlı imalatı arasında onarım açısından avantajlı olarak değerlendirilen lazerle yığıma prosesinin detaylı olarak incelenmesi faydalı olacaktır. İngilizce literatürde Laser Cladding olarak geçen proses, lazer sistemi üreticilerinin verdiği farklı ticari isimler (Laser Metal Deposition, Direct Metal Deposition, Direct Energy Deposition, Laser Engineered Net Shaping) ile de karşımıza çıkmaktadır.

Lazerle yığıma en basit ifadeyle, yüksek güçte bir lazerin etkilediğı toz halindeki metal malzemenin öncelikle ergimesi ve sonra katılaşması sayesinde komponentlerin imal edildiğı prosese verilen isimdir (Şekil 3).

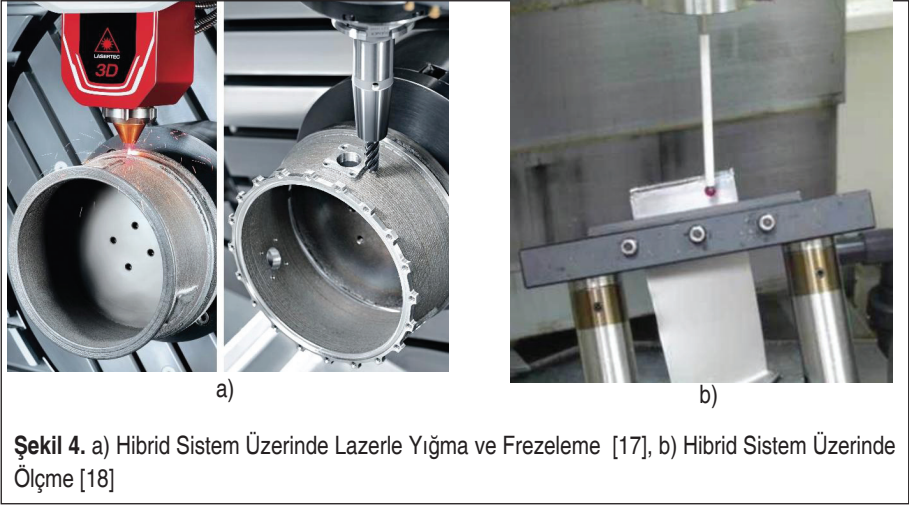
Lazerle yığıma prosesinde, farklı kinematik konfigürasyonlara sahip tezgahlar aksel hareketler yardımı ile yığıma kafasını taşımaktadır. Lazer yığıma yönü boyunca hareket edebilen yığıma kafası ise kendi içerisinde lazer optik kafa ile lazer ışınını yönlendirmekte ve toz besleme sistemi sayesinde de ergimesi hedeflenen tozları bir jet halinde püskürtmektedir. Yığıma kafası, temel ihtiyaç olan lazer ve toz metal malzemeyi sağlama dışında, koruyucu atmosfer olarak görev yapan asal gazın ortama verilmesini de üstlenmektedir. Önemli parametreleri arasında lazer gücü, lazer ışını odak çapı, lazer tarama hızı ve toz besleme hızı bulunan lazerle yığıma prosesinde, tamir sonrası kullanıma uygun seviyede mekanik ve metalürjik özelliklerin elde edildiğı literatürde raporlanmaktadır [13, 14].

Bununla beraber, lazerle yığıma yönteminde de diğer tüm katmanlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi geometrik unsurlar, boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi için ikincil işlem ihtiyacı bulunmaktadır. Bu durumun temel sebebi, katmanlı imalat proseslerinin doğasından gelen ve İngilizce literatürde Stair Step-



Şekil 3. Lazerle Yığıma [12]

ping Effect olarak geçen merdiven etkisidir. Bu etki üst üste gelen katmanlara ait dış konturlardaki tarama izlerinin ergime-katılma sonrası aralarında boşluk kalması ve merdivene benzer bir görünüm oluşturması ile ortaya çıkmaktadır [15]. Bu etkinin ortaya çıkması ile parça geometrisinde form hataları ve yüksek seviyede yüzey pürüzlülüğü görülmektedir. Lazerle yığıma prosesinin, diğer metal katmanlı imalat proseslerine kıyasla aksel hareketli makinelerde yapılması sayesinde bu durumun üstesinden gelinmektedir. Yani, bu durumun üstesinden gelmesi için lazerle yığıma tabanlı hibrid tezgahlar geliştirilmiştir. Katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemlerinde temel ilke parçanın malzeme eklenerek oluşturulması ve sonrasında talaşlı imalat vasıtası ile parça kalitesinin hem boyutsal toleranslar hem de yüzey özellikleri anlamında iyileştirilmesine dayanmaktadır [8]. Bu sistemler genellikle katmanlı imalat süreci için yığıma ve talaşlı imalat süreci için frezeleme olarak tercih edilmektedir [16]. Bu tip sistemlerde lazerle yığıma kafasının standart bir konik arayüz ile freze tezgahlarına bağlanması sağlanmakta ve bu sayede katmanlı imalat sırasında çağrılan modüler lazerle yığıma kafası, yüzey iyileştirmeye geçildiğinde freze iş mili ile kolayca değiştirilebilmektedir (Şekil 4a). Aynı zamanda bu ve benzeri sistemlerde standart konik arayüze dokunmalı, optik veya lazerli ölçüm ekipmanları da ilave edilebilmekte ve bu unsur sayesinde özellikle tamir ve bakım uygulamalarında avantajlar elde edilebilmektedir. Bu avantajlar arasında sayılabilecek en önemlileri çalışma ve servis ömrü boyunca deforme olarak şekil değiştirmiş parçaların güncel durumlarının tespit edilmesi ve tamir uygulamaları için gerekli yığıma/takım yollarının güncel geometriye göre adaptif olarak oluşturulabilmesidir (Şekil 4b).



4. HAVACILIK KOMPONENTLERİNİN BAKIM VE TAMİRİ İÇİN KATMANLI İMALAT UYGULAMALARI

Havacılık komponentleri için gerçekleştirilen bakım ve tamir faaliyetlerinin büyük çoğunluğu metal malzemeli parça onarımları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durumun temel sebebi, metal malzemelerin daha zor koşullar ve ağır yükler altında çalışan parçalarda kullanılması ve bu nedenle bu parçaların onarım ihtiyacının daha sık ortaya çıkmasıdır. Bu doğrultuda hava araçlarında çoğunlukla motorlarda ve güç ünitelerinde kullanılmakta olan metal komponentler katmanlı imalat uygulamaları ile tamir edilmektedir.

Gerek akademik literatür ve gerekse sektörel raporlarda katmanlı imalat ile tamir uygulaması olan havacılık motor komponentleri arasında türbin paleleri, statorlar, nozül kılavuz kanatçıkları (NGV), yakıt püskürtücüler, yakıt enjektörleri, soğutucu hava diskleri, fan milleri ve sızdırmazlık elemanları gibi pek çok komponent bulunmaktadır. Günümüz teknolojik altyapısı kullanılarak tamir edilebilen metal komponent malzemeleri arasında ise Ti-6Al-4V, Inconel 718, Inconel 625, Co-Cr ve çelik alaşımları bulunmaktadır. Şekil 5'te, katmanlı imalat ile tamir uygulaması olan havacılık motor komponentlerinden bazı örnekler sunulmaktadır.

Günümüzde katmanlı imalat ile tamir uygulamaları konusunda faaliyet ve araştırma yürüten küresel ölçekli kuruluşlar arasında General Electric, Rolls Royce, Pratt & Whitney, MTU ve Avio bulunmaktadır. Bununla beraber, ülkemizden de TEI, Tusaş Motor Sanayi A.Ş. TEYDEB projesi kapsamında kompresör palelerinin tamiri için çalışma ve araştırmalar gerçekleştirmiştir [5].



Şekil 5. Katmanlı İmalat Teknolojileri İle Tamiri Yapılan Komponent Örnekleri [19 - 23]

5. SONUÇ

Metal malzemeler için katmanlı imalat teknolojileri sağladıkları farklı avantajlar sebebi ile tasarım ve üretimde tercih edilir hale gelmekte ve konu ile ilgili araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Söz konusu katmanlı imalat prosesinin tasarım ve üretim yanında bakım ve tamir açısından avantajları da bulunmaktadır. Bu avantajlar arasından aşınmış bölgelere katmanlı imalat ile yeni eklenen malzemelerin hem metalürjik hem de mekanik özelliklerinin gerçek parça malzemesine benzer olması en önemlisidir. Bununla beraber, havacılık motor komponentlerine ait alaşımlar katmanlı imalat malzeme yelpazesinde de bulunmaktadır.

Metal malzemeler için katmanlı imalat teknolojileri arasında lazerle yığma prosesi toz yatağı içinde olmaması, farklı aksenal hareketler sayesinde karmaşık geometrilere uygulanabilmesi ve yüksek inşa hızları sebebi ile tamir işlemlerinde tercih edilir hale gelmiştir. Prosesin ek avantajları arasında, değiştirilebilir lazer yığma kafalarının taşlı imalat tezgahlarına entegrasyonu ve bu sayede katmanlı imalat ile taşlı imalatın hibrid olarak kullanılma imkanı bulunmaktadır. Bu imkan sayesinde malzeme ekleme ve tekrar işleme aynı istasyonda yapılarak, ardışık parça bağlama sebepli hassasiyet riskleri en aza indirgenmekte ve ek süre harcamaları ortadan kalkmaktadır.

Lazerle yığma yöntemi ile tamiri gerçekleştirilen havacılık motor komponentleri arasında türbin paleleri, statorlar, nozül kılavuz kanatçıkları (NGV), yakıt püskürtücüler, yakıt enjektörleri, soğutucu hava diskleri, fan milleri ve sızdırmazlık elemanları gibi pek çok komponent bulunmaktadır. Söz konusu komponentler için titanyum, nikel,

kobalt-krom ve çelik esaslı pek çok alaşımın katmanlı imalat ile tamiri mümkün olmaktadır. Lazerle yığma ile katmanlı imalat yönteminin sunduğu avantajlar, komponent ve malzeme çeşitliliği sayesinde hem dünyada hem de ülkemizde sıklıkla araştırılan konular arasında yerini korumaya devam etmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Turan, B.** 2016. “Bakım Onarım ve Bakım Planlaması,” http://web.bilecik.edu.tr/bulent-turan/files/2016/03/bakim_onarim.pdf, son erişim tarihi: 14.05.2017.
2. **Kuşhan, M. C.** 2003. “Ülkemizde Uçak Bakım Mühendisliği,” Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi, 16 Ekim 2003, Denizli.
3. **Behal, R.** 2016. “Indian Aircraft Maintenance, Rep Air & Overhaul (MRO) Market,” <http://www.defproac.com/?p=1438>, son erişim tarihi: 15.06.2017.
4. **Gao, J., Chen, X., Yılmaz, O., Gindy, N.** 2008. “An Integrated Adaptive Repair Solution for Complex Aerospace Components Through Geometry Reconstruction,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, no. 11, p. 1170-1179.
5. **Poyraz, Ö., Yılmaz, O., Yasa, E.** 2014. “Investigation of Free-Form Surface Reconstruction Techniques for Reverse Engineering of Worn-Out Gas Turbine Blades: A Case Study,” *The 16th International Conference on Machine Design and Production*, 30 June 2014, İzmir.
6. **Kumar, R., Patil, B.** 2014. *Aftermarket Services - Overview Of Repair Engineering*, QuEST Global Services.
7. **Diltemiz, F. S., Kuşhan, M. C., Üzgür, S., Uzunonat, Y.** 2012. “Gaz Türbinlerinin Bakımında Sıcak Kısım Parçalarına Uygulanan Sıcak Lehimleme (Brazing) Tamir İşlemi ve Proses Etkinliğinin Değerlendirilmesi,” *Mühendis ve Makina*, cilt. 53, sayı. 633, s. 13-15.
8. **Poyraz, Ö., Yasa, E., Pilatin, S.** 2015. “Katmanlı İmalat ve Talaşlı İmalatın Birlikte Uygulandığı Melez Üretim Sistemleri Üzerine,” *6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 5 Kasım 2015, İstanbul.
9. **Wahlström, T., Sahlström, J.** 2016. “Additive Manufacturing in Production,” Master Thesis, Lund University, Lund, Sweden.
10. **Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F.** 2012. “Metallic Additive Manufacturing: State-of-the-Art Review and Prospects,” *Mechanics & Industry*, vol. 13, no. 2, p. 89-96.
11. LPW Technology. 2016. “Powder Range,” http://www.lpwtechnology.com/wp-content/uploads/2016/11/LPW_Powders_Brochure-Nov-2016.pdf, son erişim tarihi: 01.06.2017.
12. Flame Spray Technologies BV. 2017. “About Laser Cladding,” <https://www.fst.nl/about/laser-cladding/>, son erişim tarihi: 01.06.2017.



13. **Kumar, L. J., Nair, G. K.** 2017. "Laser Metal Deposition Repair Applications for Ti-6Al-4V Alloy," *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*, vol 7.
14. **Petrat, T., Graf, B., Gumenyuk, A., Rethmeier, M.** 2016. "Laser Metal Deposition as Repair Technology for a Gas Turbine Burner Made of Inconel 718," *Physics Procedia*, vol. 83, p. 761-768.
15. **Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., Evans, K. E.** 2013. "Surface Roughness Analysis, Modelling and Prediction in Selective Laser Melting," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 4, p. 589-597.
16. **Hur, J., Lee, K., Kim, J.** 2002. "Hybrid Rapid Prototyping System Using Machining and Deposition," *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 10, p. 741-754.
17. **Fabricating and Metal Working.** 2017. "Hybrid Machine Tools," <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2017/02/hybrid-machine-tools/>, son erişim tarihi: 10.07.2017.
18. **Jones, J. B., McNutt, P., Tosi, R., Perry, C., Wimpenny, D. I.** 2012. "Remanufacture of Turbine Blades by Laser Cladding, Machining and in-Process Scanning in a Single Machine," *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 6-8 August 2012, Austin, Texas, USA.
19. **TTL Solutions.** 2017. "Adaptive Machining," <http://www.ttl-solutions.com/en-GB/our-services/adaptive-machining/>, son erişim tarihi: 20.07.2017.
20. **Mudge, R. P., Wald, N. R.** 2007. "Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair," http://rpm-innovations.com/download/lens_advances_manufacturing_and_repair.pdf, son erişim tarihi:15.06.2017.
21. **Xue, L., Prociw, A., Wang, S. H., Chen, J., Li, Y.** 2009. "Laser cladding of IN-625 for Repairing Fuel Nozzles for Gas Turbine Engines," In *Proceedings of the 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics (ICALEO 2009)*.
22. **Xue, L., Donovan, M., Li, Y., Chen, J., Wang, S., Campbell, G.** 2013. "Integrated Rapid 3D Mapping and Laser Additive Repair of Gas Turbine Engine Components," In *2013 ICALEO Conference Proceedings*, p. 318-325.
23. **Thomaidis, D., Arjakine, N. O., Bostanjoglo, G.** 2012. "Laser Metal Deposition for Maintenance, Repair and Overhaul at Siemens Fossil Power Generation," https://fabricationmecanique.files.wordpress.com/2012/10/eu_ott_michael.pdf, son erişim tarihi: 01.06.2017.