



Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Havacılıktaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme

Dilara Selma Aydın¹

¹ Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Uçakların yapısal parçaları dövme, döküm, tormalama gibi geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Ancak, geleneksel imalat yöntemlerinin getirdiği bazı kısıtlamalar da mevcuttur. Bu kısıtlamaları ortadan kaldırmak için kullanılan alternatif imalat yöntemlerinden biri de eklemeli imalat yöntemidir. Özellikle, havacılık gibi, karmaşık geometrilili, ölçü hassasiyeti yüksek ve hafif komponentlerin hızlı bir şekilde üretilmesinin istendiği kritik sektörlerde önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemi sayesinde zor ve maliyetli parçaların üretimi daha kolay yapılabilmektedir. Ayrıca, tasarım esnekliği ve karmaşık geometrilili parçaların üretilmesi noktasında büyük faydalar sağlamaktadır. Bu çalışmada, dünyada ve Türkiye’de Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalat yöntemiyle üretildiği çalışmalar incelenmiş ve sonuçlarına ait bilgiler verilmiştir.

A Review on Aviation Applications of Ti6Al4V Alloy Produced by Additive Manufacturing Method

ABSTRACT

Structural parts of aircraft are produced using traditional manufacturing methods such as forging, casting and turning. However, there are some limitations imposed by traditional manufacturing methods. One of the alternative manufacturing methods used to eliminate these restrictions is the additive manufacturing method. Particularly, its importance is better understood in critical sectors such as aviation, where it is desired to quickly produce components with complex geometry, high measurement precision and light weight. Thanks to the additive manufacturing method, the production of difficult and costly parts can be made easier. In addition, it provides great benefits in terms of design flexibility and production of parts with complex geometries. In this study, studies in which Ti6Al4V alloy is produced by additive manufacturing method in the world and in Turkey are examined and information about the results is given.

Alınma
27 Şubat 2022
Düzeltilme
05 Nisan 2022
Kabul
24 Mayıs 2022

* Dilara Selma Aydın.
e-mail: dilaraa801@gmail.com

Anahtar Kelimeler:

- Eklemeli imalat
- Havacılık
- Seçici lazer ergitme
- Lazer tozu yatak füzyonu
- Ti6Al4V

Received
27 February 2022
Revised
05 April 2022
Accepted
24 May 2022

* Dilara Selma Aydın.
e-mail: dilaraa801@gmail.com

Keywords:

- Additive manufacturing
- Aerospace
- Selective laser melting
- Laser powder bed fusion
- Ti6Al4V

1. Giriş (Introduction)

Teknoloji zamana bağlı olarak sürekli ilerleyen bir olgudur. Buna bağlı olarak yeni gelişmeler ortaya çıkmaktadır. Bu durum, İmalat endüstrisi için de bu şekildedir. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretimin kısıtlandığı ya da yetersiz kaldığı durumlar eklemeli imalat yönteminin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Eklemeli imalat, geleneksel imalattaki talaş kaldırma yönteminin aksine malzemeleri katmanlar halinde birleştirerek üç boyutlu parçaların üretilmesine imkân sağlayan modern bir imalat yöntemidir (Çelik ve diğerleri, 2017; Özsolak, 2019; Poyraz, 2018). Eklemeli imalatın hızla ilerlemesinde teknolojik alanda yaşanan gelişmelerin yanı sıra, yöntemin sunduğu avantajlar da önemli bir etkiye sahiptir. Bu avantajlar arasında, istenen ürün üst üste biriktirilerek elde edildiğinden dolayı çok az ya da sıfır atık malzeme ile üretim yapılmaktadır. Tasarım açısından bakıldığında karmaşık geometrili parçaların üretilmesi, tasarım güncelleme süreçlerini kolaylaştırması ve daha az takım-kalıp gibi ekipmanlar kullanılarak parçanın üretilmesine imkân sağlamaktadır. Dolayısıyla, birçok ürünün imalatında montaj gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. Boşluklu üretim imkanı sunması nedeniyle hafif yapıların üretimine olanak sağlaması gibi pek çok avantaj sunmaktadır (Koç, 2021; Poyraz, 2018; Poyraz ve Kuşhan, 2018). Eklemeli İmalat, üretimde insana bağlı oluşan hataları en aza indirmek ve üretim verimliliğini arttırmak gibi amaçlarla pek çok sektörde ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Eklemeli imalat yönteminde polimer esaslı malzemeler, paslanmaz çelik, plastik, takım çeliği, titanyum ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, nikel ve alaşımları ve karbür metal tozları kullanılması ile uygulama alanı farklı sektörlerde yayılmıştır. Buna bağlı olarak, havacılık ve uzay, otomotiv, medikal, mimari, sanat, eğitim ve gıda sektörlerinde kullanım yoğunluğu sürekli artmaktadır. Havacılık endüstrisinde, özellikle operasyon zamanlarının azaltılmasında, üretim maliyetlerinin düşürülmesinde kullanılmaktadır. Havacılıkta büyük önem arz eden ağırlık faktörü konusunda da iyileştirici fırsatlar sunmaktadır. Geleceğin en önemli üretim yöntemleri arasında yer alan eklemeli imalat, sivil havacılık yanında askeri havacılık ve savunma sanayinde de ön plana çıkmaktadır (Blakey-Milner ve diğerleri, 2021; Erener ve diğerleri, 2021; Sürmen, 2019; Y.-C. Wang ve diğerleri, 2019). Bu sektörlerde yoğun olarak kullanılan ve eklemeli imalat uygulamalarının en çok başvurduğu malzemelerden biri de Ti6Al4V alaşımıdır.

Havacılık ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı, yüksek özgül mukavemet değeri, yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluğu, yüksek kırılma tokluğu nedeniyle uygulamalarda en çok çalışılan alaşım olmuştur (Chern ve diğerleri, 2019). Ti6Al4V alaşımı başlangıçta 1950'lerde uçak yapısal parçaları için geliştirilmiştir. Havacılık ve uzay endüstrisinin yanı sıra denizcilik, kimya, otomobil, enerji ve biyomedikal gibi diğer sektörlerde de uygulama alanları mevcuttur. Yüksek talebe rağmen, Ti64 alaşımının düşük işlenebilirliği, zayıf termal iletkenliği, düşük elastisite modülü,

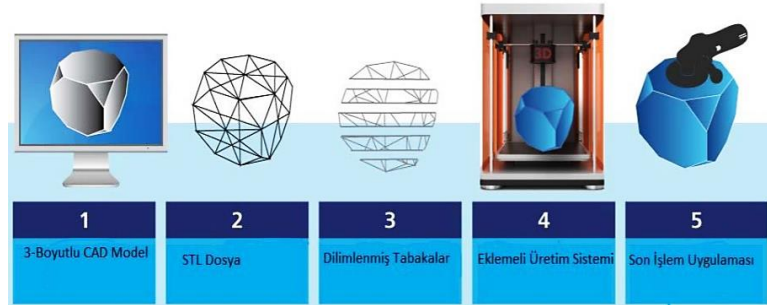
oksijene karşı aktif kimyasal reaktivitesi ve gerilme sertleşmesi eğilimi nedeniyle üretimi zor olmaktadır (Liu ve Shin, 2019). Öte yandan, Ti64 alaşımı diğer malzemelere kıyaslandığında maliyeti yüksektir (Al-Rubaie ve diğerleri, 2020). Üretimde bu dezavantajlar göz önünde bulundurulduğunda, eklemeli imalat Ti6Al4V alaşımının üretimi için oldukça ilgi çekici bir yöntem haline gelmektedir.

Bu çalışmada, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V'nin dünyada ve Türkiye'de eklemeli imalat yöntemiyle üretildiği çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, havacılığın önde gelen şirketleri tarafından üretilen uygulama örnekleri çalışmanın bir bölümünde anlatılmaktadır.

2. Eklemeli İmalat Yöntemi (Additive Manufacturing Method)

Eklemeli imalat ilk olarak prototip üretimi amacıyla kullanılmıştır. Bir bilgisayar destekli yazılım ile kontrol edilerek malzemenin katmanlar halinde birleştirilmesiyle parçaları oluşturan teknolojileri ifade eden eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir. Eklemeli imalatta metal tozların kullanılmasıyla birlikte büyümekte olan üretim sektörüdür. Bu yöntem sadece prototipler değil, son şekle yakın karmaşık geometriye parçaların üretimi için de uygun bir yöntemdir (Dedeakayoğulları ve Kaçal, 2020; Wang ve diğerleri 2015).

Eklemeli imalat yönteminde temel olarak ilk adım, CAD yazılımı ile tersine mühendislik uygulanarak parçanın üç boyutlu modelinin oluşturulmasıdır. CAD dosyası ile üç boyutlu baskı makinesi arasındaki veri transferini sağlamak için STL (STereoLithography) adı verilen veri ara yüz formatı kullanılmaktadır. STL dosyaları, parçaya ait renk, doku gibi niteliklerin aksine parça geometrisini üçgen yüzeyler kullanarak tanımlamaktadır. Bu STL dosyasıyla makinenin önerdiği ara uygulamalar sayesinde modelde oluşabilecek hatalar, gerekli yerlere destek elemanı yerleştirme, inşa yönünü belirleme gibi bir takım ayarlamalar yapılmaktadır. Daha sonra üretim yapılacak makinenin özelliğine ve parçanın hassasiyetine bağlı olarak model paralel olacak şekilde enine kesitlere ayrılır. Üretimin son aşaması ise parçanın inşa edilme sürecidir. Birden fazla teknikten biri kullanılarak üretim makinesi hazırlanan modeli katmanlar halinde birleştirerek oluşturmaktadır. Üretimde kullanılan malzemeler katı, sıvı veya toz halinde kullanılmaktadır (Çelik ve diğerleri 2013; Duran, 2016; Turalioğlu, 2018). Üç boyutlu baskı olarak da adlandırılan eklemeli imalat yönteminin temel işlem adımları Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1:Eklemeli imalat yönteminin temel işlem adımları (Basic process steps of additive manufacturing method) (Aslan, 2019)

Eklemeli imalatta tarama hızı, tarama mesafesi, kullanılan toz malzemenin şekli ve boyutu, katman kalınlığı, lazer gücü ve inşa yönü gibi giriş parametreleri ürünün mekanik dayanımı, boyutsal değişimi ve yüzey kalitesinde önemli bir etkiye sahiptir (Dedeakayoğulları ve Kaçal, 2020). Eklemeli imalat yönteminin birçok farklı prosesleri mevcuttur. Bu prosesler çalışma prensibi bakımından farklılıklar göstermektedir (Özsolak, 2019). Seçici lazer ergitme (SLM), seçici lazer sinterleme (SLS) ve eriyik biriktirme (FDM) gibi yöntemlerde katmanları oluşturmak için toz malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan toz malzemeler ergitilir ya da yumuşatılır. Stereolitografi (SLA) gibi yöntemlerde ise sıvı malzemeler birleştirilerek ürün elde edilir (Vilaro ve diğerleri 2011). Eklemeli imalat yöntemleri arasında seçici lazer ergitme (SLM), dökme malzemelerle karşılaştırıldığında karmaşık geometrik şekiller ve istenilen mekanik özelliklere sahip parçaları metal tozlardan üretmek için benzersiz bir yöntemdir. Ayrıca, SLM mikro nesnelere oluşturmak için de oldukça uygundur. Bu sebeple diğer eklemeli imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha fazla tercih edilmektedir (Yadroitsev ve Smurov, 2011).

2.1. Elektron Işın Ergitme Yöntemi (Electron Beam Melting Method, EBM)

EBM yöntemi, yüksek atmosfer basıncı altında yoğun metal tozlarını yüksek güçte bir elektron ışını yardımıyla ergiterek parçayı katman katman oluşturan eklemeli imalat yöntemidir. Oluşturulan katmanlar CAD modeliyle tanımlanan geometrik veri dikkate alınarak ergitilmektedir. EBM yöntemi, vakum ve yüksek sıcaklık altında gerçekleşmektedir. Vakum ortamı gaz moleküllerinin elektronlar ile çarpışmasını engellemektedir. EBM yönteminde metal ve seramik malzemeler kullanılabilir. Ayrıca bu yöntem daha çok mukavemeti yüksek parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Üretim tamamlandığında parçalar doğrudan kullanılabilir (Çelik ve diğerleri, 2013; Duran, 2016; Sürmen, 2019).

2.2. Eriyik Yığılma Modelleme (Fused Deposition Modelling, FDM)

Bu yöntemde üretimin hammaddesi, makaralara sarılı şekilde bulunan plastik veya polimer malzemelerden oluşan filamentler (tel) kullanılmaktadır. Üretim sırasında filamentler makaraya bağlı olan tahrik ünitesi tarafından nozula doğru itilir. Nozulun besleme kısmında filament ısıtılarak ergitilir. Ekstrüzyon kafasındaki yuvadan geçen eriyik malzeme ince bir katman şeklinde üretim yüzeyine sıvanarak ilk katman oluşturulur. Sıvama işlemi sonucunda eriyik malzeme oda sıcaklığında sertleşir ve katılaşır. Üç boyutlu model oluşana kadar işlem adımları tekrarlanır (Sürmen, 2019; Turalioğlu, 2018). Bu yöntem sayesinde karmaşık parçaların ve hareketli mekanizmaların üretimi mümkündür (Çelik ve diğerleri, 2013).

2.3. Stereolitografi (SLA)

SLA yöntemi oda sıcaklığında sıvı halde bulunan ışığa duyarlı fotopolimer reçine tabakasının noktasal UV lazer ışını yardımıyla geometriye göre belirlenmiş bölgelerin taranarak kürleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Her katman dilimleme programı yardımıyla oluşturulan G- kodlarına göre elde edilmektedir. İlk katman oluşturulduğunda inşa tablası katman yüksekliği kadar yukarı çıkar ve yeni reçine katmanı serilmektedir. Malzemenin yapışkan olması nedeniyle katmanlar birbirine yapıştırılmaktadır.

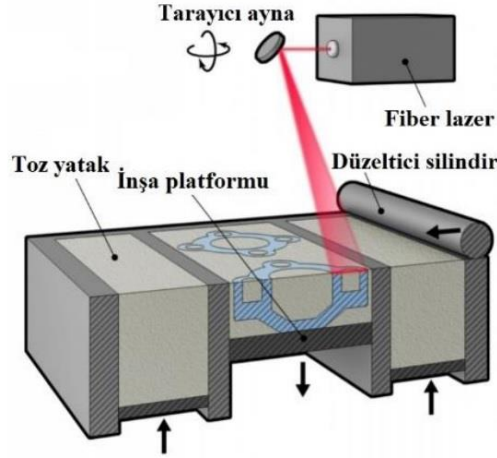
Parçanın tamamlanana kadar işlem adımları tekrarlanmaktadır. Üretim sırasında parçanın hareket etmemesi için altındaki boş kısımlara destek elemanları inşa edilmektedir. Üretim tamamlandığında destekler mekanik yöntemler kullanılarak ana gövdeden ayrılmaktadır. SLA yöntemi yüksek doğrulukta, pürüzsüz yüzeylerin oluşturulduğu bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem pek çok farklı malzeme ile birçok alanda üretim imkânı tanımaktadır (Çelik ve diğerleri, 2013; Duran, 2016; Sürmen, 2019; Turalioğlu, 2018).

2.4. Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS)

SLS yöntemi, toz haldeki malzemeyi güçlü bir lazer ışını yardımıyla sinterleyerek katmanlar halinde üç boyutlu parça oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde tozlar tamamen ergitilmeden kaynaştırılmaktadır. Üretim sırasında sinterlenmeyen toz taneleri destek görevi görmekte ve işlem sonunda tozlar fırça yada vakumlu süpürge yardımıyla parçadan temizlenerek çıkarılmaktadır. SLS yönteminde metal ve alaşımları, seramik, poliamid gibi çeşitli malzemeler kullanılabilir. Bu yöntem ile mukavemetli parçalar üretilmektedir. Bu nedenle fonksiyonel parçalar ve konsept modellerin üretiminde kullanılmaktadır (Çelik ve diğerleri, 2013; Özer, 2020; Sürmen, 2019).

2.5. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi (Selective Laser melting, SLM)

Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM), toz malzeme kullanılarak doğrudan CAD modeli ile üç boyutlu olarak parçaların üretilmesine olanak sağlayan bir eklemeli imalat sürecidir (Kempen ve diğerleri, 2011). Bu yöntemin çalışma prensibi, inşa tablası üzerine toz serici yardımıyla metal tozlar serilmektedir. Tarayıcı aynalar kullanılarak yönlendirilmiş lazer ışını sayesinde metal tozlar ergitilmektedir. Ergiyen havuz daha sonra katılarak üretilecek parçanın ilgili katmanını oluşturmaktadır. Koruyucu gaz atmosferi kullanılarak gerçekleştirilen işlemden sonra inşa tablası katman kalınlığı kadar aşağıya doğru hareket ederek bir önceki işlem uygulanmaktadır. Bütün süreç, üretilecek parçanın yüksekliği elde edilene kadar tekrarlanmaktadır (Poyraz, 2018). Sonuç olarak, yüzey bitirme dışında herhangi bir son işleme gerek kalmadan neredeyse tamamen yoğun parçalar üretilmektedir (Kempen ve diğerleri, 2011). Şekil 2’de SLM yönteminin çalışma prensibi gösterilmektedir. Bu yöntemle titanyum ve alaşımları, kobalt-krom, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları, inconel vb. metal tozları ile tamamen işlevsel parçalar üretilebilmektedir. SLM yöntemi, karmaşık geometrik yapıya sahip parçaların üretimine olanak sağlamaktadır. Ayrıca sürekli revizyon gerektiren ürünler ve tasarımlar için de uygun bir yöntemdir (Özer, 2020).



Şekil 2: SLM yönteminin çalışma prensibi (Working principle of SLM method)(Özer, 2020)

3. Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Ti6Al4V Alaşımı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar (Additive Manufacturing Methods and Studies Using Ti6Al4V Alloy)

Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen parçaların mekanik özelliklerini, mikro yapılarını ve yüzey pürüzlülüklerini etkileyen birçok işlem parametresi vardır. Elde edilmek istenen parçalar için parametrelerin optimizasyonu büyük bir önem arz etmektedir. Buna bağlı olarak literatürde yapılan çalışmalarda eklemeli imalatta kullanılan işlem parametrelerinin Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerine ve mikro yapısına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçalar, geleneksel yöntemlerle üretilen parçalarla karşılaştırıldığında daha yüksek yüzey pürüzlülük değerlerine sahiptir. Buna bağlı olarak yüksek yüzey pürüzlülüğü gerilim yoğunlaşmasını arttırmakta ve ürünün yorulmadan kaynaklı daha erken hasara uğramasına yol açmaktadır (Gülcan ve diğerleri, 2017). Li ve arkadaşları, oksidasyon ve kısmen erimiş toz partiküllerinin parçanın dış yüzeyine yapışması yüzey kalitesini etkileyen en önemli faktörler olduğunu ileri sürmüşlerdir (Li ve diğerleri, 2003). Song ve arkadaşlarının SLM yöntemini kullanarak 110 W lazer gücünde ve 0,4 m/s tarama hızında yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçlarda, Ti6Al4V parçaların yüzey pürüzlülüğü 2,1 μm ve mikrosertlik değerini ise 450 HV olduğunu gözlemlemişlerdir. Lazer gücünün ve lazer tarama hızının parçaların mikrosertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir (Song ve diğerleri, 2012). Eklemeli imalat yöntemleri ile teoride tamamen yoğun yapılar üretebilir, ancak uygun olmayan parametreler yapı içinde gözenek oluşumuna neden olmaktadır. Mekanik özellikler bakımında kontrollü gözenekli yapılar kullanılmakta ve kontrolsüz oluşan gözenekler malzeme özelliklerini bozmaktadır (Liu ve Shin, 2019). Roudnicka ve arkadaşları, SLM yönteminde farklı tarama hızları (600-1250 mm/s) ve tarama mesafesi (30-120 μm) değerlerini kullanarak Ti6Al4V alaşımından numuneler üretmişlerdir. Sabit parametreler değerleri 200W lazer gücü, 30 μm katman kalınlığı ve ada tarama stratejisidir. Araştırmacılar, farklı parametre değerlerinin gözenekliliğe ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Deney sonucunda, değişken parametrelerin değerler aralıklarında minimum gözeneklilik ve %20'ye varan gözenekliliğe sahip numuneler elde etmişlerdir. Araştırmacılar, minimum gözenekli yoğun parçalar için optimum enerji yoğunluğunun 110 J/mm³ civarında ve en yüksek mekanik özelliklere ise yaklaşık olarak 150 J/mm³lük

yüksek enerji yoğunluğunda ulaşıldığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, mekanik performansı etkileyen gözeneklilik faktörünün dışında işlem sırasında farklı enerji yoğunluklarıyla önemli mikroyapısal etkilerin de olabileceğini belirtmişlerdir (Roudnicka, Bigas ve Vojtech, 2020). Leuders ve arkadaşları, X ışını kullanarak SLM yöntemi ile üretilen numunelerin %0,23'lük bir gözenekli yapı olduğunu ve bu gözeneklerin yorulma davranışını etkilediğini ileri sürmüşlerdir (Leuders ve diğerleri, 2013). Phutela ve arkadaşları, SLM yöntemi ile Ti6Al4V alaşımını 82,5 W lazer gücü, 20 µs maruz kalma süresi, 90 µm tarama mesafesi ve 40 µm katman kalınlığı parametrelerini kullanarak üretmişlerdir. Ayrıca her katmana iki kez tarama yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada sabit parameter değerleri ile üretilen parçaların yoğunluğunu, sertliğini, mikro yapısını ve mekanik özelliklerinin numune boyutları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, küboid boyutu (5x5x5 mm) 'den (1x1x5 mm)'ye düşürüldüğünde gözeneklilik değerinin %0,3'ten %4,8'e yükseldiğini ancak, uygun boyutlarda mikro yapı bıyuttan önemli ölçüde etkilenmediği kanısına varmışlardır. Bununla birlikte, kabul edilebilir boyutların dışında mikro yapıda büyük bir değişiklik gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, boyutu küçülen numunelerin akma mukavemeti yaklaşık olarak %12, nihai gerilme mukavemeti %15 ve uzama %56 oranında azaldığını gözlemişlerdir (Phutela ve diğerleri, 2019). Al-Rubaie ve arkadaşları seçici lazer ergitme yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımını parçalar üretmişlerdir. Girdi parametresi olarak 200 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 115µm tarama mesafesi ve 30 µm katman kalınlığı ile üretimi gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar SLM yönteminde optimize edilmiş işlem parametreleri ile %99,70'lik bir nispi yoğunluk ayrıca daha yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığını ileri sürmüşlerdir (Al-Rubaie ve diğerleri, 2020). Wang ve arkadaşları, 30-50 µm boyutlarında Ti6Al4V metal tozlarını kullanarak elektron ışın ergitme (EBM) yöntemiyle numuneler üreterek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Girdi parametresi olarak 70 µm katman kalınlığı ve dört farklı seviyede tarama hızı (214, 376, 529, 689 mm/s) belirlemişlerdir. Deney sonuçlarının analizinde, Young modülünü yaklaşık 111,7 ~ 119,0 GPa ve ortalama sertliği ise yaklaşık 5,24 ~ 6,52 GPa değerlerine sahip numuneler elde etmişlerdir. Araştırmacılar EBM yönteminde tarama hızındaki artışın Young modülünü ve ortalama sertlik değerini arttırdığını gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise daha ince mikro yapı oluşmasından ötürü olduğunu ileri sürmüşlerdir (Wang ve diğerleri, 2015). Wycisk ve arkadaşları, SLM işlem parametrelerinden biri olan inşa yönünün Ti6Al4V alaşımını parçalar üzerinde yorulma performanslarına etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar 45° ve 90° inşa yönlerinde elde edilen parçaların yorulma değerlerinde önemli bir etkisi olmadığını ileri sürmüşlerdir (Wycisk ve diğerleri, 2013). Hrabe ve arkadaşları, elektron ışın ergitme (EBM) yönteminde inşa yönünün Ti6Al4V alaşımını numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Girdi parametrelerinde hızlanma gerilimi 60 kV, katman kalınlığı 70 µm ve geniş bir enerji girdisi (hız faktörü 30-40) kullanılmıştır. Araştırmacılar inşa yönü değişikçe numunenin azami çekme (X-Y yönünde 1017-1030 MPa, Z yönünde 1009-1033 MPa) ve akma dayanımlarının (X-Y yönünde 967- 983 MPa, Z yönünde 961-984 MPa) değişmediğini gözlemlenmiştir. Ancak X-Y yönündeki uzama (%12,2) miktarının Z yönündeki uzama (%7-9) miktarına göre %30 arttığını ileri sürmüşlerdir (Hrabe ve Quinn, 2013). Uhlmann ve arkadaşları, SLM yöntemini kullanarak küresel Ti6Al4V tozları ile uçak parçaları imal etmişlerdir. Araştırmacılar, SLM yönteminin ardından sıcak izostatik presleme (HIP) işlemi uygulanırsa, parçanın porozite oranının % 96,95'ten % 99,19'a çıktığını ileri sürmüşlerdir (Uhlmann ve diğerleri, 2015). Thijs ve arkadaşları, SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının tarama stratejisinin ve tarama parametre

değerlerinin mikro yapı üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. Girdi parametrelerini 30 µm katman kalınlığı, 42 W lazer gücü, 50-75 µm tarama mesafesi ve 50-200 mm/s aralıklarında değişen tarama hızı olarak belirlemişlerdir. Numunelerin üretiminde zigzag tarama, tek yönlü tarama ve çapraz tarama stratejisi uygulamışlardır. Araştırmacılar, üretilen numunelerde hızlı soğumanın etkisiyle martensitik faz oluştuğunu ve epitaksiyel büyümenin oluşması sebebiyle uzamış tanelerin ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Uzun tanelerin yönü, paça geometrisi ve tarama stratejisine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Değişken tarama stratejisi ve parameter değerlerinde üretilen numunelerin mikro sertlik değerleri 381-479 HV arasında değişkenlik göstermiştir. Bununla birlikte araştırmacılar, ortalama sertlik değerinin tarama hızının azalmasıyla arttığını, tarama mesafesi arttıkça sertlik değerinin azaldığını ileri sürmüşlerdir (Thijs ve diğerleri, 2010). Kayacan ve arkadaşları, SLS yöntemiyle Ti6Al4V alaşımını farklı işlem parametrelerini kullanarak numunelerinin mekanik özellikleri araştırmışlardır. Girdi parametresi olarak farklı seviye ve parameter değerlerinde ada tarama stratejisi ve ızgara tarama stratejisini kullanmışlardır. Uygulanan mekanik deneylerin sonucunda en yüksek çekme dayanımı (346 MPa) 190 W lazer gücü, 1200mm/s tarama hızı 0,09 mm tarama mesafesi ve ada tarama stratejisi kombinasyonlarında elde etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımı (252 MPa) 160 W lazer gücü, 1000 mm/s tarama hızı, 0,09 mm tarama mesafesi ve ızgara tarama stratejiyle üretilen numuneden elde edilirken, en yüksek mikro sertlik değeri (601 HV) 150 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 0,07 mm tarama mesafesi ve ada tarama stratejisi kombinasyonları kullanılarak elde etmişlerdir. En yüksek darbe enerjisi ise 170 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 0.07 mm tarama mesafesi ve ızgara tarama stratejisinin kullanıldığı numune grubunda 15,61 J olarak elde etmişlerdir. Araştırmacılar bunun yanı sıra lazer gücü, tarama mesafesi ve tarama hızının bir fonksiyonu olan enerji yoğunluk değeri, SLM ve SLS gibi lazer gücü kullanılan üretim yöntemlerinde nihai ürünün dayanımını önemli derecede etkileyen bir faktör olduğunu ileri sürmüşlerdir (Kayacan ve diğerleri, 2018). Kasperovich ve arkadaşları, SLM yöntemi ile Ti6Al4V alaşımını üretilen numuneler için farklı işlem parametreleri ile gözeneklilik arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Deneyler sonucunda yüksek enerji yoğunluğu ile üretilen numunelerde dairesel gözeneklerin mevcut olduğunu ve yetersiz enerji girdisi kullanıldığında ise inşa yönüne dik doğrultuda yönlendirilmiş uzun ve dar boşlukların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Buna bağlı olarak yorulma davranışı ve mekanik performansı olumsuz yönde etkileyecek boşlukların oluşumunu engellemek için ara enerji yoğunlukları ile üretimin yapılması gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Ayrıca numunenin gözenekliliği, optimize edilmiş işlem parametreleriyle büyük ölçüde azaltılabileceğini savunmuşlardır (Kasperovich ve diğerleri, 2016). Qiu ve arkadaşları seçici lazer ergitme ile üretilen Ti6Al4V numuneler için farklı tarama hızları ve katman kalınlıkları kullanarak numunelerin yüzey yapısı ve gözeneklilik durumunu incelemişlerdir. Araştırmacılar, yüksek lazer gücü kullanarak (400 W) ve sabit bir katman kalınlığında (20 µm), lazer tarama hızı 2700 mm/sn'den daha düşük olduğu hızlarda numunelerde düşük gözeneklilik içerdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca araştırmacılar farklı katman kalınlıkları (20 µm, 40 µm, 60 µm) kullanarak numunelerin yüzey yapısında incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin yüzey yapısının katman kalınlığıyla büyük ölçüde değiştiğini savunmuşlardır. Deneysel çalışmanın sonuçlarını analiz ederek, tarama hızının artması gözenekliliği artırdığını ancak büyük ölçüde etkilemediğini ileri sürmüşlerdir (Qiu ve diğerleri, 2015).

4. Eklemeli İmalat Yönteminin Havacılık Endüstrisinde Uygulamaları (Applications of Additive Manufacturing Method in Aviation Industry)

Havacılık endüstrisinde üretim, işlevsel performans, hafiflik, teslimat süresinin azaltılması, karmaşıklık, maliyet yönetimi gibi sayısız teknik ve ekonomik hedeflere bağlıdır. Bu hedefler birbirleriyle etkileşim halindedir. Bu nedenle optimum bir tasarım çözümü belirlenirken her bir faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla havacılık sektöründe eklemeli imalat yöntemleri büyük bir potansiyele sahip ve oldukça avantajlıdır. Eklemeli imalatın havacılıkta önemli olmasının nedenleri arasında hafifletmeye imkan sağlayan karmaşık geometrik parçalar tasarlama ve üretme yeteneği ön plana çıkmaktadır. CAD yardımı ile tasarlanan her parça, katman katman dilimlenerek üretilmektedir. Bu yöntem malzeme ve zaman gibi kısıtlamalarında önüne geçmektedir (Aktimur ve Gökpinar, 2015; Blakey-Milner ve diğerleri, 2021; Süt ve diğerleri, 2019). Üretim sırasında kalıp ihtiyacını ortadan kaldırması nedeniyle işçilik ve maliyet bakımından da avantajlıdır. Yeni ve farklı malzemelerin üretimde kullanılabilirlik açısından ucuz ve hızlı bir şekilde denenmesine olanak sağlanmaktadır (Aktimur ve Gökpinar, 2015). Eklemeli imalat yöntemlerinde atık malzeme miktarının az olması da oldukça önemlidir. Hava araçları ve motorlarında kullanılan malzemelerin genellikle maliyeti yüksektir. Bu sebeple atık malzeme miktarının minimum seviyede olması oldukça önemli bir durumdur. Bir hava aracının çalışma süreci içerisinde ortaya çıkan maliyetin %20-40'ı üretim ve %60-80 arası bakım, onarım ve yenilme aşamalarında kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda eklemeli imalat yöntemlerinin havacılık endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip olduğu görülmektedir (Saraçyakupoğlu, 2021). Eklemeli imalatın sunduğu bu avantajlar sayesinde hava araçlarında bazı parçalar için uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Havacılıkta önde gelen üretici firmalar tarafından 3B baskının benimsenmesi, uçak endüstrisinde uygulamalarının kullanılabilirliğini ve yaygınlığını doğrulamaktadır. Boeing firması eklemeli imalat ile 10 farklı uçak modeli, 20.000'den fazla parça ve 300 farklı parça türü dâhil çok sayıda uçak bileşeni üretmiştir (Wang ve diğerleri, 2019).

Havacılık endüstrisinde Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilen birçok uygulaması mevcuttur. Bu uygulamalardan bazıları Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının havacılık uygulamaları (Application applications of Ti6Al4V alloy)(Blakey-Milner et al., 2021)

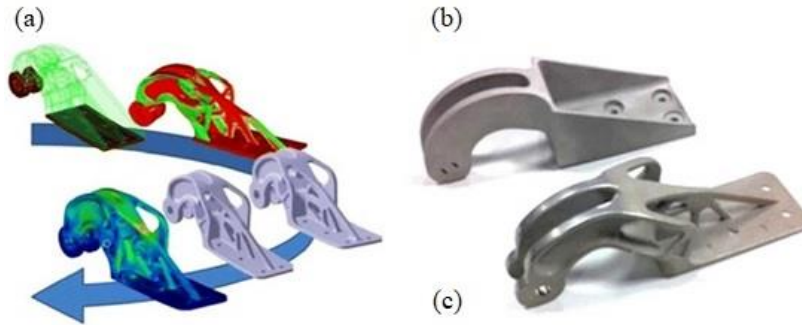
Üretici Firma	Uygulamalar	Tasarım Yaklaşımı	Kullanılan Malzeme
Airbus & EOS	Uçak Kapı Kilitleme Mili	Eklemeli imalat	Ti6Al4V
Frustum & 3D Systems	GE Uçak Braketi	Eklemeli imalat ve Topoloji optimizasyonu	Ti6Al4V
General Electric	NACA kanalı	Eklemeli imalat	Ti6Al4V
GKN Aerospace	Braket	Eklemeli imalat	Ti6Al4V
Pratt & Whitney	Kompresör Statörleri	Eklemeli imalat	Ti6Al4V

Eklemeli imalatın ilk uygulamalarından biri olan Airbus A350 ticari uçağında kullanılmak üzere 2014 yılında Ti6Al4V alaşımıyla kabin braketini konnektörü üretilmiştir. Şekil 3’de Airbus A350 XWB kabin braketini konnektörü gösterilmiştir (Blakey-Milner ve diğerleri, 2021).



Şekil 3. Airbus A350 XWB kabin braketini konnektörü (Airbus A350 XWB cabin bracket connector)(Blakey-Milner ve diğerleri, 2021)

Airbus A320 HC101 çelik motor kapağı menteşe dirseği, Ti6Al4V alaşımı kullanılarak eklemeli imalat yöntemleriyle üreterek mevcut tasarıma kıyasla kütle ve maliyet faktörlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu optimize edilen tasarım kütsel olarak %64’lük bir azalma sağlamıştır. Dolayısıyla, üretimde gerçekleştirilen bu değişiklik ile CO₂ emisyonunun da %40 oranında bir azalma sağlanacağı belirtilmiştir (Blakey-Milner ve diğerleri, 2021). A320 motor kapağı menteşe dirseğine ait tasarımı (a), üretimin orjinal hali (b) ve optimize edilen tasarımın (c) görüntüleri Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. (a) A320 motor kapağı menteşe dirseğine ait tasarım, (b) üretimin orjinal hali ve (c) optimize edilen tasarım ((a) design of the A320 hood hinge bracket, (b) original manufacturing condition, and (c) optimized design) (Blakey-Milner ve diğerleri, 2021; Meng ve diğerleri, 2020)

Kütle azaltma teknikleri, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu durumun diğer bir örneği ise, Airbus UK ve Altair Engineering arasında ortaklaşa yapılan çalışmada A380 Droop Nose Rib tasarımlarında da karşımıza çıkmaktadır (Meng ve diğerleri, 2020).

Norsk Titanium şirketi, Boeing 787 Dreamliner'da ve A350 XWB'de kullanılması için eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen Ti6Al4V alaşımlı destek braketinin üretimine başlamışlardır. Bu üretilen destek braketleri kanat ve motor arasındaki birleşiminin bir parçasıdır (Blakey-Milner ve diğerleri, 2021). Eklemeli imalat, geleneksel yöntemlerle üretilen uçak gövdelerinin ağırlığını %55 oranında hafiflik sağlayabilir. Buna ek olarak enerji tüketiminde %90, hammadde tüketiminde ise %95 oranında azalma sağlayarak modern imalat ile inşa edilebilirler (Wang ve diğerleri, 2019).

4. Sonuç (Conclusion)

Günümüzde daha da önem kazanan ve hassasiyet kavramının önemli olduğu sektörlerde eklemeli imalat, geleceğin üretim proseslerini oluşturmaktadır. Eklemeli imalatın sunduğu avantajlar havacılık endüstrisi için büyük önem arz etmektedir. Hafif yapı bileşenler, karmaşık geometrik parçalar ve hava araçlarının hassas tasarımları gibi üretim kısıtlamaları, havacılık endüstrisinde eklemeli imalat yönteminin kullanılmasını sağlayan başlıca faktörlerdendir. Havacılık endüstrisinde, Ti6Al4V alaşımının sağladığı avantajlardan dolayı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımının üstün mekanik özellikleri ve işlenebilirliğinin zor olması nedeniyle eklemeli imalatla sıklıkla tercih edilen bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan çalışmaları incelendiğinde seçici lazer ergitme yöntemi (SLM), neredeyse tam yoğunlukta, karmaşık geometrik yapı parçaların oluşturulmasında ve parçadan istenen mekanik özellikler açısından sıklıkla tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. SLM işlem parametrelerinin optimizasyonu parçadan beklenen performans karakteristiğine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu derleme çalışması, Ti6Al4V alaşımının havacılık uygulamalarında eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak çok sayıda başarılı örneğini göstermiştir. Bu durum, eklemeli imalatın havacılık firmaları tarafından gelecekte de büyük oranda kullanılacağını göstermektedir.

Kaynaklar (References)

- Aktimur, B. ve Gökpınar, E. S. (2015). Katmanlı Üretimin Havacılıkdaki Uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(2), 463–469. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gujsc/issue/7467/98289> adresinden erişildi.
- Al-Rubaie, K. S., Melotti, S., Rabelo, A., Paiva, J. M., Elbestawi, M. A. ve Veldhuis, S. C. (2020). Machinability of SLM-produced Ti6Al4V titanium alloy parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 768–786. doi:10.1016/j.jmapro.2020.07.035
- Aslan, B. (2019). *Yenilikçi tasarım yöntemleri kullanarak eklemeli imalata yönelik optimum ürün geliştirilmesi*. Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa.
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, 110008. doi:10.1016/j.matdes.2021.110008
- Çelik, İ., Karakoç, F., ÇAKIR, C. M. ve Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 31, 53–70. <https://dergipark.org.tr/en/pub/dpufbed/issue/35926/404617> adresinden erişildi.
- Çelik, K., Özkan, A., Kompozit Malzeme Teknolojileri Bölümü, Fakültesi, T., Üniversitesi, D., Arif

- ÖZKAN, T. ve Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, D. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107–121.
- Chern, A. H., Nandwana, P., Yuan, T., Kirka, M. M., Dehoff, R. R., Liaw, P. K. ve Duty, C. E. (2019). A review on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting additive manufacturing. *International Journal of Fatigue*, 119, 173–184. doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.09.022
- Dedeakayoğulları, H. ve Kaçal, A. (2020). *Eklemeli İmalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. Manufacturing Technologies and Applications* (C. 1). <https://dergipark.org.tr/en/pub/mateca/issue/54121/708049> adresinden erişildi.
- Duran, I. (2016). *Direkt metal lazer sinterleme ve döküm yöntemleri ile hazırlanan Co-Cr altyapılı metal-seramik restorasyonların klinik değerlendirilmesi*. Doktora tezi, Protetik Diş Tedavisi Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Erener, Ş., Yazar, S. ve Boz, S. (2021). DERLEME MAKALE (Review Article) Modern Üretim Tekniklerinde Eklemeli İmalat Sistemlerinin Yeri ve Kullanım Alanları Situation and Usage Areas of Additive Manufacturing Systems in Modern Production Techniques. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(1), 47–56. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tjfdm/issue/60484/885949> adresinden erişildi.
- Gülcan, O., Konukseven, E. İ. ve Temel, S. (2017). Katmanlı imalatla üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 15(1), 27–37. <https://dergipark.org.tr/en/pub/matim/issue/36791/419122> adresinden erişildi.
- Hrabe, N. ve Quinn, T. (2013). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location. *Materials Science and Engineering: A*, 573, 271–277. doi:10.1016/j.msea.2013.02.065
- Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J. ve Requena, G. (2016). Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 105, 160–170. doi:10.1016/j.matdes.2016.05.070
- Kayacan, M. C., Delikanlı, Y. E., Duman, B. ve Özsoy, K. (2018). Ti6Al4V toz alaşımı kullanılarak sls ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 127–143. doi:10.17341/gazimmfd.406786
- Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J.-P. ve Van Humbeeck, J. (2011). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia*, 12(1), 255–263. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.033
- Koç, O. O. (2021). *Eklemeli üretim yöntemiyle üretilen parçaların farklı yazdırma parametrelerinin akustik özelliklere etkisinin incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya.

- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A. ve Maier, H. J. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*, 48, 300–307. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
- Li, Y., Yang, H., Lin, X., Huang, W., Li, J. ve Zhou, Y. (2003). The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming. *Materials Science and Engineering: A*, 360(1–2), 18–25. doi:10.1016/S0921-5093(03)00435-0
- Liu, S. ve Shin, Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164, 107552. doi:10.1016/j.matdes.2018.107552
- Meng, L., Zhang, W., Quan, D., Shi, G., Tang, L., Hou, Y., ... Gao, T. (2020). From topology optimization design to additive manufacturing: today's success and tomorrow's roadmap. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(3), 805–830. doi:10.1007/s11831-019-09331-1
- Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606–621. doi:10.28948/ngumuh.626011
- Özsolak, O. (2019). Eklemeli İmalat Yöntemleri Ve Kullanılan Malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 9–14.
- Phutela, C., Aboulkhair, N. T., Tuck, C. J. ve Ashcroft, I. (2019). The effects of feature sizes in selectively laser melted Ti-6Al-4V parts on the validity of optimised process parameters. *Materials*, 13(1), 117. doi:10.3390/ma13010117
- Poyraz, Ö. (2018). *Metallerin lazer katmanlı imalatında kullanılan proses parametrelerinin etkisinin, modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmesi*. Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Poyraz, Ö. ve Kuşhan, M. C. (2018). Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerin etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 729–742. doi:10.17341/gazimmfd.416479
- Qiu, C., Panwisawas, C., Ward, M., Basoalto, H. C., Brooks, J. W. ve Attallah, M. M. (2015). On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting. *Acta Materialia*, 96, 72–79. doi:10.1016/j.actamat.2015.06.004
- Roudnicka, M., Bigas, J. ve Vojtech, D. (2020). Tuning porosity and mechanical properties of Ti6Al4V alloy additively manufactured by SLM. *Key Engineering Materials*, 865, 1–5. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.865.1
- Saraçyakupoğlu, T. (2021). Bir gaz türbin motoru kompresör palesininTi6Al4V alaşımından eklemeli üretim yöntemi ile imalatı ve boyutsal doğrulaması. *Mühendis ve Makina*, 62(702), 151–179. doi:10.46399/muhendismakina.865357
- Song, B., Dong, S., Zhang, B., Liao, H. ve Coddet, C. (2012). Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials & Design*, 35, 120–125. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.051

- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 373–392. doi:10.17482/uumfd.519147
- Süt, M., Öztürk, E., Fuat Kara, D., Üniversitesi, D., Fakültesi, T. ve Mühendisliği, İ. (2019). Havacılık Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojisi.
- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van ve Kruth, J.-P. (2010). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312. doi:10.1016/j.actamat.2010.02.004
- Turalioğlu, K. (2018). *Seçici lazer ergitme (Slm) yöntemi kullanılarak elde edilen kendinden yağlayıcı yüzeylerin tribolojik davranışlarının belirlenmesi*. Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum.
- Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F. ve Borille, A. V. (2015). Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components. *Procedia CIRP*, 35, 55–60. doi:10.1016/j.procir.2015.08.061
- Vilaro, T., Colin, C. ve Bartout, J. D. (2011). As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti–6Al–4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(10), 3190–3199. doi:10.1007/s11661-011-0731-y
- Wang, X., Gong, X. ve Chou, K. (2015). Scanning speed effect on mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy processed by electron beam additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 1, 287–295. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.026
- Wang, Y.-C., Chen, T. ve Yeh, Y.-L. (2019). Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(10), 4059–4069. doi:10.1007/s00170-018-1927-8
- Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S. ve Walther, F. (2013). High cycle fatigue (HCF) performance of Ti–6Al–4V alloy processed by selective laser melting. *Advanced Materials Research*, 816–817, 134–139. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.816-817.134
- Yadroitsev, I. ve Smurov, I. (2011). Surface morphology in selective laser melting of metal powders. *Physics Procedia*, 12(1), 264–270. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.034