



Bir Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesinin Ti6Al4V Alaşımından Eklemeli Üretim Yöntemi ile İmalatı ve Boyutsal Doğrulaması

Tamer Saraçyakupoğlu¹

ÖZ

Bu çalışmada, bir gaz türbin motoruna ait kompresör palesinin, Ti6Al4V alaşımından Eklemeli Üretim (EÜ) yöntemiyle üretimi ve boyutsal doğrulama ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Havaçılık endüstrisinde yaygın kullanılan Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi seçilmiştir. İmalattan sonra her bir palede 87 adet olmak üzere toplam 174 yüzey ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, katı modele oranla, 1 Nu'lu palede ortalama +0,0944/-0,0809 mm arasında, 2 Nu'lu palede ortalama +0,1093/-0,0978 mm değişim olduğu belirlenmiştir. Her iki paledeki geometrik değişimin birbiri ile tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bir uçar-parçanın uçağa takılmasına yönelik uçuşa elverişlilik çalışmaları konusuna girmeden, bir gaz türbin motoru kompresör palelerinin Ti6Al4V alaşımından EÜ yöntemi ile üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gaz Türbin motor, eklemeli üretim, boyutsal doğrulama, direkt metal lazer sinterleme (dmls), kompresör palesi

Manufacture and Dimensional Verification of a Gas Turbine Engine Compressor Blade Produced via Additive Manufacturing Method using Ti6Al4V

ABSTRACT

In this study, the production of a compressor blade belonging to a gas turbine engine via Additive Manufacturing (AM) method using Ti6Al4V alloy and dimensional verification measurements were performed. The Direct Metal Laser Sintering (DMLS) method, which is widely used in the aviation industry was chosen. After manufacturing, a total of 174 surface measurements were made, 87 on each blade. In the measurement, it was determined that there is an average deviation of +0.0944/-0.0809 mm in the 1st blade and +0.1093/-0.0978 mm in the 2nd blade compared to the 3D solid model. It was observed that the geometric deviation of the two blades is consistent with each other. As a result, it has been demonstrated, that compressor blades of a gas turbine engine can be produced via AM method using Ti6Al4V without dealing with the airworthiness studies for manufacturing the airborne part.

Keywords : Gas turbine engine, additive manufacturing, dimensional verification, direct metal laser sintering (DMLS), compressor blade

Geliş/Received : 20.01.2021

Kabul/Accepted : 12.03.2021

¹ Dr., İstanbul Gelişim Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, İstanbul
dr.tamer@tamersaracyakupoglu.com.tr
Orcid: 0000-0001-5338-726X

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In this study, it is aimed to make a geometric accuracy study of turbojet engines high-pressure compressor blades that have been additively manufactured with Ti6Al4V material. Turbojet engines are the most familiar engines in the aviation industry. In a turbojet engine, there are cold and hot sections. The compressor blade which works under high pressure and cyclic loads were aimed to produce. On the other hand, the parts that are made of Titanium alloys are frequently used in turbojet engines. Because of the relatively lower melting point, the titanium alloy parts are generally used in the cold sections of the engine while nickel and cobalt alloys are preferred in the hot sections. With its layerwise manufacturing technique, the additive manufacturing technology has been selected for this study since it has been widely used in the aviation industry since it provides the ability of complex-shaped parts. Direct Melting Laser Sintering (DMLS) is a method of additive manufacturing. The DMLS has been selected since it is one of the most popular additive manufacturing technology currently used widely in the aviation industry.

2. Research Purpose

The objective of this research study is to understand the manufacturability of a turbojet engine high-pressure compressor blade using EOSM290 Direct Melting Laser Sintering (DMLS) machine. While focusing on the manufacturability of the blades the limits of the EOSM290 machine was also examined in terms of manufacturing performance. A blade was selected since it has a relatively complex shape, containing curves and sharp edges. During the study, a First Article Inspection (FAI) activity was also performed in accordance with the reference documents provided by EOS company. In terms of manufacturability, not only the additive manufacturing machine but also the heat treatment oven and sand-blasting machines were also examined.

3. Methods/ Methodology

Before manufacturing, a work-flow chart was prepared with the coordination of the machine manufacturer and test center. Later on, a work control document that includes the steps was prepared based on the information of the mentioned work-flow chart. Simultaneously, a 3D CAD model of a generic blade that is used on a turbojet engine's high-pressure compressor stage has been created with Catia software. During CAD model preparation, the tight tolerances and outer surface features have been taken into account. It was planned to manufacture two blades for comparing and cross-check the parts with each other. During machining, the layer thickness, laser scan speed, laser power, and hatch distance parameters were used as default values prepared and provided by EOS. After manufacturing, a heat treatment process has been applied to the blades. After heat treatment, the parts were sent to an independent test center for having information about geometrical accuracy and dimensional verification. The independent test center where has a three-dimensional verification system made the inspections in detail. For inspections, the 3D CAD model's data has been provided to the test center.

4. Results/ Findings

At the end of the geometrical inspections, it was observed that the two parts are very close to each other in terms of outer shape dimensions. In another meaning, additive manufacturing, sand-blasting, and heat treatment process were providing results promptly. From the open literature studies, it was known that 11%-12% shrinkage is one of the natural results of sintering and needed to be optimized for having the demanded geometrical features and surface roughness. In this manner, it can be claimed that the results were as predicted.

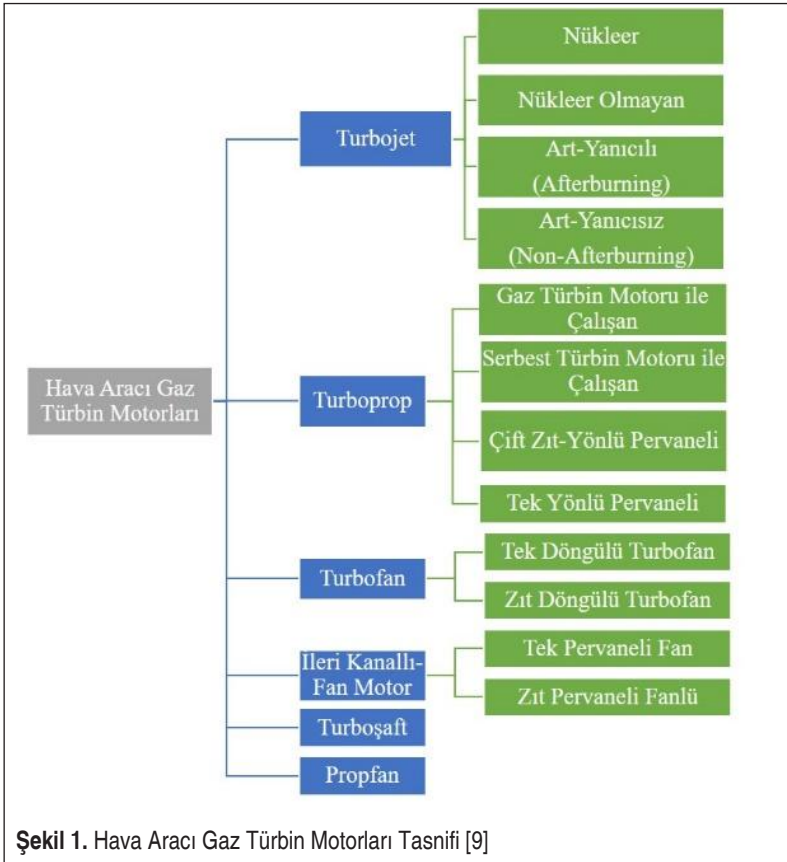


5. Discussion and Conclusions

It was found that the two additively manufactured blades are very close to each other in terms of geometrical features. It can be considered as self-proof of this research study. It is noteworthy, that the steps of the additive manufacturing process and post-process activities are manageable since the results are coherent to each other. For the future studies, with the evaluation of the shrinkage percentage, the 3D model may be modified with bigger sizes on basis of the calculations. Besides, the layer thickness, laser scan speed, laser power, and hatch distance parameters can be optimized in terms of having the prompt part which is demanded. A Hot Isostatic Press (HIP) process may be used for final shaping instead of the heat-treatment oven. Eventually, with additive manufacturing technology, it is possible to produce the parts for turbojet engines. During this process, titanium alloys are eligible for cold sections such as compressors. Other than blades, the vanes, stators, and other engine parts are strong candidates for additive manufacturing technology and titanium alloys. The increasing demand for usage of additively manufactured parts for air vehicle engines gives clues about future implementations.

1. GİRİŞ

Hava araçları zorlu şartlarda görev yapmak üzere tasarlanmaktadır. Ortalama bir yolcu uçağının seyrüsefer irtifasında dış ortam sıcaklığı $-55 / -60$ °C iken uçağın motorundaki sıcak bölgede ortalama sıcaklık 1600 °C'dir [1,2]. Etiyopya'daki Erta'Ale Lava Lake yanardağından çıkan lavın 1187 °C [3] olduğu göz önüne alındığında bir uçak motoruna yönelik üretim yapılırken nasıl ileri bir teknolojiye gereksinim duyulduğu anlaşılabilir. Kullanım amaçlarına göre askeri, ticari-yolcu, ambulans, yangın söndürme ve zirai ilaçlama uçakları gibi birçok kategoriye sahip olan hava taşıtlarının ortak paydası, üretim yöntemlerinin karmaşık mühendislik hesaplamalarıyla hayata geçirilmiş olmasıdır. Bu sebeple, havacılık sektöründe üretim yapmak, ülkelerin endüstriyel gelişmişliklerinin göstergesi olarak nitelendirilmektedir [4,5]. Havacılık sektöründe üretim yapmak için gerekli olan kurallar ulusal ve uluslararası havacılık otoriteleri tarafından yönergelerle belirlenmiştir. Söz konusu üretim süreci Üretim Organizasyon Onayı (ÜOO, Product Organization Approval-POA) gereklilik-



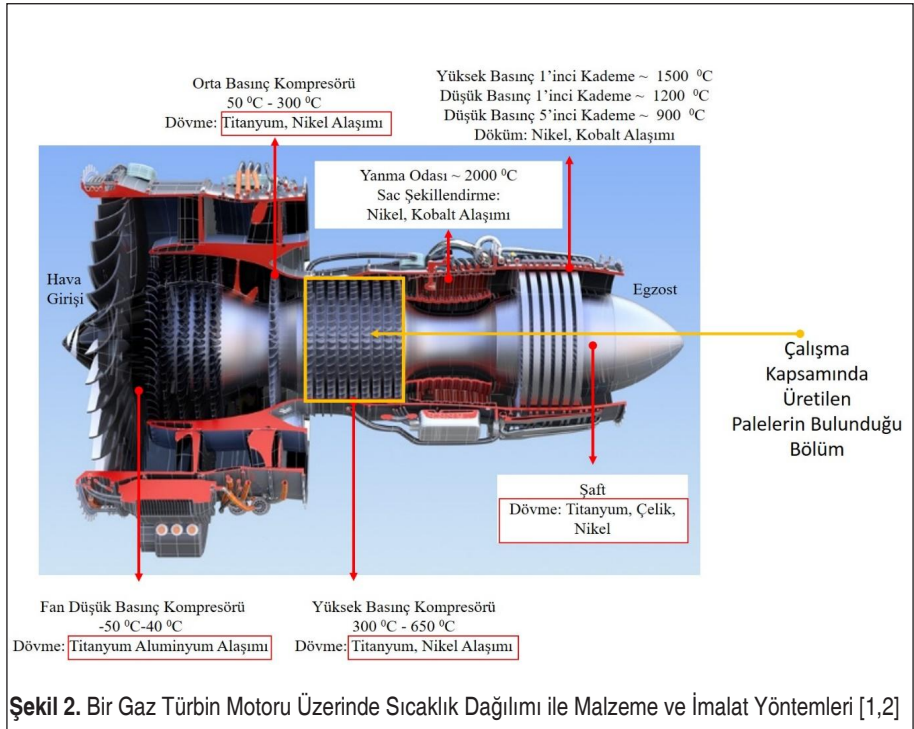


leri olarak Part 21-G şeklinde ifade edilmektedir [6,7,8]. Söz konusu onay sürecinde, üretim yapılan fabrika ortamından, çalışan personelin bilgi donanımı ve tecrübesine kadar bütün gereklilikler dokümanite edilmiştir. Bu çalışmanın odağında ÜOO gereklilikleri yer almamakta; sadece imal edilebilirliğe yönelik analizler yapılmaktadır.

Gaz türbin motorları, çalışma şartları ve sistem gereksinimlerine göre kategorize edilmektedir. Şekil 1’de görüldüğü üzere çalışma şartları ve itki üretme yöntemlerine bağlı olarak birçok değişik tipte gaz türbin motoru kullanımı söz konusudur.

Gaz türbin motorları esas olarak kompresör, yanma odası ve türbin modüllerinden oluşmaktadır. Kompresör, motor içerisinde soğuk bölge olarak isimlendirilen kısımda yer alırken, yanma odası ve türbin kısımları ise sıcak bölge adı verilen kısımdadır. Şekil 2’de görüldüğü üzere sıcaklık ve basınç dağılımına bağlı olarak her bir modül ve kısımda farklı malzemeler kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Ti-Al alaşımları motorun kompresör kısmının düşük basınç bölgesinde yer almaktadır. Bu çalışmada üretilen paleler Ti-Al alaşımlarının havacılık ve medikalde en yaygın kullanılan olan Ti6Al4V malzemesidir. Söz konusu alaşım yüksek mukavemet değeri, görece hafif olması, üstün korozyon direncine sahip olması gibi özellikleri nedeniyle gaz türbin motorlarında kullanım için oldukça uygundur [10,11]. Talaşlı



imalat gibi geleneksel yöntemlerle, karmaşık şekilli Ti6Al4V malzemelerini işlemek, termal iletkenliğinin düşük olması, yüksek sertliğe sahip olması, yüksek kimyasal reaksiyon özelliği ve aynı zamanda da atık olarak geriye kalan talaşların maliyetinin yüksek olması nedeniyle verimli değildir [12,13]. Bu nedenle bu çalışmada EÜ yöntemi ile üretim tercih edilmiştir.

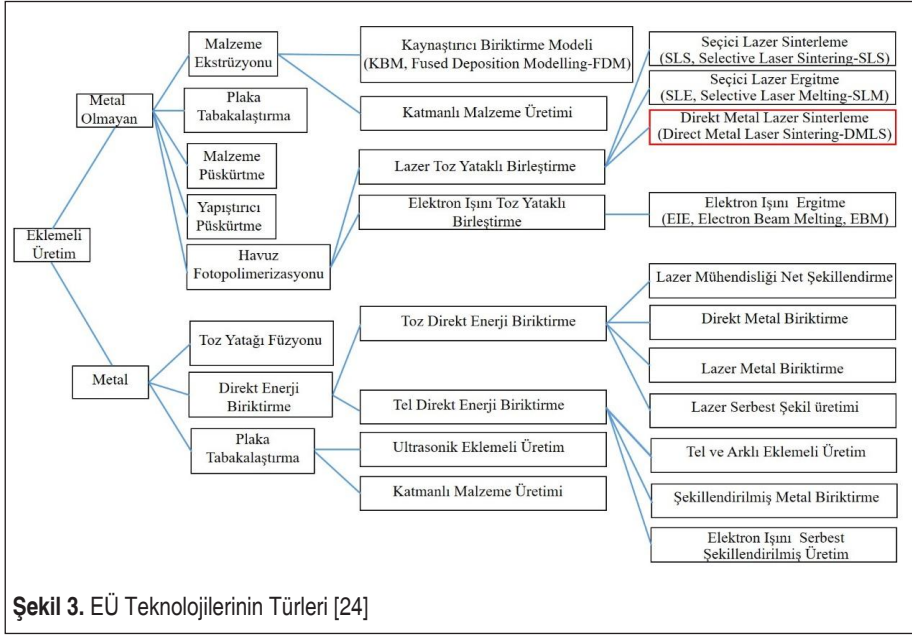
Yapılan literatür çalışmalarında; EÜ ile Ti6Al4V ile jet motorlarındaki kompresör çarkı (impeller) ve pale gibi parçaların üretim süreçlerinin olgunlaştığı gözlemlenmektedir. [14,15]. Ti6Al4V alaşımı ile yapılan üretimler medikal alanda da yaygınlaşma süreci içerisinde [16,17,18]. Diğer taraftan pale gibi karmaşık şekilli parçaların Ti6Al4V malzeme ile üretimi ve geometrik doğrulamasına yönelik yapılan literatür taramasında Tel Erozyon (Wire Electric Discharge Machine-WEDM) ile yapılan bir çalışma karşımıza çıkmaktadır. Yapılan çalışmada dışbükey (Konveks) yüzeylerde 8 μ , içbükey yüzeylerde ise 6 μ yüzey hassasiyeti ile parça üretimi söz konusudur. Diğer taraftan, boyutsal doğrulama açısından hareketli telin üçüncü boyutta hareket ettirilmesi güç olduğundan, WEDM teknolojisinin dikey ekseninde değişim gösteren yüzey profillerinde kullanılması mümkün olmadığı gözlemlenmiştir [19]. Bir başka çalışmada, Directed Energy Deposition (DED-Direkt enerji biriktirme) yöntemi ile Ti6Al4V alaşım kullanılarak silindirik geometriye sahip bir deney parçası üretilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yüzey hassasiyetinin $\pm 2,5$ mm tolerans değerinde olduğu görülmüştür [20]. Bu durumun sebebinin DED prosesinin tel eritmeye dayalı çalışma yönteminden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu nedenle WEDM ve EÜ yöntemlerinden DED metodu gibi teknolojilerin pale benzeri karmaşık yüzeye sahip parçalarda kullanılmayacağı değerlendirilmektedir. EÜ ile Ti6Al4V malzemelerin geometrik doğrulamasına yönelik yapılan çalışmalar genel olarak artık gerilmelere (residual stress) bağlı çarpıklık ve yüzey deformasyonlarını önlemeye yönelik çalışmalardır. Bununla beraber EÜ ile Ti6Al4V parçalardaki boyutsal değişimlerin incelendiği çalışmalarda kullanılan parçaların ya küp şekline sahip basit formda ya da ince duvarlı parçalar olduğu gözlemlenmektedir [21].

Bu çalışmada ise literatürde karşılaşılan araştırmalardan farklı olarak gaz türbinli motorun kompresör bölgesinde kullanılan paleler örnek alınarak Ti6Al4V alaşımı ile EÜ yöntemi üretilmiş ve geometrik doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Havacılık Endüstrisinde EÜ Uygulamaları

Daha önceden bahsedildiği üzere EÜ ile üretim sadece havacılık sektöründe değil; medikal, uzay ve otomotiv gibi diğer sektörlerde de hızla yer edinmektedir. 1980'li yıllarda ilk patent çalışmaları yapılan EÜ teknolojileri ile yapılan üretimlerin yıllar içinde pazar payını artırdığı gözlemlenmektedir. Bu kapsamda, Wohlers Associates ta-



rafından yayımlanan yıllık EÜ dünya pazarı raporuna göre; EÜ'nün pazar payı 2012 yılında 2,25 Milyar ABD Doları, 2016 yılında 6 Milyar ABD Doları iken 2020 yılında 21 Milyar ABD Doları seviyesine çıkacağı öngörülmüştür [22]. Bu hızlı büyümenin, EÜ'nün geleneksel üretim yöntemlerinin yerini alabilecek tümenden değişimci bir yöntem olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir [23]. EÜ teknolojilerinin kendi içinde birçok farklı türü mevcuttur. Şekil 3'te EÜ teknolojilerinin türleri sunulmaktadır. Sahadaki uygulamalara bağlı olarak, her bir EÜ teknolojisinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu makaleye konu olan kompresör palesinin üretimi, havacılık alanında yaygın kullanıma sahip olan DMLS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Talaşlı üretime kıyasla atık miktarının az olması, EÜ teknolojilerinin hava araçları ve hava araçları motorlarında kullanımının avantajlarından bir tanesidir. Uçak motorlarında kullanılan malzemelerin genellikle maliyeti yüksektir. Bu nedenle atık miktarının az olması oldukça önemlidir [25]. "Ham Malzeme" / "Uçağa Takılmaya Hazır Ürün Ağırlığı" (Buy-to-Fly-Ratio) oranının düşük olmasından dolayı, EÜ'nün uçak motor parçalarında kullanımının daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir [26,27]. Malzeme tasarrufu ve ağırlık azaltmanın yanı sıra hava yolu işletmecilerinin, uçak motorlarında aradığı en önemli özelliklerin güvenlik ve verimlilik olduğu bilinmektedir. EÜ, son ürünün kalitesini olumlu açıdan etkileyebilen tekli veya çoklu malzeme kullanımları, ısı, basınç gibi birçok değişkenin kontrol edilebilmesine olanak sağlaması nedeniyle güvenlik ve verimliliğe katkı sağladığı değerlendirilmektedir [28]. İlave olarak, EÜ teknolojileri, sadece üretim aşamasında değil Bakım, Onarım ve

Yenileme (BOY, Maintenance, Repair and Overhaul-MRO) aşamasında da geniş bir kullanım alanına sahiptir [29]. Bir hava aracının ömür devri boyunca ortaya çıkan maliyetin %20-40 arası tedarik ve %60-80 arası BOY faaliyetlerine harcadığı göz önüne alındığında [7,30] EÜ teknolojilerinin havacılık endüstrisinde kullanımının hem üretim hem de devam eden destek (Follow-on-Support) fazında maliyet etkin bir çözüm sunduğu ortaya çıkmaktadır.

2.2 Havacılık Endüstrisinde Ti6Al4V Uygulamaları

Ti6Al4V alaşımı, ilk olarak, 1950'li yıllarda uçak yapısal parça uygulamaları için üretilmiştir. ASTM F1472 [31] ve ASTM 2924 [32] standartlarına göre Ti6Al4V alaşımı malzeme kompozisyonu, %90 Ti, %5.48 Al, %4.22% V, %0.369 C, %0.112 Fe, %0.0625 Sn, %0.00386 Nb, %0,0099 Cr olarak belirlenmektedir. Üretimde kullanılacak olan tozun içeriğine yönelik, üreticiden alınan Uygunluk Sertifikası (Certificate of Conformance-CoC) ile bahsi geçen standartlarda yer alan verilerin birbiri ile örtüştüğü doğrulanmıştır. Ti6Al4V alaşımın yoğunluğu $4,3 \text{ gr/cm}^3$ olarak bilinmektedir. Düşük yoğunluk, yüksek mekanik dayanım, yüksek korozyon direnci ve bio-uyumluluk özelliği Ti6Al4V alaşımını oldukça cazip kılmaktadır [33,34].

2.3 Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS)

EÜ yöntemlerinden olan DMLS metodu, bir toz yatağı içerisine serilen tozların lazer ışını ile sinterlenmesi prensibine dayanmaktadır. Her bir toz taneciği üzerine lazerin çarpma süresi 0,5-25 milisaniyedir. Bu zaman zarfında, tozlar kısmen ergiyip soğutulularak, istenilen parçayı meydana getirmek üzere katmanlar halinde birbirine bağlanmaktadır [35]. Yüksek soğuma hızından dolayı, EÜ ile imal edilen parçaların çekme özellikleri ve sertliklerinin, talaşlı imalat ya da döküm yöntemi ile üretilmiş malzemelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir [36]. Diğer taraftan, EÜ ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksektir. Söz konusu yüksek yüzey pürüzlülüğü, gerilim yoğunlaşmasının artmasına ve dolayısıyla parçanın yorulma etkisine daha erken maruz kalmasına yol açmaktadır. İlave olarak, parçada meydana gelen gözeneklilik ve katmanlar arasındaki yetersiz birleşme, yorulmayı daha öne çekebilmektedir. Bu nedenle, üretimden sonra, Sıcak İzostatik Presleme (SİP, Hot Isostatic Press-HIP) ile parçanın yoğunluğunda artış sağlanması sayesinde yorulma mukavemetinin yükseltilmesi sağlanmaktadır [37]. DMLS ile üretilen Ti6Al4V parçalarının maksimum çekme kuvvetlerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmada, hiç ısıl işlem yapılmamış numunede 1150 Mpa olan maksimum çekme kuvveti, gerilim giderme ısıl işlemi sonrasında 1230 Mpa olarak belirlenmiştir. HIP işlemi sonrasında ise 960 Mpa olarak belirlenmiştir [38]. Bu çalışmada ısıl işlem uygulaması 800 °C gerçekleşmiş olup söz konusu değer, toz üreticisi firma tarafından sağlanan bir referans değerdir. EÜ yöntemi ile Ti6Al4V alaşımı kullanılarak üretilen parçaların geometrisi ve mekanik özellikleri üzerinde birçok faktörün yer aldığı bilin-



mektedir. Kompresör palesinin EÜ yöntemi ile üretiminde, imalat kalitesini etkileyen ve değiştirilebilir faktörler aşağıda yer almaktadır:

- Katman kalınlığı,
- Lazer gücü,
- Tarama hızı,
- Tarama deseni,
- İnşa yönü,
- Yanal kayma aralığı.

2.3.1 Katman Kalınlığı

EÜ üretim yönteminin çalışma sistematığı eşit aralıklara sahip katmanların üst üste getirilmesidir. Özellikle iç ve dış yüzeylerinde karmaşık bileşenler için alternatif bir çözüm ortaya koyan, ideal birleştirme malzemesi aracılığıyla katmanlar halinde imal edilmesini sağlayan gelişmiş bir üretim tekniğidir [35-37,39]. Katman kalınlığı limitler dâhilinde azaltılabilir ancak daha ince katman kalınlıklarının daha ince olması parçanın üretim süresini uzatmakta ve dolayısıyla parça maliyetini artırmaktadır [40]. Diğer bir ifade ile katman kalınlıklarının arttırılması üretim zamanının ve sonuçta üretim maliyetinin azaltılmasını sağlamaktadır. Ancak katmanlar kalınlaştıkça, basamak etkisinden (stair step) dolayı pozitif bir korelasyon içerisinde yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır [41]. İlave olarak, katman kalınlığı arttıkça parça içerisindeki ergimemiş toz partikülleri ve gözenek boşlukları gibi süreksizlikler de ortaya çıkmaktadır [42]. Söz konusu süreksizlikler, parçanın yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Düşük yoğunluk ise parçanın başta akma dayanımı olmak üzere mekanik özelliklerinde düşüşe sebep olmaktadır [43]. Yoğunluk azalmasının bir başka sonucu da sertliğin azalması olarak ortaya çıkmaktadır. Genel değerlendirmede, katman kalınlığının tarama hızı ve lazer gücü ile bir optimizasyon içerisinde olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Aksi takdirde, ergimemiş toz partikülleri ve gözenek boşluklarından kaynaklanan süreksizlikler, yoğunluk azalması ve akma dayanımının düşmesi gibi olumsuz sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Süreksizliklerin bertaraf edilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, azaltmanın birim hacimdeki enerji yoğunluğu ile bağıntılı olduğu ve yeterince enerji sağlandığında tam ergimenin meydana geldiği, dolayısıyla boşlukların oluşmadığı belirlenmektedir [44].

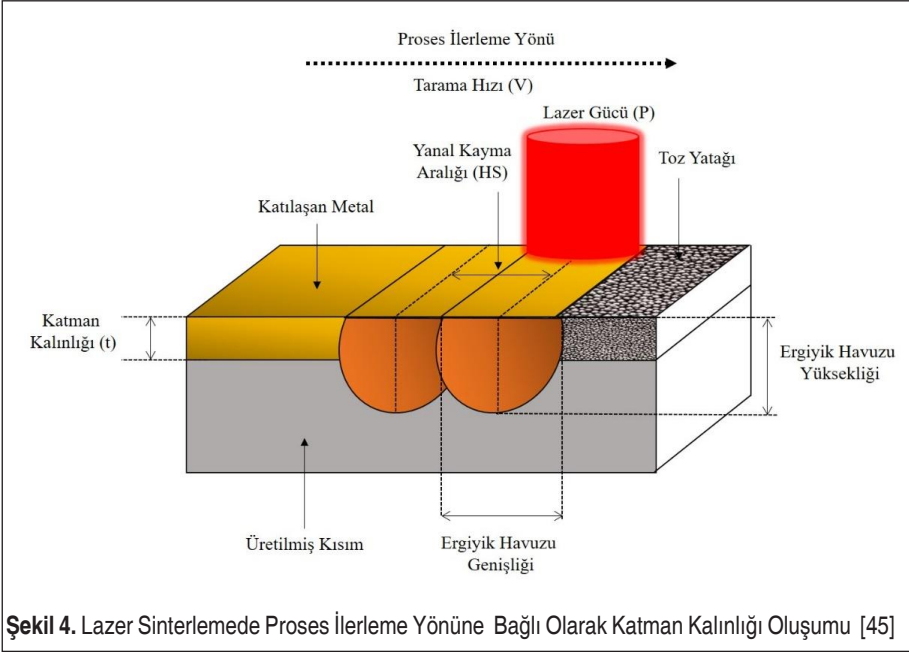
2.3.2 Lazer Gücü

EÜ yöntemlerinden biri olan DMLS, temelde toz partiküllerinin lazer gücü ile ergitilmesi prensibine dayanmaktadır. Burada enerji yoğunluğu önemli bir parametredir. Enerji yoğunluğu, lazer gücünün (P), katman kalınlığı (t), tarama hızı (V) ve Yanal Kayma Aralığı (Hatch Space-HS) çarpımına oranı olarak belirlenmektedir [44].

Eşitlik (1)'de verilen, "Andrew Sayısı" ampirik eşitlik olarak enerji yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$A_N = \frac{P}{H_s \times v} \quad (1)$$

Bu bağıntıya göre enerji yoğunluğu, lazer gücü arttıkça artmakta, tarama mesafesi ve tarama hızı azaldıkça azalmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği üzere lazer gücüne bağlı olarak, lazer ışını tarafından taşınan enerji daha önceden sinterlenmiş kısımla, yeni tozu bir araya getirmektedir. Bu sayede, katmanların yanal düzlemde birbirlerine bağlanması (bonding) işlemi gerçekleşmektedir.



Şekil 4. Lazer Sinterlemede Proses İlerleme Yönüne Bağlı Olarak Katman Kalınlığı Oluşumu [45]

Yüzey hassasiyetinin ilerleme hızı, katman kalınlığı ve lazer gücünün kontrolü ile sağlandığı bilinmektedir [46]. Palelerin üretildiği EOSM290 DMLS (EOS GmbH, Almanya) makinesinin azami lazer gücü 400 Watt'tır. Lazer gücünün az, ilerleme hızının yüksek olduğu durumlarda ergime tam oluşmamakta ve bu durumda yapı içerisinde süreksizliklerin oluşması ve var olanların artması, ilave olarak yüzey hatalarının çoğalması durumu söz konusu olmaktadır [47]. Diğer taraftan, yüksek lazer gücü ve düşük ilerleme hızında anahtar deliği (keyhole) şeklinde gözenek oluşumu söz konusu olmaktadır [48].

2.3.3 Tarama Hızı

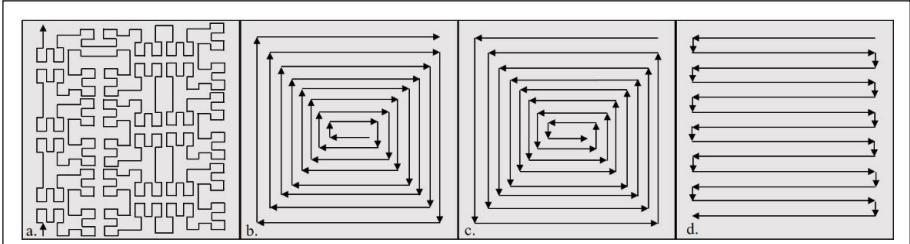
Tarama hızı, eş zamanlı ergitilen toz partiküllerinin miktarını belirleyen bir değer olarak tanımlanabilmektedir [49]. Tarama hızı, enerji yoğunluğu parametresi içerisinde



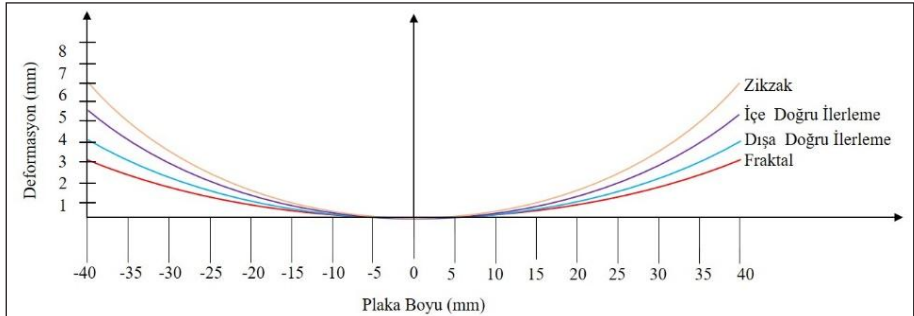
oldukça önemli bir faktördür. Daha önce bahsedildiği üzere lazer enerji yoğunluğu, bir katmanın taranması sırasında malzemenin hacmi başına uygulanan ortalama enerjinin bir ölçüsüdür. Lazer enerji yoğunluğu, enerji girişini ölçen ve parçanın yüzey kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Artırılmış bir lazer gücü, daha yüksek hızlarda ergime oluşmasına ve ısı penetrasyonunun daha derine ulaşmasına olanak sağlamaktadır. Tarama hızının artırılması, ısının yükselmesi için ihtiyaç duyulan zamanın kısılması, ergiyik havuzunun daralması ve Isı Etkisi Altında Kalan Bölge (ITAB)'nin küçülmesine yol açmaktadır [50]. Sonuç itibarıyla tarama hızının artırılması yoğunluğun azalmasına sebebiyet vermektedir. Tarama hızı ve lazer gücü arasında istenilen mekanik özellikler ve yüzey hassasiyetine yönelik parametreleri değiştirerek bir optimum noktanın bulunması gerekmektedir [51].

2.3.4 Tarama Deseni

Tarama deseni, lazer ışınının katman üzerinde ilerleme şeklini ifade etmektedir. Farklı tarama desenleri, parçaların geometrik ve mekanik özellikleri üzerinde etki meydana getirmektedir. Şekil 5'te görüldüğü üzere farklı tarama desenleri mevcuttur. Tarama modelinin uygun seçilmesi artık gerilmelerin (Residual Stress) ve termal etkiden kaynaklanan herhangi bir bozulmanın meydana gelme olasılığını azaltmaktadır. Yüzey deformasyonu ve süreksizlik açısından, Şekil 5.a.'da yer alan fraktal tarama deseni, en düşük yüzey deformasyonu ve süreksizlik oluşturan modeldir. Aynı değerlendirme



Şekil 5. Tarama Desenleri a. Fraktal, b. Dışa Doğru İlerleme, c. İçe Doğru İlerleme, d. Zikzak [52]



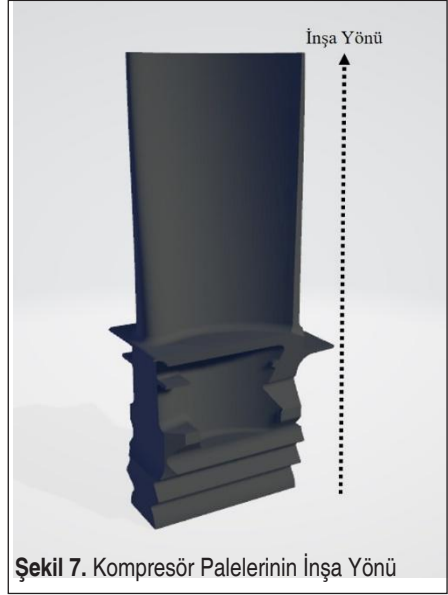
Şekil 6. Tarama Desenlerine Bağlı Olarak Oluşan Yüzey Deformasyonları (çarpıklıklar) [53]

erevesinde, Şekil 5.b.'de yer alan dışa doğru ilerleme (Off-Set Out) deseni ikinci sırada, Şekil 5.c.'de yer alan içe doğru ilerleme (Off-Set In) deseni unc sırada ve Şekil 5.d.'de yer alan zikzak deseni ise dördüncü sırada yer almaktadır.

Şekil 6'da tarama desenlerine bağlı olarak dış düzlem distorsiyonları (deformasyonları) görülmektedir. Burada "0" noktası plakanın orta noktasını ifade etmekte olup, bu noktadan pozitif ve negatif yöne doğru distorsiyonların olduğu görülmektedir.

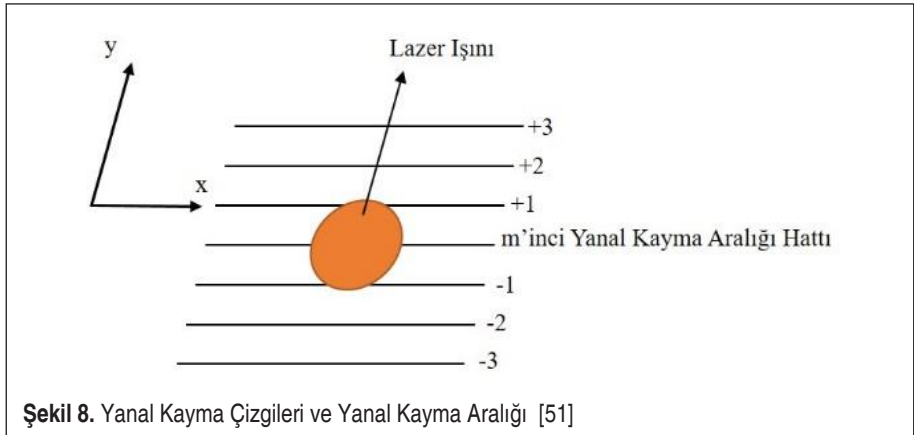
2.3.5 İnaŐa Yn

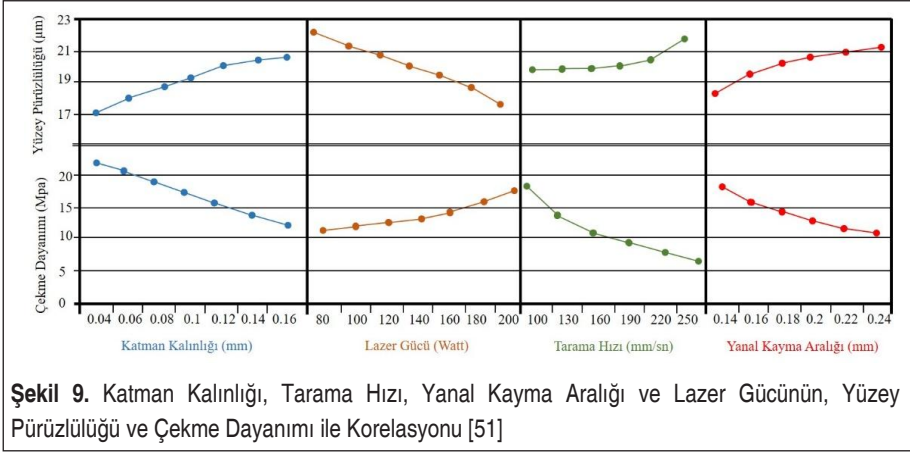
İnaŐa yönü, parçanın uzunlamasına ekse- ni ile dikey eksen arasındaki dar aıdır. Parçanın inşa yönü, aynı katman üzerinde farklı soğuma oranları oluŐturacađı için parçanın mikro yapısı ve mekanik özel- liklerini etkileyen bir faktördür. Dikey inşa yönünde daha iyi dayanım ve uzama değerleri elde edilmektedir. Genel olarak, dikey inşa yönünde daha iyi dayanım ve uzama değerleri elde edilmektedir [42, 54]. Şekil 7'de bu makaleye konu olan kompresör palelerinin inşa yönü grl- mektedir.



2.3.6 Yanal Kayma Aralığı

Yanal kayma aralığı, iki komŐu tarama çizgisi arasındaki mesafe olarak tanımlanmak- tadır. Diğer bir ifade ile katmanlar inşa edilirken, tarama desenleri arasındaki geçiŐ mesafesidir. Şekil 8'de grldğu üzere her iki çizgi arasındaki mesafedir. Üretim





geometrisi içerisinde lazer ışını x ekseninde ilerlemekte, yanal kayma aralığı kadar y eksenine geçmekte ve yeniden x ekseninde rotası boyunca ilerlemektedir.

Bu mesafe, lazer ışınlarının üst üste geldiklerinde lazer gücüne bağlı olarak enerji dağılımı ve dolayısıyla sürekli sinterleme yapılan bölgenin oluşumunda etkili olmaktadır.

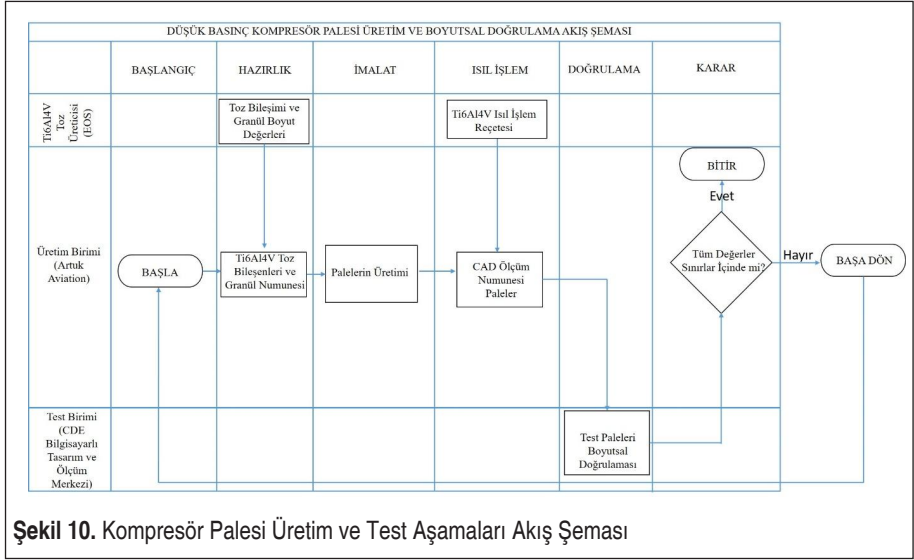
Genel değerlendirmede; Şekil 9'da görüldüğü üzere yüzey pürüzlülüğü katman kalınlığı, tarama hızı ve yanal kayma aralığı ile pozitif korelasyon; lazer gücü ile negatif korelasyon içerisinde. Benzer bir kıyaslama çekme dayanımı için de yapılmıştır. Çekme dayanımı katman kalınlığı, tarama hızı ve yanal kayma aralığı ile negatif korelasyon; lazer gücü ile pozitif korelasyon içerisinde.

3. KOMPRESÖR PALELERİNİN ÜRETİM SÜRECİ

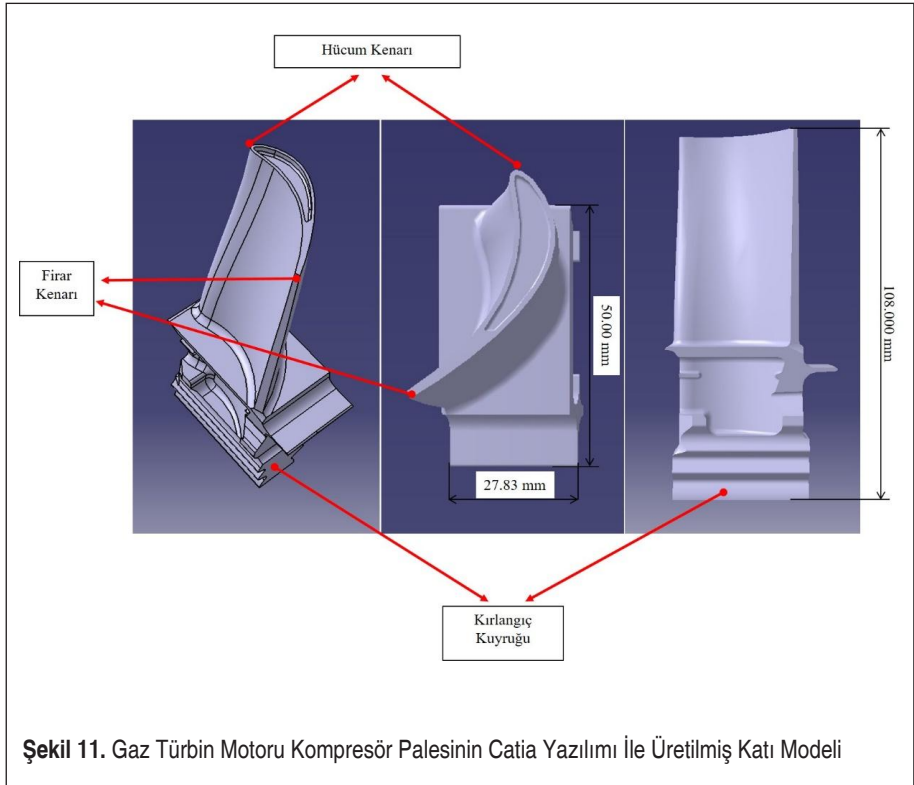
Şekil 10'da üretim ve test sürecinin akış şeması sunulmaktadır. Söz konusu şemada üretime yönelik toz ve tezgâh parametreleri, üretimin gerçekleşeceği birim ve bağımsız test biriminde gerçekleşmesine yönelik iş adımları yer almaktadır.

Şekil 11'de, EÜ-DMLS yöntemi ile Ti6Al4V toz kullanarak EOSM290 tezgâhında üretimi gerçekleştirilen palelerin, Catia (Dassault Systèmes, Fransa) bilgisayar destekli tasarım yazılımı ile üretilen katı model görülmektedir. Söz konusu katı modelin üretiminde, halen gaz türbin motorlarının kompresör bölgesinde kullanılan palelerin boyutsal ölçüleri esas alınmıştır.

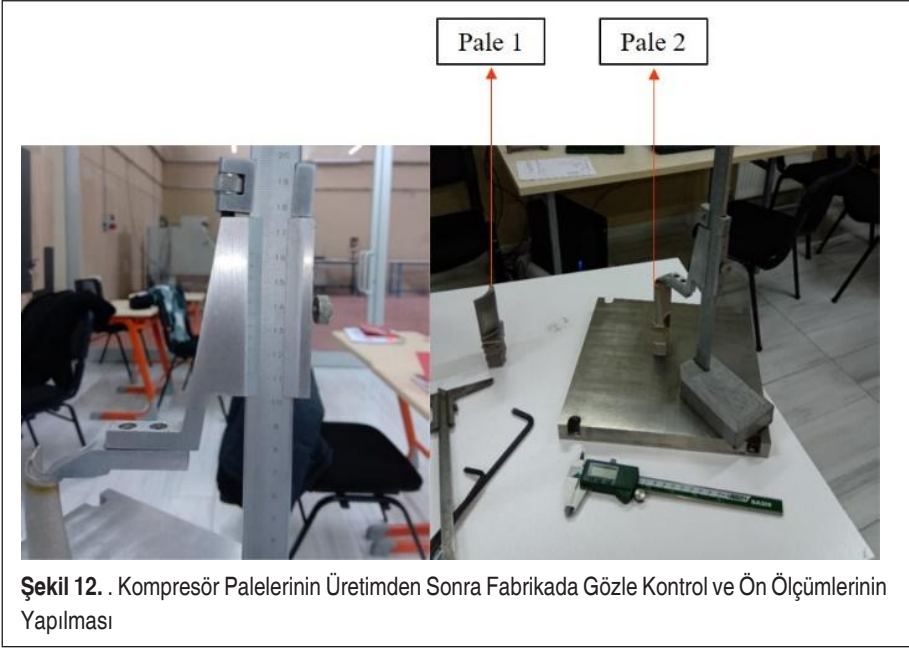
Üretim parametreleri olarak katman kalınlığı 60µ, lazer gücü 200 Watt ve hacimsel enerji yoğunluğu 9 mm³/sn değerleri kullanılmıştır. Tarama deseni olarak dışa doğru ilerleme parametresinin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 7,5 saat süren üretimden sonra Şekil 12'de görüldüğü üzere, ön ölçümler ve gözle kontrol (visual inspection) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10. Kompresör Palesi Üretim ve Test Aşamaları Akış Şeması



Şekil 11. Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesinin Catia Yazılımı İle Üretilmiş Katı Modeli



Şekil 12. . Kompresör Palelerinin Üretimden Sonra Fabrikada Gözle Kontrol ve Ön Ölçümlerinin Yapılması

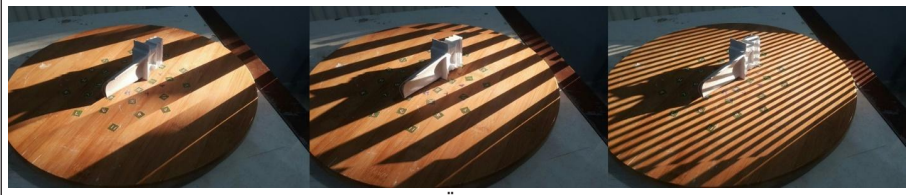
Ön ölçümlerin olumlu sonuç vermesinin ardından, ısıl işlem yapılması safhasına geçilmiştir. Üretici firmadan, Ti6Al4V alaşımının sinterleme sonrasında yapısında ardıl işlem olarak alınan öneriler ve yapılan kaynak taramaları [55,56,57] sonucunda fırın kontrol panelinden, 2 saat içinde oda sıcaklığından (22 ± 2 °C), 800°C'ye kadar, 2 saat 800 °C'de tutulması ve ardından da aynı seyir ile soğutulması sağlanmıştır. Proses sırasında, fırın haznesinde argon gazı kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Boyutsal Doğrulamaya Yönelik Fotogrametrik Tabanlı Veri Seti Elde Etme Yöntemi

Üretim safhasının tamamlanmasının ardından, bu analiz çalışmasının odağında bulunan boyutsal doğrulama aşamasına geçilmiştir. Söz konusu doğrulama işlemi için, 1 μ hassasiyetle ölçüm yapabilen Breuckmann Smartsan3D (Breuckmann GmbH, Almanya) tezgahı kullanılmıştır. Kamera ile yapılan ölçüm öncesinde, palelerin yüzeylerindeki parmak izi gibi kalıntıların arındırılması amacıyla kimyasal temizleme işlemi yapılmıştır. Şekil 13'te görüldüğü üzere, paleler sırayla geometrik doğrulama işlemi için bir döner tabla üzerine yerleştirilmiştir.

Söz konusu ölçüm tezgâhının çalışma prensibi EÜ için üretilen 3 boyutlu katı model ile üretilmiş olan parçanın geometrik kıyaslamasının yapılması esasına dayanmakta-



Şekil 13. Kompresör Palelerinin Smartscan 3D Ölçüm Cihazında Geometrik Doğrulama Verilerinin Alınması

Tablo 1. Fotogrametrik Analizlere Yönelik Elde Edilen Veriler

#	1 Nu'lu Pale Basınç Yüzü	2 Nu'lu Pale Basınç Yüzü	1 Nu'lu Pale Basınç Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi	2 Nu'lu Pale Basınç Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi	1 Nu'lu Pale Emme Yüzü	2 Nu'lu Pale Emme Yüzü	1 Nu'lu Pale Emme Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi	2 Nu'lu Pale Emme Yüzü Kırılmaç Kuyruğu Bölgesi
1	-0,0627	-0,0725	-0,072	-0,1117	0,0435	-0,2204	-0,0422	-0,1141
2	-0,0682	-0,0805	-0,1511	-0,1361	-0,007	0,0275	-0,053	-0,1223
3	0,0201	-0,015	-0,1525	-0,134	-0,1067	-0,1273	0,0284	-0,0053
4	-0,1697	-0,1543	0,2177	0,2177	-0,1172	-0,1194	0,0398	0,0276
5	0,0041	-0,0399	0,2397	0,3269	-0,1075	-0,122	-0,0272	-0,0793
6	-0,1709	-0,1549	-0,1286	-0,1136	-0,1086	-0,1122	-0,1558	-0,1775
7	-0,1392	-0,1314	-0,1032	-0,1076	0,1231	0,0335	-0,1354	-0,1509
8	-0,0054	-0,007	-0,175	-0,2005	-0,1078	-0,1882	-0,0877	-0,0995
9	0,153	0,1449	0,0288	-0,0075	-0,1431	-0,1553	0,1818	0,0181
10	0,2733	0,3124	-0,0865	-0,1404	0,0331	0,0537	0,1678	-0,0476
11	-0,1471	-0,1725	-0,0009	-0,041	-0,1644	-0,1326	-0,098	-0,0624
12	-0,1465	-0,2004	0,0037	-0,0575	0,1195	0,1235	-0,1081	-0,0777
13	0,1188	0,115	0,0908	0,0492	0,0501	0,0323	-0,103	-0,0725
14	0,1323	0,1042	-0,0157	-0,0984	0,0604	0,038	-0,1153	-0,0949
15	0,0707	0,0621	-0,1582	-0,1267	0,0331	0,0522	-0,1169	-0,0791
16	0,0415	0,0133	-0,1478	-0,1627	0,1058	0,0858	-0,104	-0,0946
17	0,081	0,1051	-0,0772	-0,1475	0,1433	0,157	-0,0883	-0,0879
18	0,0517	0,0705	0,3061	0,3308	0,1737	0,2197	0,636	0,1034
19	-0,1567	-0,1585	0,2651	0,3133	0,2734	0,3017	0,2418	0,3094
20	-0,1665	-0,1464	-0,0808	-0,0984	-0,057	-0,0611	0,1496	0,0439
21	-0,0786	-0,0978			-0,0953	-0,0971	0,0797	0,0322
22	0,1596	0,1466			-0,1276	-0,0895	0,0837	0,0293
23	0,0029	-0,0092						



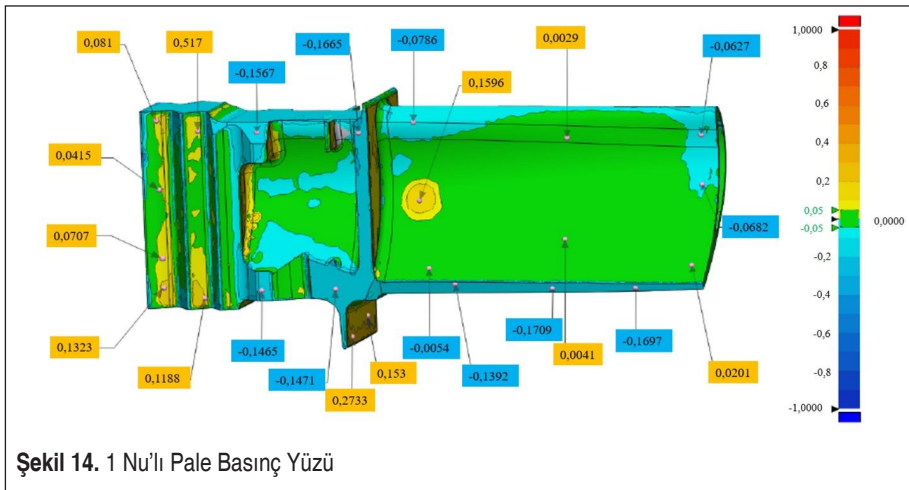
dır. Benzer bir pale üzerinde yapılan boyutsal doğrulama çalışmasında basınç yüzeyinden 57, emme yüzeyinden 57 olmak üzere toplam 114 adet noktadan elde edilen verinin karar verme sürecinde yeterli mesnet sağladığı gözlemlenmiştir [21]. Bu çalışmada, Tablo 1’de görüldüğü üzere toplam 174 adet veriden oluşan bir doğrulama veri seti elde edilmiştir. Söz konusu veriler, palelerin basınç yüzü üzerinden 23 adet, basınç yüzü kırlangıç kuyruğu bölgesinden 20 adet, emme yüzü üzerinden 22 adet ve emme yüzü kırlangıç kuyruğu bölgesinden 22 adet olmak üzere her bir pale için toplam 87 noktadan gerçekleştirilmiştir. Mavi renkte olan değerler katı modele kıyasla negatif; turuncu renkli olanlar ise pozitif değişimleri göstermektedir. Toplamda 103 adet negatif değişim ve 71 adet pozitif değişim görülmektedir.

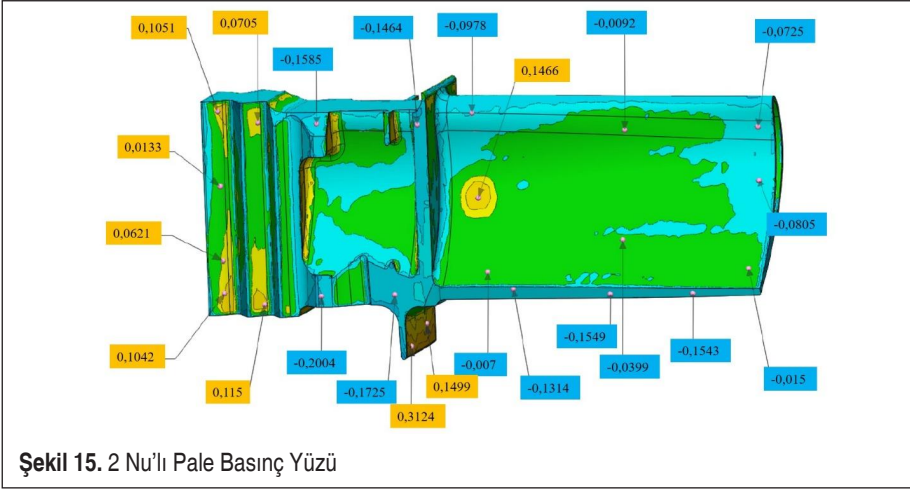
4.2 Fotogrametrik Analiz Sonuçları

Boyutsal doğrulama için 3 boyutlu katı model referans olarak kullanılmıştır. Ölçümler her iki pale için de aynı noktalardan yapılmıştır.

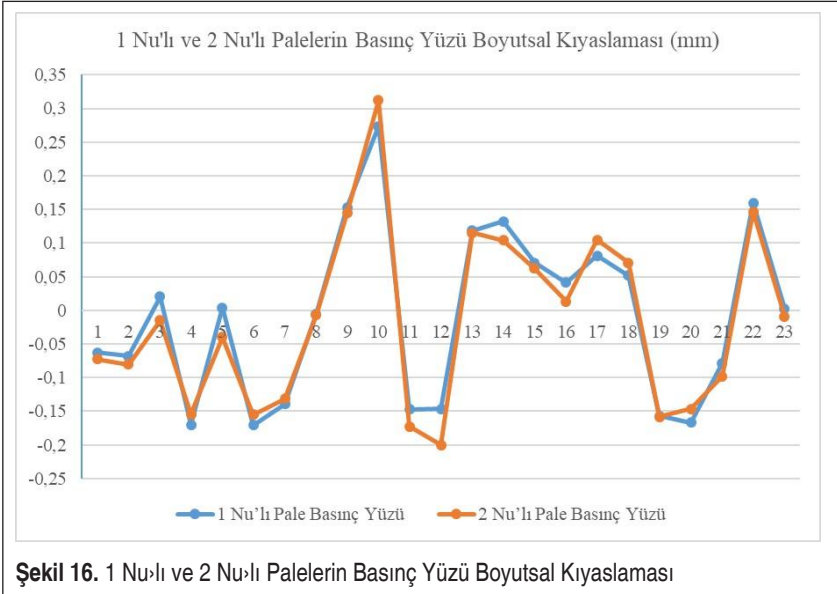
Smartscan3D ölçüm tezgâhında yapılan incelemeler sonucunda elde edilen veriler, palenin içbükey basınç yüzeyi (pressure surface) ve dışbükey emme yüzeyi (suction surface), verilerin gösterdiği değişime bağlı olarak renk skalasında büyüklük göstergesi olarak ifade edilmektedir.

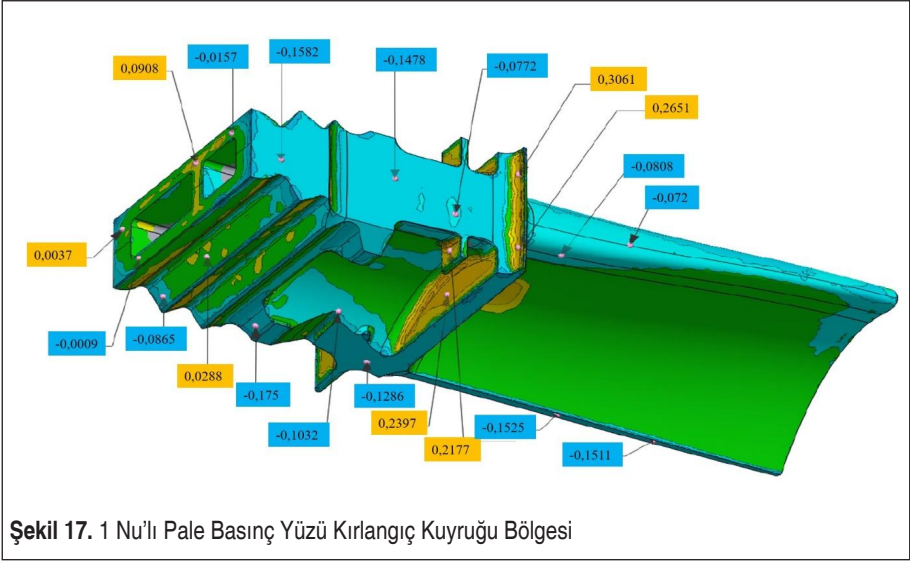
Büyüklük göstergesi sütununda sarı ve kırmızı pozitif sapmayı (Expansion), mavi ise negatif sapmayı (Shrinkage) temsil etmektedir. Değişim ne kadar fazla olursa, renk o denli koyulaşmaktadır. İki palede yer alan renk dağılımının uyumu, üretim stratejisinin doğruluğu hakkında ipuçları vermektedir. Yeşil alanlar katı model ile palelerin ölçülerinin $\pm 0,05$ mm limiti dâhilinde olduğunu gösteren yerlerdir. Şekil 14’te 1. Nu’lu pale ve Şekil 15’te 2 Nu’lu palelerin basınç yüzlerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur.





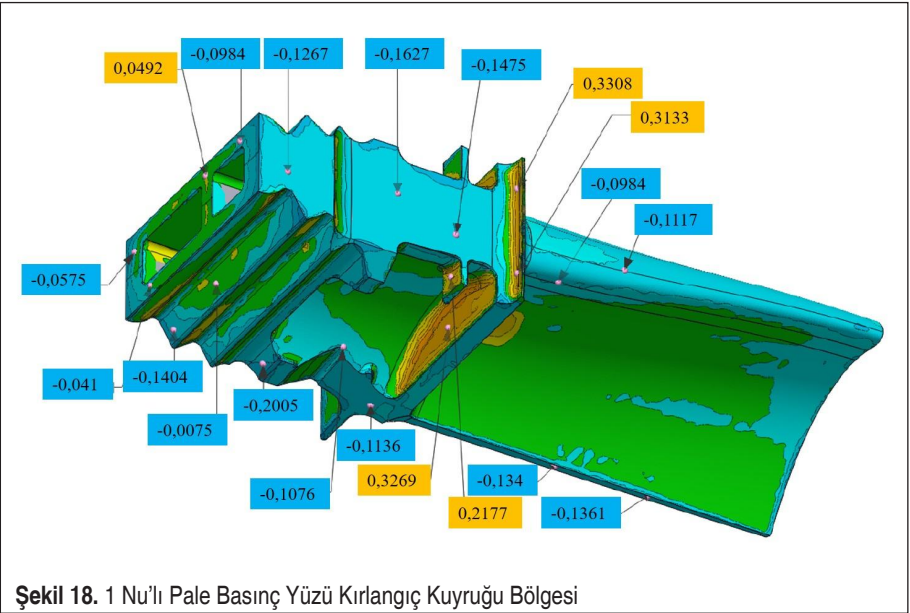
Palelerin basınç yüzleri üzerinde gerçekleştirilen 46 adet ölçümden, 25 adet negatif değişimin ortalaması 0,11923 mm, 21 adet ise pozitif değişimin ortalaması ise 0,103953 mm olarak gerçekleşmiştir. Şekil 16' da yer alan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu'lu palelerin basınç yüzlerinin geometrik olarak birbirlerine çok yakın bir profile sahip olduğu görülmektedir. Yapılan hesaplama sonucunda her iki palenin basınç yüzünde gerçekleşen ortalama değişim 0,007117 mm (7,117 μ) olarak belirlenmiştir.

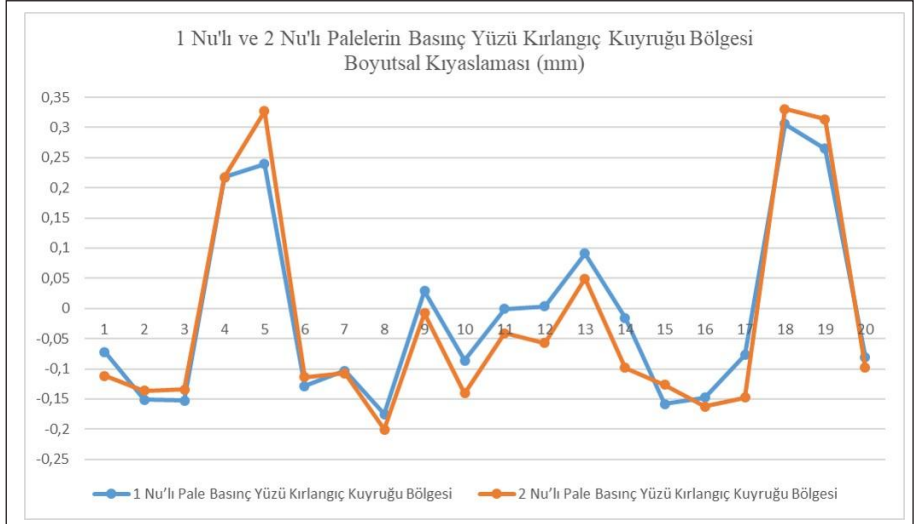




Şekil 17’de 1 Nu’lu pale ve Şekil 18’de 2 Nu’lu palelere ait basınç yüzü kırlangıç bölgelerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur.

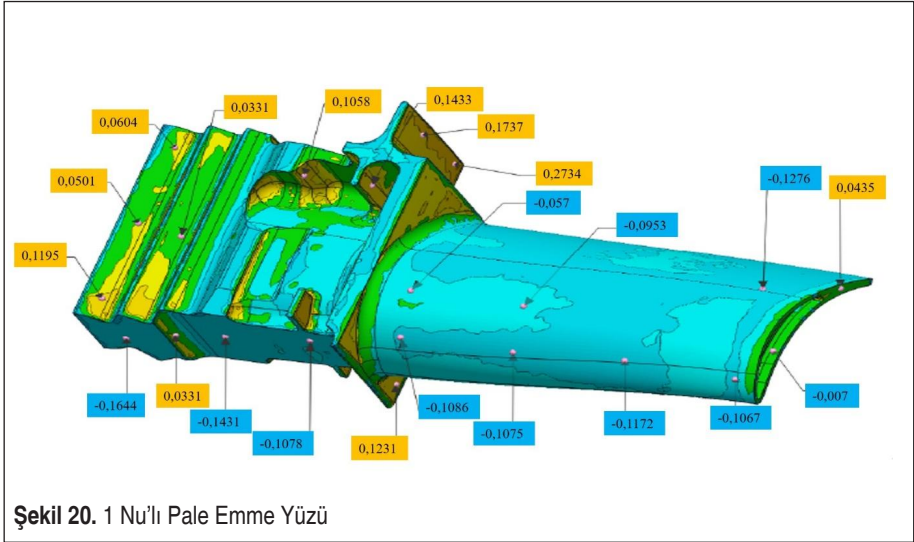
Şekil 19’ da sunulan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu’lu paleye ait basınç yüzü kırlangıç bölgelerinin geometrik olarak birbirlerine çok yakın bir profi-



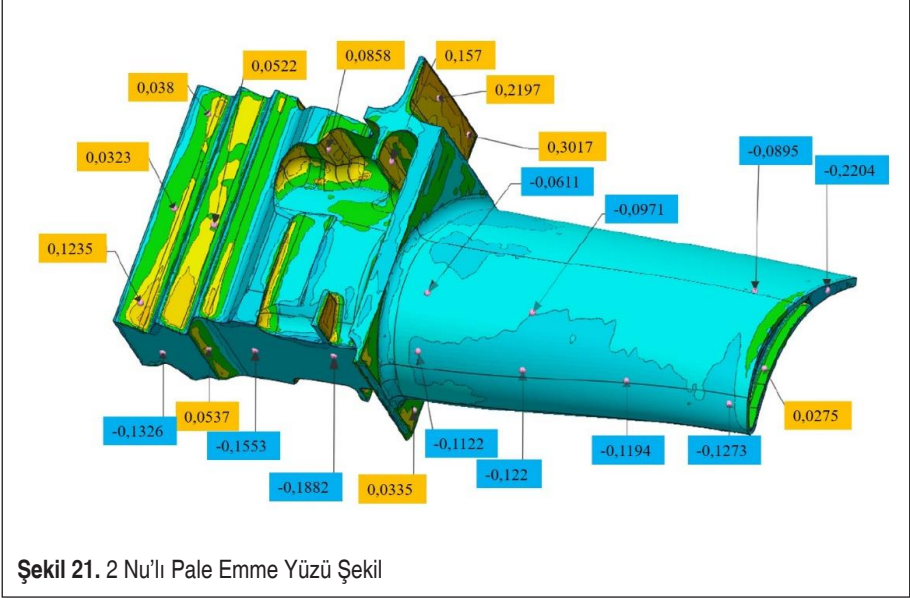


Şekil 19. 1 Nu'lu ve 2 Nu'lu Palelerin Basınç Yüzü Kırlangıç Kuyruğu Bölgesi Boyutsal Kıyaslaması

le sahip olduğu görülmektedir. Palelerin basınç yüzü kırlangıç bölgesi üzerinde elde edilen verilere göre; 40 adet ölçümden, 28 adet negatif değişimin ortalaması 0,10833 mm, 12 adet pozitif değişimin ortalaması ise 0,19915 mm olarak gerçekleşmiştir. Her iki palenin basınç yüzü kırlangıç bölgelerinde meydana gelen değişim 0,012405 mm (12,405 μ) olarak gerçekleşmiştir.

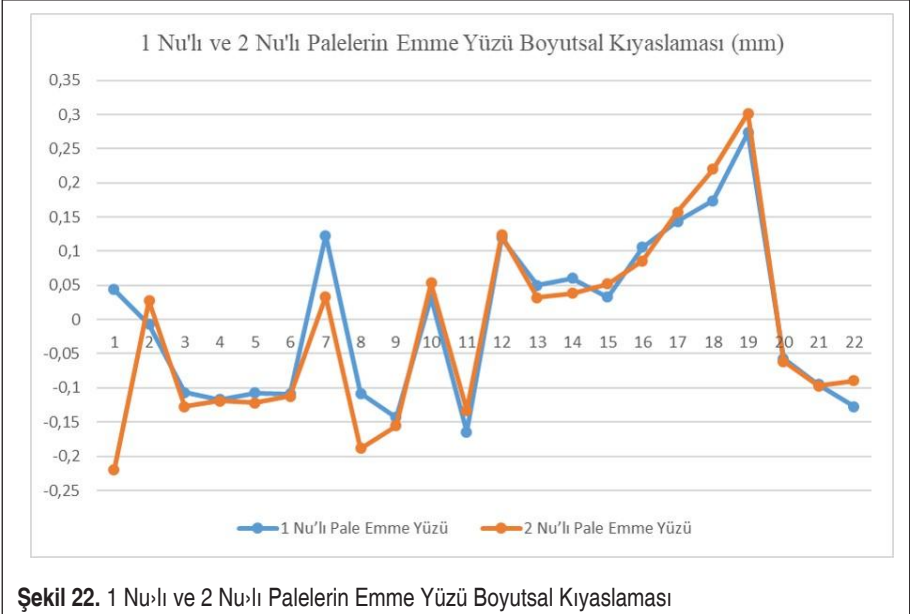


Şekil 20. 1 Nu'lu Pale Emme Yüzü

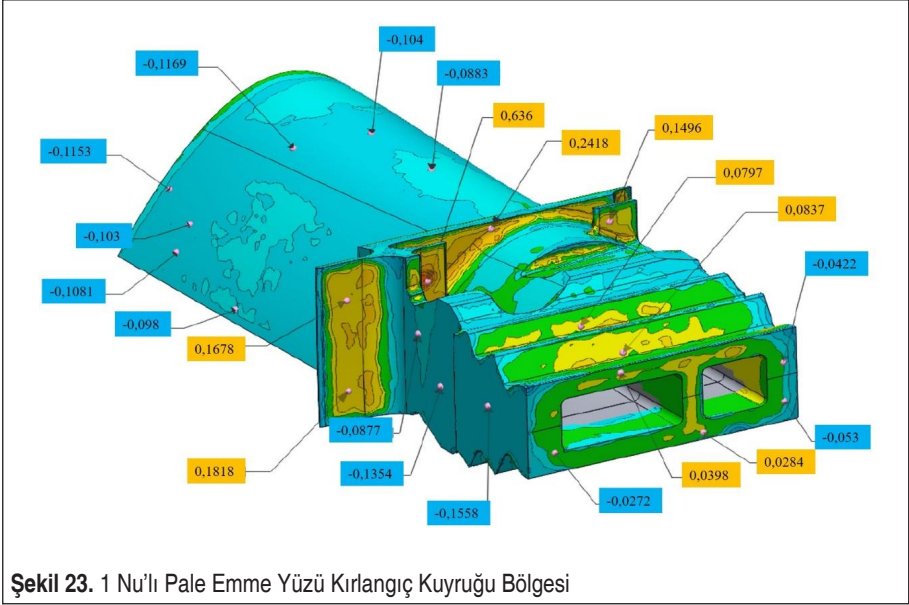


Şekil 21. 2 Nu'lu Pale Emme Yüzü Şekil

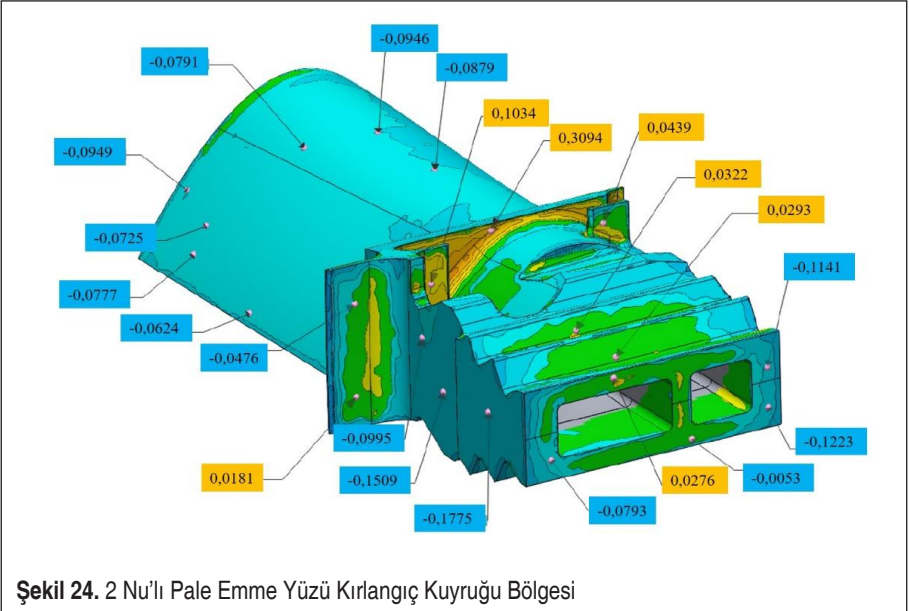
Şekil 20'de 1 Nu'lu pale ve Şekil 21'de 2 Nu'lu paleye ait emme yüzü bölgelerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur. Şekil 22'de sunulan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu'lu paleye emme yüzü bölgelerinin geometrik olarak birbirlerine çok yakın bir profile sahip oldukları görülmektedir.

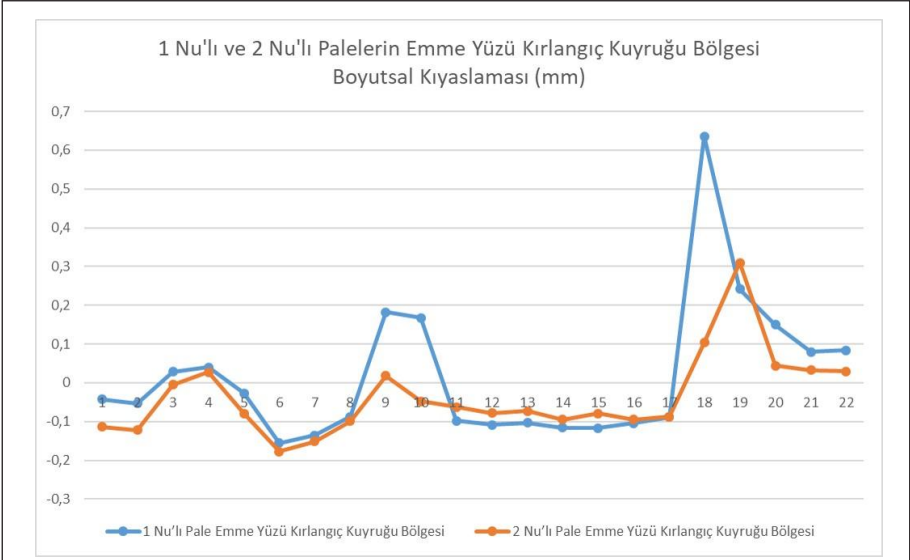


Şekil 22. 1 Nu'lu ve 2 Nu'lu Palelerin Emme Yüzü Boyutsal Kıyaslaması

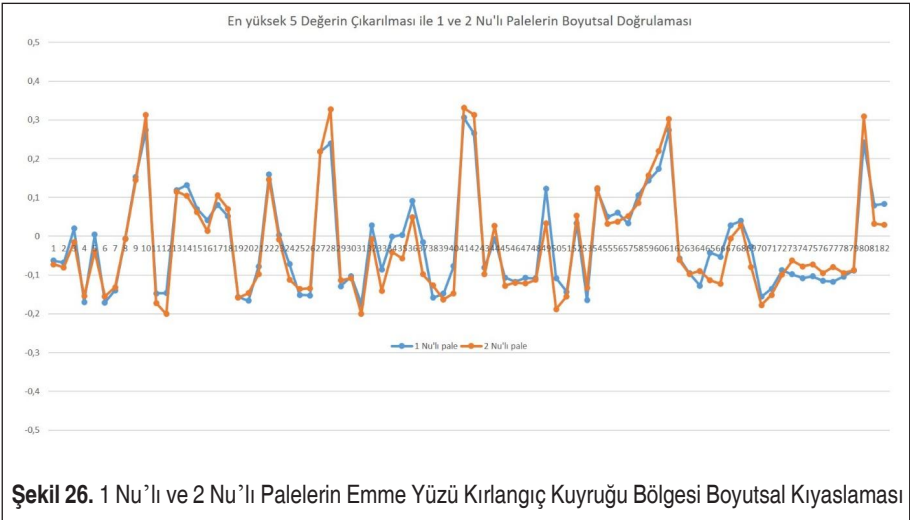


Palelerin emme yüzü üzerinde elde edilen verilere göre; 44 adet ölçümden, 22 adet negatif değişimin ortalaması 0,1167 mm, 22 adet pozitif değişimin ortalaması ise 0,103814 mm olarak gerçekleşmiştir. Her iki palenin basınç yüzü kırlangıç bölgele-
rinde meydana gelen değişim 0,013873 mm (13,873 μ) olarak gerçekleşmiştir.





Şekil 25. 2 Nu'lu Pale Emme Yüzü Kırlangıç Kuyruğu Bölgesi



Şekil 26. 1 Nu'lu ve 2 Nu'lu Palelerin Emme Yüzü Kırlangıç Kuyruğu Bölgesi Boyutsal Kıyaslaması

Şekil 23'te 1 Nu'lu pale ve Şekil 24'de 2 Nu'lu palelerin emme yüzü kırlangıç bölgelerine ait fotogrametrik ölçümler sunulmuştur.

Palelerin emme yüzü kırlangıç bölgesi üzerinde elde edilen verilere göre; 44 adet ölçümden, 28 adet negatif değişimin ortalaması 0,09288 mm, 14 adet pozitif değişimin ortalaması ise 0,155179 mm olarak gerçekleşmiştir. Her iki palenin basınç yüzü

kırlangıç bölgelerinde meydana gelen değişim 0,050159 mm (50,159 μ) olarak gerçekleşmiştir. Şekil 25'te sunulan kıyaslama grafiğinde görüldüğü üzere 1 ve 2 Nu'lu paleye ait emme yüzü kırlangıç kuyruğu genel itibarıyla geometrik olarak birbirlerine yakın bir profile sahip olduğu gözlemlenmektedir.

İki geometri arasındaki farkın en büyük olduğu 5 değer 4'ü emme yüzeyi kırlangıç kuyruğu bölgesinde sırasıyla 0,5326 mm, 0,2154 mm, 0,1637 mm ve 0,1057 mm ile 1 tanesi de emme bölgesi yüzeyinde 0,2639 mm olarak belirlenmiştir. Bu değerler hesaplamadan çıkarıldıktan sonra edilen grafik Şekil 26'da sunulmuş olup bu durumda, değişim değeri ortalama 0,007596 mm (7,59 μ) olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bir gaz türbin motoru kompresör palelerinin üretimi ve boyutsal doğruluğunun belirlenmesine yönelik çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki verilmiştir.

- Genel boyutsal kıyaslamada, negatif değişim gösteren 103 ölçümde ortalama 0,10634 mm ve pozitif değişim gösteren 71 ölçümde ortalama 0,127173 mm (127,173 μ) mm olarak değişim görülmüştür.
- Negatif değişim en düşük 0,0009 mm, en yüksek 0,2204 mm olarak belirlenmiştir. Pozitif değişim ise 0,0029 mm en yüksek 0,636 mm olarak belirlenmiştir. Palelerin birbirine ortalama 0,02187 mm (21,87 μ) değerinde yakınsadığı hesaplanmıştır.
- Ölçümlerde, katı modele oranla, 1 Nu'lu palede ortalama +0,0944/-0,0809 mm arasında, 2 Nu'lu palede ortalama +0,1093/-0,0978 mm değişim olduğu belirlenmiştir.
- Pozitif ve yüksek değerli farklılıkların palelerin eğimli (Curved) yüzeylerinden daha ziyade düz (Flat) bölgelerinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun dikey inşa yönünde EÜ karakteristiklerinin daha kararlı sonuçlar vermesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
- Her iki palenin katı modele göre kıyaslamasında $\pm 0,05$ mm limiti dâhilinde olduğu yeşil bölgelerin fazla olması üretimde tutarlılık açısından bir gösterge olarak nitelendirilmektedir.
- Müşteri talepleri doğrultusunda söz konusu veriler limit dâhilinde kabul edilmesi mümkündür. Ayrıca başka bir çalışmada tamamen mukavemet değerlerine odaklanarak deneyler gerçekleştirilmesi uygun olacaktır.
- Ortaya çıkan boyutsal farklılıkların bertaraf edilmesi ve istenen boyutsal değerlerde parça imalatı için katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı, yanal kayma kalınlığı gibi parametrelerin tezgâh ile uyumlu olarak optimize edilmesi ve enerji yoğunluğu eşitliğini esas alarak üretim gerçekleştirilmesi önerilmektedir.



- Bir hipotez olarak, daha sonraki üretimlerde, bu üretim sırasında desen olarak kullanılan dışa doğru ilerleme (Off-Set Out) yerine, fraktal desenin seçilmesinin Şekil 6’da verilen yüzey deformasyonlarının minimize edilmesi açısından fayda sağlayacağı ön görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Artuk Aviation Ltd. Şti tarafından ilk ürün kontrolü çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde verilen destek için Artuk Aviation Ltd. Şti.’ne teşekkür ederim.

KAYNAKÇA

1. **Peter, S.** 2003. “Gas turbine technology”, *Physics Education*, vol: 38, p. 504-511, DOI:10.1088/0031-9120/38/6/002
2. **Mitsubishi, T., Masashi K.** 2014. “Making Lighter Aircraft Engines with Titanium Aluminum Blades”, *IHI Engineering Review*, vol:47, p. 10-13
3. **Burgi, Y. P., Caillet, M., & Haefeli, S.** 2002. “Field temperature measurements at Erta’Ale Lava Lake, Ethiopia”, *Bulletin of Volcanology*, vol: 64, p. 472-485. doi:10.1007/s00445-002-0224-3
4. **Ma, F., Cao, W., Luo, Y., Qiu Y.** 2016. “The review of manufacturing technology for aircraft structural part”, *Procedia CIRP*, vol: 56, p. 594–598, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.117>.
5. **Noh, H.M., Benito A., Alonso G.** 2016, “Study of the current incentive rules and mechanisms to promote biofuel use in the EU and their possible application to the civil aviation sector” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol: 46, p. 298–316, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.04.007>.
6. **Kenaroğlu, Y.** 2010. “Hava Araçlarının Uçuşa Elverişlilik Sertifikasyonu”. *Mühendis ve Makina*. 52, 614, 16-28.
7. **Saraçyakupoğlu, T.** 2020. *Emniyet İrtifasından Bilgiler: Genel Havacılık, Üretim ve Bakım Süreçleri*. ISBN: 978-625-402-030-8, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
8. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM), 2018, “Havacılıkta Parça ve Cihaz Sertifikasyonu Rehber Dokümanı”, p. 14
9. **Şöhret Y., Ekici S., Altuntaş Ö., Hepbaşlı A., Karakoç T.H.** 2016, “Exergy as a useful tool for the performance assessment of aircraft gas turbine engines: A key review”, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol: 83, p. 57-69, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.03.001>
- 10 **Zhang, L., & Chen, L.** 2019. “A Review on Biomedical Titanium Alloys: Recent Progress and Prospect”. *Advanced Engineering Materials*. Vol: 21, p. 1-29, doi:10.1002/adem.201801215

11. **Shuhui, H., Yingying, Z., Debin, S.** 2013. "Application of thermohydrogen processing to Ti6Al4V alloy blade isothermal forging". *Materials Science and Engineering: A*, Vol: 561, p. 17–25. doi:10.1016/j.msea.2012.10.056
12. **Zhuang, J.-R., Lee, Y.-T., Hsieh, W.-H., & Yang, A.-S.** 2018. "Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti-6Al4V powder". *Optics & Laser Technology*, vol: 103, p. 59–76. doi:10.1016/j.optlas-tec.2018.01.013
13. **Greitemeier, D., Palm, F., Syassen, F., & Melz, T.** (2017). Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting. *International Journal of Fatigue*, Vol: 94, p. 211–217. doi:10.1016/j.ijfatigue.2016.05.001
14. **Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J.** 2017. "Aerospace applications of laser additive manufacturing". *Laser Additive Manufacturing*, p. 351–371. doi:10.1016/b978-0-08-100433-3.00013-0
15. **Han, P.** 2017. "Additive Design and Manufacturing of Jet Engine Parts". *Engineering*, vol:3(5), p. 648–652. doi:10.1016/j.eng.2017.05.017
16. **Xu, X., Lu, Y., Li, S., Guo, S., He, M., Luo, K., Lin, J.** 2018. "Copper-modified Ti-6Al4V alloy fabricated by selective laser melting with pro-angiogenic and anti-inflammatory properties for potential guided bone regeneration applications". *Materials Science and Engineering: C*, vol: 90, p. 198–210. doi:10.1016/j.msec.2018.04.046
17. **Urtekin, L., Keleş, Ö.** 2019. "Biyomedikal Uygulamalar İçin TiN Kaplı Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması". *Savunma Bilimleri Dergisi*. vol: 18 (2), pp. 91-108. DOI: 10.17134/khosbd.642142
18. **Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos R., Mortágua, J. P.** 2016. "Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components". *Procedia Structural Integrity*, Vol: 1, p. 289–296. doi:10.1016/j.prostr.2016.02.039
19. **Farooq, M.U., Ali, M.A., He, Y., Khan, A.M., Pruncu, C.I., Kashif, M., Ahmed, N., Asif, N.** 2020. "Curved profiles machining of Ti6Al4V alloy through WEDM: investigations on geometrical errors". *Journal of Materials Research and Technology*, vol: 9 (6), p. 16186-16201, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.067>
20. **Garmendia, I., Flores, J., Madarieta, M., Lamikiz, A., Uriarte, L.G., Soriano, C.** 2020. "Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts." 11th CIRP Conference on Photonic Technologies. 7-10 Eylül 2020, Almanya.
21. **Li, M., Li, J., Yang, D., He.** 2020. Dimensional Deviation Management for Selective Laser Melted Ti6Al4V Alloy Blade". *Frontiers in Materials*. vol:7, p.1-10
22. **Annamaria, G., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M.** 2019, "Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review", *Journal of Manufacturing Systems*, vol: 53, p. 124-149, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
23. **Saracıkupoğlu, T.** 2019. "Havacılık Endüstrisinde 3 Boyutlu Üretim Uygulamalarının Uçuşa Elverişlilik Kural ve Düzenlemelerine Göre Değerlendirilmesi", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol: 4, p. 53-65



24. **Yusuf S.M., Cutler S., Gao N.** 2019. "Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry.", *Metals*, Vol: 9, p. 1286, doi:10.3390/met9121286
25. **Gibson, I., Rosen, D., Stucker B.** 2015. "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", ISBN 978-1-4939-2112-6, DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3, Springer, New-York
26. **Yamanaka, K., Saito, W., Mori, M., Matsumoto, H., Chiba, A.** 2015. "Preparation of weak-textured commercially pure titanium by electron beam melting", *Additive Manufacturing*, vol: 8, p.105–109, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.addma.2015.09.007>
27. **Barroqueiro, B., Andrade-Campos, A., Valente, R.A.F.** 2019. "Designing Self Supported SLM Structures via Topology Optimization" *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol:3, p. 68, <https://doi.org/10.3390/jmmp3030068>
28. **Rizzo, A., Goel, S., Luisa, G.M., Iglesias, R., Jaworska, L., Lapkovskis, V., Novak, P., Postolnyi, B.O., Valerini, D.** 2020. "The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review.", *Materials*. vol: 13, p. 1377, <https://doi.org/10.3390/ma13061377>
29. **Poyraz, Ö., Kuşhan M.C.** 2018. "Havacılık Komponentlerinin Bakım Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanımı.", *Mühendis ve Makina*, Vol. 59 (691), p. 59-69
30. **Ateş, H., Düzgün M.** 2020. "İnsansız Hava Araçları (İHA) Temel Bilgiler ve Kullanım Alanları", p. 144, ISBN: 978-625-406-738-9 Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara
31. American Society for Testing and Materials (ASTM) 1472, Standard Specification for Wrought Titanium -6Aluminum -4Vanadium Alloy (UNS R56400) for Surgical Implant Applications
32. American Society for Testing and Materials (ASTM) 2924, Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
33. **Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I.A., Espinosa, M.M., Domínguez, M.** 2019. "Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects", *Complexity*, Vol: 2019, p.30, <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
34. **Liu, S., Shin, Y.C.** 2019. "Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review", *Materials and Design*, Vol:164, p. 107552, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
35. **Wang, M., Lin, X., Huang W.** 2016. "Laser additive manufacture of titanium alloys", *Materials Technology*, Vol: 31, p. 90-97, DOI: 10.1179/1753555715Y.0000000079
36. **Körner, C.** 2016. "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review", *International Materials Reviews*, Vol: 61, p. 361-377, DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289
37. **Herzog, D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C.** 2016. "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, Vol: 117, p. 371-392, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
38. **Becker, T., Mathias, B., Cornie, S.** 2015. "Microstructure and mechanical properties of direct metal laser sintered TI-6AL-4V". *South African Journal of Industrial Engineering*,

vol. 26. P. 1-10. 10.7166/26-1-1022.

39. **Zhu, J., Zhou, H. Wang, C., Zhou L., Yuan S., Zhang W.** 2021. “A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges”, Chinese Journal of Aeronautics, Vol: 34, Issue 1, p. 91-110, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>
40. **Shamsdini, S., Shakerin, S., Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., Mohammadi, M.** 2020. “A trade-off between powder layer thickness and mechanical properties in additively manufactured maraging steels”. Materials Science and Engineering: A, vol: 776, p. 139041. doi:10.1016/j.msea.2020.139041
41. **Shi, X., Ma, S., Liu, C., Chen, C., Wu, Q., Chen, X., Lu, J.** 2016. “Performance of High Layer Thickness in Selective Laser Melting of Ti6Al4V”, Materials , vol:9, p. 975, <https://doi.org/10.3390/ma9120975>
42. **Mierzejewska, Ż.A., Hudák, R., Sidun, J.** 2019, “Mechanical Properties and Microstructure of DMLS Ti6Al4V Alloy Dedicated to Biomedical Applications”, Materials, vol: 12, p.176, <https://doi.org/10.3390/ma12010176>
43. **Agius, D., Kourousis, K.I., Wallbrink, C.** 2018, “A Review of the As-Built SLM Ti-6Al-4V Mechanical Properties towards Achieving Fatigue Resistant Designs”, Metals, Vol: 8, p. 75, <https://doi.org/10.3390/met8010075>
44. **Poyraz, Ö., Kuşhan, M.C.** 2017. “Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi “, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol: 33, 729-742, DOI:10.17341/gazimmfd.416479
45. **Sola, A., Nouri, A.** 2019. “Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion”, Vol: 1, p. 10021, DOI: 10.1002/amp2.10021
46. **Bandyopadhyay A., Bose S.** 2020. “Additive Manufacturing”, ISBN: 978-1-138-60925-9, Taylor & Francis Group, New-York
47. **Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E.** 2016. “Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones”, Acta Materialia, Vol: 108, p.36-45, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.014>
48. **Vilardell, A.M., Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Albu, M., Takata, N., Kobashi, M., Krakhmalev, P., Koupryanoff, D., Kothleitner, G., Plessis, A.D.** 2020. “Manufacturing and characterization of in-situ alloyed Ti6Al4V(ELI)-3 at.% Cu by laser powder bed fusion”, Additive Manufacturing, Vol:36, p. 101436, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101436>
49. **Guo, Q., Zhao, C., Qu, M., Xiong, L., Escano, L.I., Hojjatzadeh, S.M.H., Parab, N.D., Fezzaa, K., Everhart, W., Sun, T., Chen, L.** 2019. “In-situ characterization and quantification of melt pool variation under constant input energy density in laser powder bed fusion additive manufacturing process”, Additive Manufacturing, Vol:28, p. 600-609, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.021>



50. **Kusuma, C., Ahmed, S.H., Mian, A., Srinivasan R.** 2017. “Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Commercially Pure Titanium (CP-Ti)”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol: 26, p. 3560–3568, <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2768-6>
51. **Yu, N.** 2005. *Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*, Doktora tezi, National University of Singapore, Singapur
52. **Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S.M.** 2015. “An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control”, *Additive Manufacturing*, vol:8, p. 12-35, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002>
53. **Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J., Huang, W.** 2011. “Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)”, *Materials Science and Engineering: A*, vol: 528, p. 1094-1104, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.078>
54. **Guzanová, A., Ižaríková, G., Brezinová, J., Živčák, J., Draganovská, D., & Hudák, R.** 2017. “Influence of Build Orientation, Heat Treatment, and Laser Power on the Hardness of Ti6Al4V Manufactured Using the DMLS Process”, *Metals*, Vol: 7(8), 318. doi:10.3390/met7080318
55. **Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., 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*, Vol: 48, p. 300–307. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
56. **Flower, H. M.** 1995. “High performance materials in Aerospace”. ISBN: 978-94-010-4296-3. DOI:10.1007/978-94-011-0658-6. Springer. Londra, İngiltere.
57. **Malefane, L.B.** 2019. “Determination of the fatigue properties of Ti6Al4V (ELI) parts built by a direct metal laser sintering system with standard process parameters followed by post-processing treatments”, Central University of Technology, Free State