




## HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE 3 BOYUTLU ÜRETİM UYGULAMALARININ UÇUŞA ELVERİŞLİLİK KURAL VE DÜZENLEMELERİNE GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tamer Saraçyakupoğlu<sup>a</sup> 

<sup>a</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [tsaracyakupoglu@gelisim.edu.tr](mailto:tsaracyakupoglu@gelisim.edu.tr)

(Geliş/Received: 04.02.2020; Düzeltme/Revised: 24.03.2020; Kabul/Accepted: 25.03.2020)

### ÖZET

Döküm, dövme, tornalama ve frezeleme gibi geleneksel üretim yöntemlerinin yerine 3 boyutlu üretim teknolojisi geleceğin imalat teknolojisi olarak değerlendirilen yenilikçi bir prosestir. Diğer taraftan, hava araçları üretiminde yer alan lider şirketlerin yıllık market raporlarına göre havacılık endüstrisi “patlayan sektör” olarak anılmaktadır. Havacılık sektöründe parça üretmek için, her ülkenin havacılık otoritesi tarafından istenen kural ve düzenlemeler mevcuttur. Bu kural ve düzenlemeler detaylarda çok küçük farklılıklar barındırıyor olmasına rağmen, temelde ülkeler arasında hemen hemen aynıdır. Uluslararası havacılık terminolojisinde genel olarak Part 21 ve yerel havacılık otoritesi tarafından SHT 21 olarak adlandırılan bir sertifikasyon sürecidir. Şu ana kadar, bazı uçak gövde, uçak motor, komponent ve parça üreticileri, 3 boyutlu üretim teknolojilerini kullanarak, hava taşıtları için “Uçabilirlik Onay Etiket” ile parça üretimi yapmışlardır. Bu parçaların, malzeme özellikleri, boyut, yüzey kalitesi ve mukavemet özellikleri tatmin edici bulunmuştur. Bu anlamda, özellikle havacılık endüstrisinde yakın gelecekte geleneksel üretim metotlarının 3 boyutlu üretim teknolojileri ile yer değiştireceğinin ipuçları görülmektedir. Bu çalışmada, 3 boyutlu üretim yöntemleri standartlar çerçevesinde incelenmiştir. Diğer taraftan havacılık sektörünün market büyüklükleri ele alınmış ve 3 boyutlu üretim teknolojilerinin havacılık sektöründe gelebileceği aşamalara yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın asıl amacı 3 boyutlu yazıcılar tarafından üretilen parçaların hangi standartlara ve düzenlemelere göre hava araçlarında kullanılabileceği hakkında bilgi vermektir.

**Anahtar Kelimeler:** 3 Boyutlu Üretim. Üretim Teknolojisi. Havacılık Endüstrisi. Havacılık Kural ve Düzenlemeleri.

### 3D MANUFACTURING APPLICATIONS IN AVIATION INDUSTRY IN ACCORDANCE WITH THE AIRWORTHINESS RULES AND REGULATIONS: A REVIEW

#### ABSTRACT

The 3D manufacturing process is an innovative technology which has been considered as the future of manufacturing technologies, instead of legacy manufacturing processes like casting, forging, lathing and milling. On the other hand, aviation is called as “booming sector” which is rapidly growing in accordance with the annual market reports of leader aircraft manufacturing companies. For manufacturing the parts in the aviation industry, there are rules and regulations which are required by country airworthiness authorities (CAA). In detail, there may be some tiny changes in these rules and regulations while the main bodies of these regulations are almost the same with each other. It is the

certification process which is called as Part 21 in the international aviation terminology and SHT 21 in the country airworthiness authority. So far, some aircraft, engine, component and part manufacturers successfully manufactured the parts for flying aircrafts with Airworthiness Approval Tag (AAT)'s. Metallurgical features, dimension, surface quality and strength of these parts are satisfactory. In this sense, it gives clues to scientists that in a near future conventional manufacturing process will replace with 3D manufacturing technologies, especially in the aviation industry. In this study, 3D manufacturing methods have been investigated in accordance with the standards. On the other hand, aviation industry's market growth has been inspected and researches have been done about the position that 3D manufacturing technologies can take place. The main objective of this study is to give adequate information about the "3D manufactured parts" for aviation industry, with the frame of airworthiness rules, regulations and certifications.

**Keywords:** 3D Manufacturing, Manufacturing Technologies, Aviation Industry, Aviation Rules and Regulations.

## 1. GİRİŞ

Zamanın başlangıcından beri insanoğlu, yaşam kalitesinin artırılması amacıyla doğal kaynakların kullanılmasına yönelik sürekli bir faaliyet süreci içerisinde olmuştur. Üretim süreci, kaynakları kullanışlı ürünlere çevirmektedir. İnsanoğlu üretim aktivitesine milyonlarca yıl önce başlamıştır. Bugünden yaklaşık 10 milyon önce Neolitik Dönem' de aletlerin kullanılmaya başlandığı düşünülmektedir. Önceleri, insanlar sadece kendi tüketimlerine yönelik aletler üretmişlerdir. O dönemde insanlar, elde tutulan aletleri kas gücüyle hareket ettirmişlerdir. Zaman içerisinde insanlar kas gücünün yerine hayvan gücü ve doğadan elde edilen akarsu ve rüzgâr gücünü kullanmayı öğrenmiştir [1].

Süreç içerisinde insanoğlu birçok değişik imalat yöntemi geliştirmiştir. Elektrik motorlarının üretim teknolojilerinde yer almasıyla beraber takım tezgâhlarının imalat teknolojilerinde yer alma süreci hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Takım tezgâhları, döküm, dövme, ısıl işlemler, boya, kaplama vb. üretime yönelik teknolojiler sayesinde, ham malzemedен yarı mamule ve yarı mamulden kullanıma hazır mamule kadar geçen sürecin her aşamasında teknolojik gelişim devam etmektedir. Üretilen yeni teknolojilerle birlikte insanın ortaya koyduğu akli ve bedensel işgücünün üretkenliği artmıştır [2].

Üretim teknolojilerinin, kümülatif bilgi birikimi ile gelişimi sayesinde insanlık;

- ❖ 1750-1850 tarihleri arasında 1'inci Endüstri Devrimi,
- ❖ 1870-1914 tarihleri arasında 2'nci Endüstri Devrimi,
- ❖ 1970-2000 tarihleri arasında 3'üncü Endüstri Devrimini yaşamıştır.

2011 yılında Almanya'nın Hannover kentinde gerçekleştirilen fuarda ilk defa kullanılan Endüstri 4.0 tabiri ise 4'üncü Endüstri Devrimi'nin içerisinde olduğumuzu bizlere bildirmektedir. Yoğun mühendislik kültürünün üretim teknolojilerinde otomasyon sistemlerini hayata geçirmesi artık günümüzde hemen her sahada karşımıza çıkmaktadır.

4'üncü Endüstri Devrimi, diğer adıyla Endüstri 4.0 akıllı otomasyon teknolojilerinin mevcut hareketidir. Bu hareket, akıllı üretim sistemleri ve ileri bilgi teknolojilerinin entegrasyonunu desteklemektedir. 3 boyutlu üretim (Eklemeli Üretim), bu yeni hareketin esas bileşeni olarak düşünülmektedir [3].

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. 3 Boyutlu Üretim Teknolojisinin Başlangıç ve Gelişimi

Dr. Hideo Kodana, 3 boyutlu üretim alanında bilinen ilk patent başvurusunda bulunan kişidir. Patent başvurusu 1980 tarihinde Japonya'da yapılmıştır. Ancak 1 (Bir) yıl içerisinde istenilen dokümanları oluşturamadığı için başvuru sonuçsuz kalmıştır. 1980-1986 tarihleri arasında 3 boyutlu yazıcılarla ilgili hiç patent başvurusunda bulunulmamıştır.

Sırasıyla 1987 yılında, Chuck HULL (3D Systems Şirketinin kurucusu), Stereolithography Aparatus (SLA) tabanlı ilk 3 boyutlu yazıcıyı üretim sektörüne tanıtmıştır. 1988 yılında, DTM Inc. Şirketi ilk kez SLS (Selective Laser Sintering) yöntemini kullanan bir 3 boyutlu yazıcının tanıtımını yapmıştır.

1992 yılında ise StrataSys Şirketi Fused Deposition Modeling (FDM) sisteminin patentini almıştır. 1999-2010 döneminde 3 boyutlu yazıcıların diğer birçok sektörün yanı sıra özellikle tıbbi donanım ve medikal sektörlerinde kullanımlarının yaygınlaştığı gözlemlenmektedir. 3 boyutlu yazıcıların tıp biliminde kullanılmasının oldukça hızlı bir şekilde yaygınlaştığı dönemlerden birisi de bu on yıllık süreçtir. Bu dönemde, değişik enstitü ve startup kuruluşlarında fonksiyonel bir minyatür böbrek, içinde birçok karmaşık parçaları barındıran protez bacak ve sadece insan hücrelerinden oluşturulan damarlar ilk kez üretilmiştir. 2011 yılından 2019 yılına kadar geçen süreçte ise 500 ABD Dolarının altında 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaştığı ve evlere kadar girdiği hızlı bir ticarileşme süreci yaşanmaktadır. Bu dönemde, sarf malzemelerin fiyatları azalmış, kullanım yaygınlaşmış ve başta tedarik olmak üzere toplam maliyet düşmüştür. Bir önceki 10 yılda endüstriyel anlamda sanayi odaklı kullanılmakta olan 3 Boyutlu Yazıcılar bu süreçte hızlı bir şekilde hobi amaçlı olarak ve diğer amatör kullanıcılar arasında da yaygınlaşmıştır [4]. 3 boyutlu üretim teknolojileri, günümüzde ve günümüze kadar geçen süre içerisinde havacılık, otomotiv, medikal, tıp ve sanat alanlarında hızla genişleyen bir kullanım alanı oluşturmuşlardır.

## 2.2. 3 Boyutlu Yazıcı / Eklemeli Üretim Sistemlerinin Kategorizasyonu

American Society for Testing and Materials (ASTM), 1898 yılında kurulmuş, 100'den fazla farklı ülkeden 30,000'den fazla üyeye sahip olan, materyaller, ürünler, sistemler ve hizmetler için standartlar geliştiren ve yayımlayan bir kuruluştur [5].

ASTM tarafından 2792-12a Standartları'na göre 3 boyutlu üretim teknolojileri 7 ayrı uygulama ile kategorize edilmektedir. Bu uygulamalar şunlardır:

❖ **Binder Jetting (Bağlayıcı Püskürtme):** Akışkan bir sıvı bağlayıcı malzemenin, toz malzemelerin üzerine seçim ile aktarılması yöntemidir.

❖ **Directed Energy Deposition (Yönlendirilmiş Enerji Birikimi):** Odaklanması sağlanmış bir termal enerji kaynağı sayesinde eritilen malzemenin üretilmekte olan parça üzerinde birikim sağladığı üretim metodudur. Bu proseste, özellikle stiffener üretimi gibi destek parçalarının üretilmesi söz konusudur.

❖ **Material Extrusion (Malzeme Ekstrüzyonu):** Malzemenin, bir lüle (nozzle) ya da orifis aracılığıyla üretilecek parçanın üzerine dağıtımının yapılması ile gerçekleştirilen üretim yöntemidir.

❖ **Material Jetting (Malzeme Püskürtme):** Üretilecek malzemelerin damlacıklar halinde seçilip püskürtmeyle üretimin sağlandığı eklemeli üretim metodudur.

❖ **Powder Bed Fusion (Toz Odacığı Füzyonu):** Termal enerjinin mürekkepli yazıcı benzeri hareketli kafalar tarafından malzemelerin üzerine kontrollü olarak püskürtüldüğü ve eş zamanlı olarak kürlendiği üretim yöntemidir. Bu yöntemin alt prosesleri şunlardır:

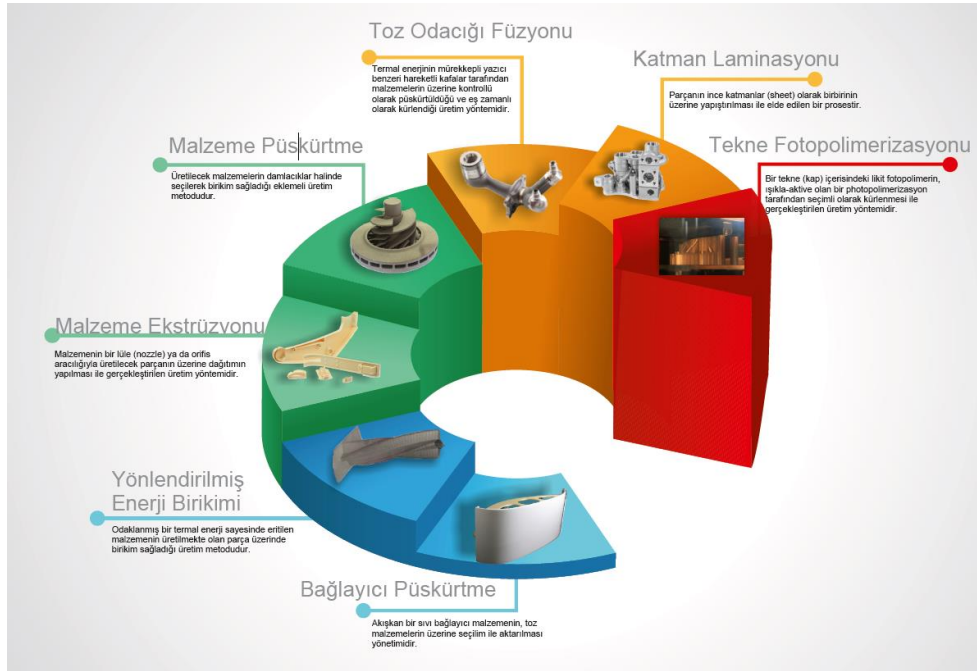
- Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS)
- Direkt Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering – DMLS)
- Seçici Isıl Sinterleme (Selective Heat Sintering – SHS)
- Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting – SLM)

➤ Elektron Işın Ergitme (Electron Beam Melting – EBM)

❖ **Sheet Lamination (Katman Laminasyonu):** Parçanın ince katmanlar (sheet) olarak birbirinin üzerine yapıştırılması ile elde edilen üretim metodudur.

❖ **Vat Photopolymerization (Sıvı-Tekne-Fotopolimerizasyonu):** Bir tekne (kap) içerisindeki likit fotopolimerin, ışıkla aktive olan bir fotopolimerizasyon işlemi tarafından seçimli olarak kürlenmesi ile gerçekleştirilen üretim yöntemidir [6].

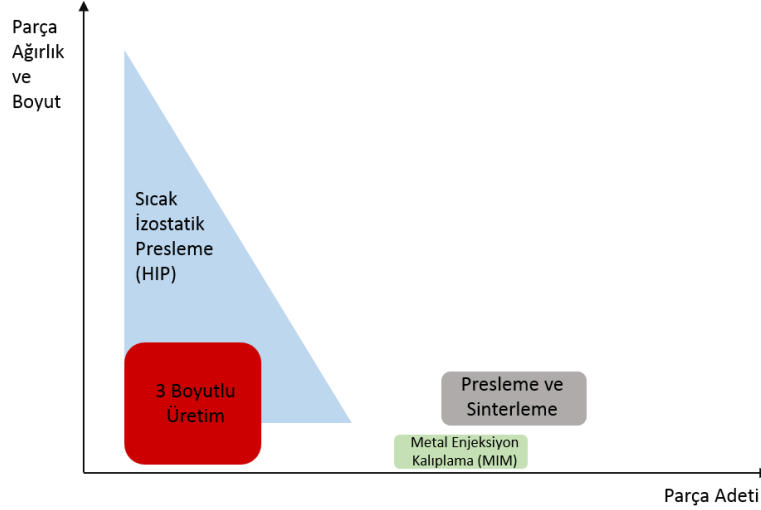
Şekil 1’de ASTM kategorizasyonu içerisinde örnek parçalar yer almakla beraber, bazı durumlarda birden fazla 3 boyutlu üretim teknolojisinin birleşik olarak kullanıldığı “hibrit” yöntemler söz konusu olabilmektedir.



Şekil 1. 3 boyutlu üretim teknolojilerinde üretilen parçaların ASTM 2792-12a standartlarına göre kategorizasyonu.

### 2.3. 3 Boyutlu Üretim Proseslerinin Diğer Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Kıyaslanması

3 Boyutlu yazıcı teknolojileri parça ağırlığı ve boyutu ile parça adeti bakımından değerlendirildiğinde diğer toz metalurjisi üretim teknolojilerini tamamlamaktadır. Şekil 2’de 3 boyutlu üretim teknolojilerinin üretim alanı lokasyonel olarak verilmiştir. Burada da görüldüğü üzere, Sıcak İzostatik Presleme (Hot Isostatic Press - HIP) gibi 3 Boyutlu Yazıcılar da küçük ya da orta ölçekli parçaların üretimine daha çok uygundur. Sıcak İzostatik Presleme işlemi, genellikle birkaç yüz kilograma kadar büyük ve net şekilli parçaların imalatında kullanılırken, 3 boyutlu üretim teknolojileri işlemi birkaç kilodan hafif parçalar için daha uygundur ve daha fazla tasarım özgürlüğü sayesinde karmaşık metal parçalar üretmek için geliştirilmiş bir kapasite sunar [7].



**Şekil 2.** Çeşitli toz metalurjisi teknolojilerinin parça ağırlığına veya boyuta ve üretim serisine göre konumlandırılması [7].

Metal Enjeksiyon Kalıplama (MIM), pres ve sinterleme teknolojileri de net şekilli parçalar üretme imkanı sunar, ancak bunlar küçük seriler için önerilir [7].

## 2.4. Havacılıkta 3 Boyutlu Üretim Teknolojisi İle Üretilen Parçaların Sertifikasyonu

### 2.4.1. Havacılık Otoriteleri

Üretim, bakım, personel yetkilendirme, hava meydanları işletim gibi birçok disiplinden oluşan havacılık endüstrisinin en tepedeki kural koyucu otoritesi Birleşmiş Milletler'e bağlı ve merkezi Kanada, Montréal'de bulunan Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (International Civil Aviation Organization-ICAO)'dur. Tüm dünyada uçuşa elverişli parça / komponent tasarımı faaliyetleri ICAO'ya bağlı Avrupa Havacılık Güvenliği Ajansı (European Aviation Safety Agency-EASA), Federal Havacılık Kuruluşu (Federal Aviation Administration-FAA) ve her ülkenin kendi havacılık otoriteleri (Country Airworthiness Authority-CAA) tarafından yönetilmektedir. Türkiye Cumhuriyeti için ulusal havacılık otoritesi T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nda bağlı Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM)'dür.

ICAO'nun görev tanımı;

- ❖ Uluslararası sivil havacılığın güvenli ve düzenli bir şekilde büyümesini sağlamak,
- ❖ Barışçıl amaçlara yönelik uçak tasarımı ve işletmesini teşvik etmek,
- ❖ Sivil havacılık için havayolları, havaalanları ve hava seyir tesislerinin gelişimini desteklemek,
- ❖ Uluslararası kamuoyunun güvenli, düzenli, verimli ve ekonomik hava taşımacılığı ihtiyaçlarını karşılamak, olarak belirlenmiş olup, bu maddeler kapsamında küresel seviyede ülke bazında müzakereler yaparak havacılık emniyetinin gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Şekil 3'te havacılık otoriteleri arasındaki direktif akışı seviyeler bazında gösterilmektedir.



Şekil 3. Uluslararası ve ulusal havacılık otoriteleri.

SHGM, 2920 Sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu ile 5431 Sayılı Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun çerçevesinde faaliyet gösteren Türk sivil havacılık otoritesidir. EASA tarafından ortaya konan düzenlemeler müzakereler çerçevesinde ve uyarlanarak SHGM tarafından yürürlüğe konmaktadır.

#### 2.4.2. Küresel Ölçekte Part 21 J ve Part 21 G Yetkisine Sahip Üreticiler ve Pazar Hacimleri

Hızla büyüyen bir sektör olması sebebiyle havacılık Sektörü bir cazibe merkezi olarak değerlendirilmektedir. Hava aracı, hava aracı parçası ya da hava aracı komponenti üretiminde yer alma, uçuşa elverişli parça üretebilme yeteneği Havacılık Seviyesi (Aviation Grade) olarak tanımlanmaktadır. Sadece üretim aşaması ile değil üretim sonrası süreç olarak ele alınan Devam Eden Destek (Follow On Support) sürecinde de Aviation Grade Seviyesi'nde yer almak Part 21 J-G akreditasyonlarına sahip olmayı gerektirmektedir.

Part 21 J-G akreditasyonlarına sahip, küresel havacılık pazarını domine eden üreticiler değerlendirildiğinde, bu işletmelerin Boeing (ABD), Airbus (Avrupa Birliği), Comac (Çin-Rus), Bombardier (Kanada), Embraer (Brezilya) ve ATR (Fransa) gibi firmalar olduğu gözlemlenmektedir. Sektörün büyüklüğünün değerlendirilmesi amacıyla söz konusu firmaların güncel market raporları incelendiğinde:

❖ **Boeing** firmasının 6,300.000.000.000 (Altı Trilyon Üç Yüz Milyar) ABD Dolarlık satış karşılığında, 42.730 (Kırk İki Bin Yedi Yüz Otuz) uçak [8],

❖ **Airbus** firmasının 5,800.000.000.000 (Beş Trilyon Sekiz Yüz Milyar) ABD Dolarlık satış karşılığında, 37.400 (Otuz Yedi Bin Dört Yüz) uçak [9],

❖ **Comac** firmasının 5,746.000.000.000 (Beş Trilyon Yedi Yüz Kırk Altı Milyar) ABD Dolarlık satış karşılığında, 41.850 (Kırk Bir Bin Sekiz Yüz Elli) adet uçak [10],

❖ **Bombardier** firmasının aynı dönem için 820.000.000.000 (Sekiz Yüz Yirmi Milyar) ABD Dolarlık satış karşılığında, 12.550 (On İki Bin Beş Yüz Elli) uçak [11],

❖ **Embraer** firması aynı dönem için 600.000.000.000 (Altı Yüz Milyar) ABD Dolarlık satış karşılığında, 10.550 (On Bin Beş Yüz Elli) uçak [12],

❖ **ATR** firmasının aynı dönem için 200.000.000.000 (İki Yüz Milyar) ABD Dolarlık satış karşılığında, 3.020 (Üç Bin Yirmi) adet uçak üreteceği öngörülmektedir [13],

Genel değerlendirmede 2017-2037 yılları arasında yaklaşık 142.400 adet yolcu uçağı üretilecek olup tahmini pazar büyüklüğü 19,430.000.000.000 (On Dokuz Trilyon Dört Yüz Otuz Milyar) ABD Dolarıdır. Pazarın bu denli büyük olması, üretim teknolojilerinde düşük maliyetli, hızlı ve doğru ürünler üretmek rekabet gücünü artırmayı zorunlu kılmaktadır. Üretilecek parçanın yer alacağı donanımdaki görevine bağlı olarak, üretim yöntemlerinin değişiklik gösterdiği gözlemlenmektedir. Gün geçtikçe hava araçlarında kullanılan parçalar daha karmaşık proseslerle üretilir hale gelmekte ve üretim hassasiyeti gittikçe artmaktadır. Rekabet edebilirlik nedeniyle, hava aracı parça üretim sektörü içerisindeki işletmeler, daha karmaşık parçaları, daha ucuz maliyetle, çevreye daha duyarlı bir biçimde üretmeye yönelik prosesler geliştirmeye zorlanmaktadır. Parça ve donanım üretim sektörlerinde yer alan birçok alanla mukayese edildiğinde havacılık üretimi bir ülkenin üretim kalitesi ve üretim gücünü ifade etmektedir [14].

### 3. UÇUŞA ELVERİŞLİ PARÇA ÜRETİMİ

#### 3.1. Hava Aracı Parça, Komponent Tasarım ve Üretim Regülasyonel Çerçevesi

ICAO, EASA ve SHGM tarafından uçuşa elverişli bir parça tasarlama ve bu parçayı üreterek hava aracına takma işlemlerinin çerçevesini belirleyen kurallar;

##### ❖ **Part 21 J**

Hava Aracı Parça Tasarım Onayı,

##### ❖ **Part 21 G**

Hava Aracı Parça Üretim Onayı olarak isimlendirilmektedir.

Bu kurallarda, bir parçayı ya da komponenti hava aracı üzerine monte etmek için o parçanın tasarımından üretimine ve üretiminden hava aracına monte edilmesine kadar geçen sürecin kuralları net bir şekilde betimlenmiştir.

Söz konusu onay ve akreditasyonlara sahip olmak için aşağıdaki alanlarda ortaya konan işletme kurallarının ilgili havacılık otoritesince yapılan denetlemelerde uçuşa elverişli parça üretimi yapılmasına ehil olduğu belirlenmelidir. Şekil 4'te gösterildiği üzere bu alanlar şunlardır:

- ❖ Tesis, İmkân ve Kolaylıklar
- ❖ Organizasyon Yapısı
- ❖ Yönetim ve Personel Yetkilendirilmesi
- ❖ Tasarım, Üretim Verisi Üretimi ve Korunum
- ❖ Teçhizat, Araç ve Takımların Kontrolü
- ❖ Çalışma Koşulları
- ❖ Onaylayıcı personel (Certificate Release Staff)



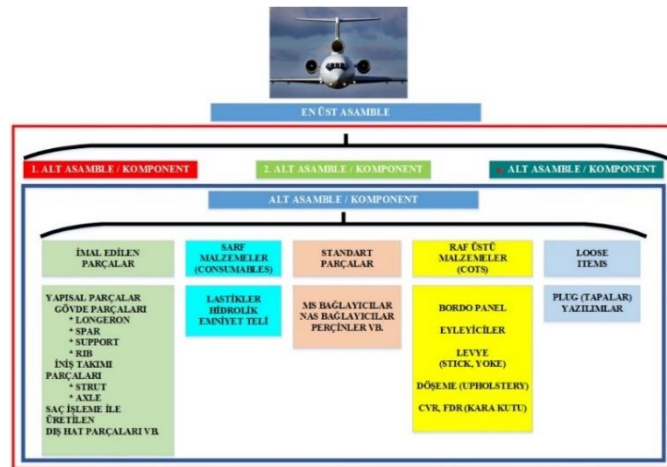
Şekil 4. Part 21 J, Part 21 G akreditasyon sürecinde ilgili havacılık otoritesince denetlenecek alanlar [15].

### 3.2. Hava Aracı Üretim Bileşenleri

En üst asamblenin hava aracı (uçak, helikopter ya da diğer hava platformları) olarak ele alındığı “Havacılık Seviyesi” (Aviation Grade) üretim teknolojisinde, üretim piramidinin aşağıdan yukarı doğru diziliminde orta bileşen olan “alt assembly”;

- ❖ İmal Edilen Parçalar,
- ❖ Sarf Malzemeler,
- ❖ Standart Parçalar,
- ❖ Raf Üstü Malzemeler / COTS (Commercial-Off-The-Shelf),
- ❖ Loose Item Malzemeler gibi malzemeler oluşturmaktadır.

Şekil 5’te gösterildiği üzere, her bir üst asamble farklı alt asamble ve alt asamblelerin bileşenlerinin meydana getirdiği bir kümedir. Birbirleriyle entegre çalışan makine elemanları disiplini içerisinde her bir üst asamble emniyetli uçuş ilkesine uygun olarak havada ve yerde yapması gereken vazifeyi uygun komutlar sayesinde yerine getirmektedir. Örneğin; ana ve burun iniş takımları ayrı ayrı birer üst asambledir. Burun iniş takımı ele alındığında basınçlı akışkanı muhafaza eden boru bir “imal edilen parçadır”, şok absorbe eden donanım bir alt asambledir. Bu iniş takımı üzerindeki civata, somun gibi bağlayıcılar standart parçalardır. İniş takımı depoda muhafaza edilirken hidrolik hatların uç kısmındaki tıkaçlar (Plug) vb. malzemeler “loose item malzemeler”dir. Burun iniş takımını harekete geçiren yazılım ise bir raf üstü malzeme olarak bileşimlendirilmelidir.



Şekil 5. Hava aracı üretim sistematığı (T19A uçağı üretim metodolojisine göre hazırlanmıştır).



Hava aracı bakım yetkisi sahibi (Part 145) kuruluşların bakım faaliyetleri sırasında kullandığı yedek parçalar da Part 21 yetkisine sahip firmalar tarafından üretilmektedir. Push-back araçları, uçak çalıştırıcılar, yakıt yükleyicileri vb. donanım ise Yer Destek Teçhizatı (YDT, Ground Support Equipment-GSE) olarak adlandırılır. Yer destek teçhizatlarının üretiminde, uçuşa elverişli parça üretim akreditasyon süreci (Part 21 J veya Part 21 G) aranmaz.

### 3.3. Uçuşa Elverişli Parça Üretimi

Uçuşa elverişli parça üretiminin önemini anlamak için hava araçlarının çalışma şartlarını göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Çizelge 1’de yerden yükseldikçe atmosfer şartlarının değişimine ilişkin bilgiler mevcuttur. Çizelgede, deniz seviyesindeki sıcaklık +15 °C ve yine aynı seviyedeki basınç 1 Atm, yani 1013,3 Milibar olarak verilmektedir.

**Çizelge 1.** İrtifaya bağlı, sıcaklık ve basınç değişimi çizelgesi [16].

<b>Basınç ve Sıcaklığın Atmosferdeki Yüksekliğe Göre Değişimi</b>		
<b>Yükseklik (Metre)</b>	<b>Basınç (Milibar)</b>	<b>Sıcaklık (Celsius)</b>
0	1013.3	15
500	955	11.8
1000	900	8.6
1460	850	5.5
2000	795	2.0
3010	700	-4.6
5570	500	-21.2
9160	300	-44.5
11790	200	-55.0
16210	100	-55.0

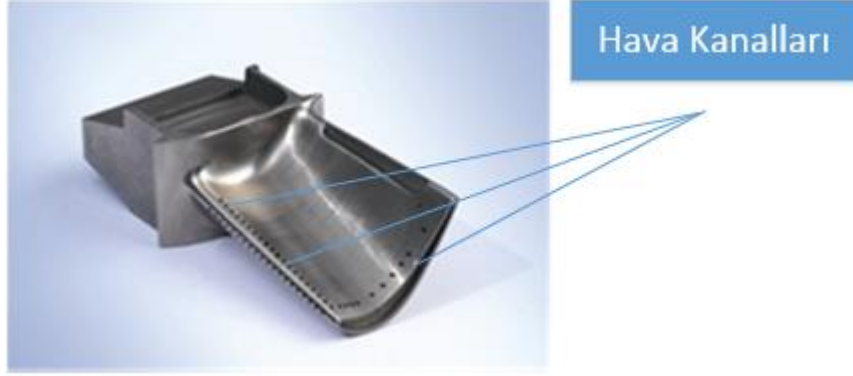
Örnek olarak bir Airbus A319 uçağını ele alalım:

Çizelge 1’de yer alan satırların alttan ikinci sırasında bulunan 11.790 metre irtifada ilerliyor olsun. Bu irtifa yolcu uçaklarının standart seyrüsefer irtifasına çok yakın bir yüksekliktir. Airbus A319 yolcu uçağının meteorolojik şartlara bağlı olarak yaklaşık seyrüsefer sürati 800-900 km/saattir. Yerden maksimum kalkış ağırlığı ise yaklaşık 64 ton olarak verilmektedir [17].

Öngörülebilir bulduğumuz şartlarda, söz konusu uçak, 64 ton ağırlıkla, dış ortam sıcaklığı -55 °C’de, dış ortam basıncı, deniz seviyesindeki atmosfer basıncının %20’si mertebesine düştüğü bir ortamda, yaklaşık 0,7 Mach’lık (Deniz seviyesinde, 15 °C’de, 1 Mach  $\approx$  1226 km / saat ve 11.790 metre irtifada yaklaşık 1062 km / saat olarak verilmektedir) bir süratle yol almaktadır. Dış ortam sıcaklığı -55 °C iken motor içerisindeki yanma odacığında ısı 2000 °C’yi bulmaktadır. Metal esaslı donanım için 1300 °C’de erimeye başlama riski söz konusudur. Yüksek ısı nedeniyle ortaya çıkan erime durumunu önlemek için uçaklarda etkili bir soğutma sistemi mevcuttur.

Bütün bu aşırı şartlar altında bir jet tepkili motorun türbin bıçağının (Blade) üretim adımları ele alındığında, türbin bıçağının üretim sürecinin ilk adımında dış formu, hassas döküm prosesi ile şekillenir. Döküm işlemi sırasında malzemedeki tek kristal yapının korunması ve süreksizlik (Discontinuity) oluşumunun engellenmesi amacıyla hassas kontrollü ısıl işlem yapılmaktadır. Ardından CNC lazer delik açma tezgâhında hava kanalları açılır. Bu hava kanalları türbin bıçağının soğutulması için elzemdir. Bu türbin bıçağı motorun yüksek basınç türbin kısmında yaklaşık 1100 °C’lik bir ortamda kullanılıyor olması sebebiyle yüzeyde oluşan yüksek ısıyı parçanın gövdesinden uzak tutmak amacıyla Termal Bariyer Kaplama (Thermal Barrier Coating-TBC) ile kaplanmaktadır. Türbin bıçağının

geleneksel üretim yöntemleri ile üretimi yukarıda aktarılan ana adımların yanı sıra çapak alma, yüzey parlatma (Polish) gibi başka adımları da kapsamaktadır. Yukarıda aktarılan üretim basamakları 3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile bir tek proses adımında gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 6’da gösterilen türbin bıçağı, eklemeli üretim yöntemleri ile tamir de edilebilmektedir [18].



Şekil 6. Türbin bıçağı üzerinde soğutma kanallarının gösterimi.

Malzeme tasarrufu ve ağırlık azaltmanın yanı sıra, 3 boyutlu üretim teknolojisi ile uçak motorlarına parça üretimi emniyet ve etkinlik sağlamaktadır. Lider uçak motoru üreticilerinden Kanada menşeli Pratt&Whitney Şirketi Connecticut Üniversitesi Eklemeli Üretim İnovasyon Merkezi'ne 4,5 Milyon ABD Doları tutarında katkı sağlamıştır [19].

Yine bir diğer büyük, uçak motor üreticisi olan General Electric firması A320 Neo, Boeing 737 Max ve Comac 919 uçaklarında kullanılan ve Şekil 7’de sunulan yakıt püskürtme lülesini 3 boyutlu üretim teknolojisi ile üretmiştir. 20 adet parçadan oluşan yakıt lülesi 3 boyutlu yazıcılar sayesinde tek bir parça olarak üretilmiştir [4]. Uçak motorlarının kritik parçalarından olan yakıt püskürtme lülesinin 30000.’sinin üretimi 04 Kasım 2018 tarihinde gerçekleşmiş olup söz konusu parça ile ilgili yetkili uçak motor bakım kuruluşlarından hiçbir olumsuz geri besleme alınmamıştır [20].



Şekil 7. General Electric firması tarafından üretilen yakıt püskürtme lülesi.

3 boyutlu üretim teknolojileri ile parça ve alt asamble üretimlerinin yanı sıra deneysel amaçlı (Experimental Category) olsa dahi tüm gövdenin eklemeli üretim teknolojileri ile üretildiği hava araçları da mevcuttur. Örneğin; Airbus firması tarafından motorlarının haricinde uçak yapısal parçalarının tümünün 3 boyutlu üretim teknolojileri ile üretildiği THOR (Test of Hi-Tech Objectives in Reality) uçağı Kasım 2015’te Hamburg / Almanya’da tüm test verifikasyon süreçlerini tamamlayarak ilk

uçuşunu gerçekleştirmiştir [21]. Şekil 8’de ilk uçuşu yapılırken gösterilen THOR uçağının, kanat açıklığı ve boyu 4 m’dir.



Şekil 8. THOR uçağının ilk test uçuşu.

3 boyutlu yazıcılar ile üretilen parçaların hava araçlarında kullanılabilmesi için Part 21 J-G regülasyona uygun olarak üretilmeleri zaruridir. Çizelge 2’de 3 boyutlu üretim prosesi ile üretilen bir parça ya da asambelinin uçak üzerinde kullanılabilmesi için gerekli olan şartlar işlem basamakları olarak sunulmaktadır.

**Çizelge 2.** Part 21 Regülasyonu Çerçevesinde 3 Boyutlu Üretim Teknolojisi ile Üretim Sürecindeki İşlem Basamakları [22].

S/N	İşlem Basamakları
1.	Hammadde özelliklerinin, kimyasal ve morfolojik olarak alt yüklenici kabul işlemleri penceresinden değerlendirilmesi
2.	Tozların taşınması, kullanımı, yeniden işleme ve yeniden kullanım limitlerinin belirlenmesi
3.	Her bir malzeme ve makine için 3 boyutlu üretim sürecinde parametrelerin oluşturulması
4.	Her bir üretim birimi ve makine için tortu, atık gibi çevresel kontrollerin belirlenmesi
5.	Örnek malzeme performans değerlendirmesi yapılarak tasarım kabulleri ve özellik ihtiyaçlarının betimlenmesi
6.	Yüzey hassasiyeti ihtiyaçlarının değerlendirilmesi ve modifikasyon sürecinin belirlenmesi
7.	Üretim esnasında geçici olarak oluşturulan, destek yapılarının söküm süreçlerinin ortaya konarak üretimin gerçekleştirilmesi
8.	Isıl işlem dahil olmak üzere üretim sonrası işlemlerinin oluşturulması ve gerçekleştirilmesi
9.	Tahribatsız muayene yöntemleri kullanarak ilk ürün komponent ve/veya parçasının kontrollerinin yapılması
10.	Komponent kabul işlemlerinin yapılması
11.	Komponent yeniden değerlendirme işlemlerinin yapılması

#### 4. SONUÇLAR

3 boyutlu üretim teknolojileri geleneksel yöntemlerle üretilmesi imkansız olarak kabul edilen parçaların ve asamblelerin tek bir tezgahta üretilmesine olanak sağlayan gelişmiş bir imalat teknolojisidir. Söz konusu üretim yöntemi sayesinde, ham malzemeden işlenmeye hazır kütükten koparma yerine, moleküler seviyede ekleme sistematığına sahip 3 boyutlu üretim teknolojileri ile özellikle havacılıkta birçok ardışık süreç yerine bir tek proses yeterli olabilmektedir. Bu bağlamda 3 boyutlu üretim teknolojileri, imal edilebilirliği (Manufacturability) artıran işlemlerdir.

Birçok karmaşık üretim basamağının tek bir tezgâha indirgenmiş olmasının yanı sıra serbest şekilli (Freeform) doğası nedeniyle 3 boyutlu üretim teknolojilerinin havacılık endüstrisinde çok hızlı bir şekilde yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Diğer taraftan, sahada konuya özgün yapılan çalışmalarda, eklemeli üretim yöntemiyle imal edilen parçaların sertifikasyonunun, imalat yöntemlerinin gelişiminin önündeki en büyük engel olduğu belirlenmektedir.

Üretim süreçleri ilgili havacılık otoritelerince kesin olarak belirlenmiş olan, uçuşa elverişli parça, komponent ve hava aracı üretimi, karmaşık parçaların üretimini kolaylaştıran ve maliyet – etkinliğini artıran 3 boyutlu üretim teknolojileri sayesinde ivme kazanmıştır. Örneğin; saygın bir havayolu ve uçak bakım şirketi olan Etihad, 3 boyutlu üretim tezgâhları üreten Alman EOS firması ile bir işbirliği anlaşması gerçekleştirerek bakım hattındaki uçaklarına panel üretimini sağlamıştır. Bir uçak bakım şirketinin Part 21 J ve Part 21 G yetkilerini alarak, bakımda değiştirilen parçaların alt yüklenicilerden tedarik etmek yerine bakım teşkilatına ürettirmesi ileride uçak bakım ve üretim birimlerinin iç içe olacağına sinyallerini vermektedir. Diğer taraftan, Hava Aracı Bakım Kuruluşu (Part 145) ile Hava Aracı Tasarım ve Üretim (Part 21 J ve Part 21 G) yetkilerinin iç içe geçmesi, havacılık otoritelerinin şu ana kadar yapageldikleri klasik akreditasyonların yapılarının değiştirilmesini de beraberinde getireceği ön görülmektedir.

Bu çalışmada, eklemeli üretim teknolojilerinin alt yöntemleri olan süreçlerinden bahsedilmekte ve hava aracı ile uçuşa elverişli parça üretimi konusunda eklemeli yazıcı teknolojilerinden yararlanmanın üretim kolaylığı ve maliyete etkileri örneklerle açıklanmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Hazarika M., Dixit U. S., Davim J. P., “History of Production and Industrial Engineering Through Contributions of Stalwarts, In Davim J. P, Manufacturing Engineering Education”, Pages:1, Cambridge, 2019.
2. Saraçyakupoğlu T., “Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Malzeme, Basınç, İlerleme Hızı ve Su Jeti Çapının Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi”, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2012.
3. Dilberoglu U., Bahar Gharehpapagha , Ulas Yamana, Melik Dolena, Procedia Manufacturing, The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0 , Cilt 11, Sayfa : 545-554, 2017.
4. Saptarshi S. M., Zhou C., Basics of 3D Printing: Engineering Aspects, In Dipaola M., 3D Printing in Orthopaedic Surgery, Pages 17-19, Amsterdam, 2019.
5. Kırklareli Üniversitesi, “ASTM Standards & Engineering Digital Library Veri Tabanı Hakkında”, <http://kddb.klu.edu.tr/Sayfalar/11007-astm-standardsengineering-digital-library-ve-turcademy-veri-tabanlarinin-aboneliği-gerçekleştirilmiştir.klu>, Mart 31, 2020.
6. Massachusetts Institute of Technology, “ASTM, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies”, <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>, Mart 31, 2020
7. EPMA (European Powder Metallurgy Association), “Introduction to Additive Manufacturing Technology,a guide for designers and Engineers”, EPMA, Sayfa :4, Shrewsbury, 2019.
8. Boeing, “Commercial Market Outlook 2018-2037”, Sayfa :3, Boeing, Seattle, 2019.
9. Airbus, “Global Market Forecast 2018-2037”, Sayfa :6, Airbus, Leiden, 2019.
10. Comac, “UAC Market Outlook 2017-2036”, Sayfa :6, Comac, Moskova, 2018.
11. Bombardier, “Market Report 2017-2036”, Sayfa :11, Bombardier, Montreal, 2018.
12. Embraer, “Market Outlook 2018-2037”, Sayfa :6, Embraer, Sao Paulo, 2019.

13. ATR, “Turboprop Market Forecast 2018-2037”, Sayfa :6, ATR, Blagnac, 2019.
14. Ma F., Cao W.,Luo Y., Qiu Y. “The Review of Manufacturing Technology for Aircraft Structural Part” 9th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2016 – “Intelligent Manufacturing in the Knowledge Economy Era, Sayfa:1, Nanjing, 2016.
15. SHGM, “Havacılıkta Parça ve Cihaz Sertifikasyonu Rehber Dokümanı” Sayfa: 14, 2018.
16. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, “Meteorolojiye Giriş”, <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=2>, Mart 31, 2020.
17. Airbus, “Aircraft Characteristics Airport And Maintenance Planning”, Sayfa :31, Airbus, Leiden, 2018.
18. Murr L. E., Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication”, Journal of Materials Science & Technology, Cilt 32, Sayı 10, Sayfa :4, 2016.
19. Brooks K.J.A., Kenneth J.A. Brookes, Aviation finds that extra dimension, Metal Powder Report, Cilt 70, Sayı 5, Sayfa:1-2, 2015.
20. General Electric, “New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles”, <https://www.ge.com/additive/blog/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>, Mart 31, 2020.
21. Airbus, “Airbus tests high-tech concepts with an innovative 3D-printed mini aircraft”, <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/06/airbus-tests-high-tech-concepts-with-an-innovative-3d-printed-mini-aircraft.html>, Mart 31, 2020.
22. Russel R., Wells D., Waller J., Poorganji B., Ott E., Nakagawa T., Sandoval H., Shamsei N., Seifi M., Qualification and Certification of Metal Additive Manufactured Hardware for Aerospace Applications, In Froes F., Boyer R., Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Elsevier, Sayfa: 45, Elsevier, Amsterdam, 2019.