



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TABLA MERKEZİNE FARKLI
UZAKLIKLARDA ELEKTRON IŞINI
ERGİTME (EBM) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
Ti6Al4V PARÇALARININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

SERPİL TABAK MEMİÇ
(523222984)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Bilçen MUTLU MİTİL

İSTANBUL, 2024

TEŞEKKÜR

Tez alıőması sűresince her tűrlű konuda desteęini, tecrűbesini, bilgisini ve sabrını esirgemeyen deęerli hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa KURT ve danıőmanım Sayın Dr. Őęr. Őyesi Bilen MUTLU MİTİL hocalarıma;

Tűm yaőamım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bugűnlere gelebilmemi saęlayan sevgili Aileme;

Çalıőmam sűresince benden dostluęunu ve desteęini eksik etmeyen hayat arkadaőım sevgili eőime;

Her zaman yanımda olduklarını bildiğim ve desteklerini hissettiğim arkadaőlarıma, hocalarıma ve çalışma arkadaőlarıma;

Teőekkűrlerimi ve saygılarımı sunarım.

EYLŪL, 2024

Serpil TABAK MEMİ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	1
2.1. Titanyum.....	1
2.1.1. Titanyum Kullanım Alanları	1
2.2. Titanyum Alaşımları.....	2
2.3. Eklemeli İmalat Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklerde Etkisi	5
2.3.1. Mikroyapı ve gözeneklilik.....	5
2.3.2. Lazer gücünün etkisi.....	6
2.3.3. Tarama hızının etkisi	7
2.3.4. Katman kalınlığının etkisi	7
2.3.5. İnşa yönü ve tarama deseni etkisi.....	7
3. EKLEMELİ İMALAT	9
3.1. Eklemeli İmalat Tarihi.....	9
3.2. Eklemeli İmalatın Kullanım Alanları	12
3.3. Elektron Işını Ergitme (EBM).....	13
3.3.1. EBM yönteminin avantajları	14
3.3.2. EBM yönteminin dezavantajları ve sınırlamalar	15

3.4.	EBM Yöntemi ile Üretim	16
3.4.1.	EBM yöntemi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri.....	16
3.5.	EBM Yöntemi ile Üretimde İnşa Yönü Belirlenmesi	18
4.	DENEYSEL PLAN.....	19
4.1.	Deneysel Prosedür	19
4.2.	İşlem Parametreleri.....	21
4.3.	Tarama Stratejisi.....	23
4.4.	Numunelerin Üretimi.....	25
4.4.1.	Elektron ışını ergitme yöntemi ile üretilen yorulma numuneleri	27
4.5.	Çekme – Basma Yorulma Testi.....	28
4.5.1.	Cihazın temel bileşenleri	31
4.5.2.	Testin parametreleri.....	31
4.5.3.	Uygulama alanları.....	31
4.5.4.	Çekme - basma yorulma testinin avantajları	32
4.6.	EBM Yöntemi ile Üretilen Numunelerin Yorulma Testi Değerleri	32
5.	SONUÇ	35
5.1.	Yüzey Kalitesinin Etkisi:.....	37
5.2.	Anizotropik Özellikler:.....	38
5.3.	Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu:.....	38
KAYNAKLAR.....		39

ÖZET

TABLA MERKEZİNE FARKLI UZAKLIKLARDA ELEKTRON IŞINI ERGİTME (EBM) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti6Al4V PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Titanyum ve alaşımları, üstün mekanik özellikleri nedeniyle birçok sanayi dalında tercih edilen malzemeler arasındadır. Yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu ve en önemlisi korozyona olan direnci gibi özellikleri nedeni ile sektörde tercih edilmektedir. Ancak, titanyum malzemenin tedarik ve işleme zorlukları nedeni ile çok güç elde edilmektedir. Gelişen eklemeli imalat teknolojileri, karmaşık parçaların toz hammadde kullanılarak üretilmesini mümkün kılmıştır ve günümüzdeki araştırmalar bu yeni teknolojiler üzerine yoğunlaşmaktadır. Eklemeli üretim olarak isimlendirilen bu yöntem tasarımcılara geleneksel yöntemlerle üretilmiş parçalardan daha iyi mekanik özelliklere ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimine imkân tanımaktadır. Özellikle hava araçlarında kullanımı artış gösteren bu yöntemle ilgili araştırmacıların çok sayıda çalışmalar yaptığı görülmektedir.

Araştırmacıların yaptığı çalışmalarda, ürünün üretim yönlerine göre dayanım ve bazı özelliklerinin değişiminin belirlendiği çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda elektron ışını ergitme yöntemi kullanılarak X, Y ve Z ekseninde üretilen çekme numunelerinin testlerinde “Z” eksenindeki üretilen numunelerin diğer yönlerde üretilenlere nazaran dayanımlarının yüksek olduğu belirlenmiş olduğundan bu çalışmada “Z” ekseninde üretim gerçekleştirilmiştir [7].

Numunelerin tabla merkezinden uzaklıkları yorulma ömrüne etkileri çalışmada incelenmiştir. Çekme – basma yorulma dayanımı test cihazında yorulma ömrü deneyi gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün mekanik özelliklere etkisini incelemek amacıyla, üretilen parçaların bir kısmının yüzeyinden talaş kaldırılmıştır. Talaş kaldırılmamış ve talaş kaldırılmış numuneler, yorulma ömrü açısından karşılaştırılmıştır.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V PARTS PRODUCED WITH ELECTRON BEAM MELTING (EBM) AT DIFFERENT DISTANCES TO THE TABLE CENTER

Titanium and its alloys are among the materials preferred in many industries due to their superior mechanical properties. Properties such as high strength, low density, and most importantly, resistance to corrosion make them preferred in the sector. However, titanium is very difficult to obtain in the market due to supply and processing challenges. Developing additive manufacturing technologies has made it possible to produce complex parts using powder raw material, and current research focuses on these new technologies. This method, referred to as additive manufacturing, allows designers to produce parts with better mechanical properties and more complex geometries than those produced by traditional methods. Especially in the case of aerospace applications, the use of this method has increased, and many studies have been conducted by researchers on this subject.

In studies conducted by researchers, it has been observed that the strength and some properties of the product change depending on the production directions. In these studies, it has been determined that the tensile specimens produced along the Z-axis using the electron beam melting method exhibited higher strength compared to those produced in other directions, and therefore, production in this study was carried out in the Z-axis direction [7].

The effects of the distance of the specimens from the center of the build plate on fatigue life were examined in the study. Fatigue life tests were carried out on a tensile-compression fatigue testing device. To investigate the effect of surface roughness on mechanical properties, some of the produced parts were machined. Both machined and unmachined specimens were compared in terms of fatigue life.

KISALTMALAR

AL	: Alüminyum
BSS	: Bağlı Standart Sapmalar
C	: Karbon
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
E	: Uzama
EBM	: Elektron Işını Ergitme
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
HCF	: Yüksek Döngü Yorulma
HIP	: Sıcak İzostatik Presleme
LOF	: Füzyon eksikliği
L-PBF	: Lazer Bazlı Toz Yatak Füzyon
Mo	: Molibden
N	: Nitrojen
Nb	: Niyobyum
O	: Oksijen
Sn	: Kalay
Ta	: Tantalum
Ti	: Titanyum
UTS	: Nihai Çekme Mukavemeti
V	: Vanadyum
YS	: Akma Mukavemeti
Zr	: Zirkonyum

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Titanyum malzemenin kristal yapılarının şematik gösterimi [18]	2
Şekil 2.2 Titanyum alaşımlarının faz diyagramları [19]	3
Şekil 2.3 Makinede numune oryantasyonu şeması.....	4
Şekil 2.4 Farklı tarama desenleri: (a) ızgara, (b) çift yönlü, (c) dışa doğru kaçıklık, (d) içe doğru kaçıklık, (e) fraktal [37].....	8
Şekil 3.1 Toz yataklı metal eklemeli imalat örneği	9
Şekil 3.2 Elektron ışını ergitme yönteminin şematik hali [69].....	15
Şekil 3.3 Üretim eksenlerine göre numuneler ve yerleri [7]	18
Şekil 4.1 Üretilen numuneler ve yerleşimleri (a): 360mm çapta yerleştirilmiş 12 adet numune. (b): 360mm çapta yerleştirilmiş 24 adet numune. (c): 360mm çapta yerleştirilmiş 24 adet numune.....	20
Şekil 4.2 Çekme -basma deneyleri için standart deney boyutları (Eklemeli imalat)	20
Şekil 4.3 Katman katman oluşturma işlemi için bir örnek [76].....	25
Şekil 4.4 (a) Düzensiz şekilli boşluklar (yani füzyon eksikliği) ve dairesel gözenekler (yani sıkışmış gaz) (b) hapsolmuş gaz nedeniyle oluşan gözenek, (c) Füzyon eksikliği kusuru ve (d) Füzyon eksikliği kusurlarından çatlakların başlaması.	26
Şekil 4.5 Üretim Destekleri	27
Şekil 4.6 EBM Yöntemi ile Üretilen Ham Numuneler	28
Şekil 4.7 EBM Yöntemi ile Üretilen Çekme Bölgelerinden Talaş Kaldırılan Numuneler	28
Şekil 4.8 Standart eklemeli imalat eksen sistemi ile yapı platformunda örneklerin yerleşimi [26].....	29
Şekil 4.9 Test Kurulum Görüntüsü.....	30
Şekil 4.10 “A” Numuneleri için Gerilme – Yorulma Ömrü Eğrisi	32
Şekil 4.11 “B” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Eğrisi	34

Şekil 5.1 “A” ve “B” Numune Grubu için Gerilme – Yorulma Ömrü Eğrisi	35
Şekil 5.2 “A” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Grafiği	36
Şekil 5.3 “B” Numuneleri için Gerilme – Yorulma Ömrü Grafiği	37



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Titanyumun fiziksel özellikleri	1
Tablo 2.2 Titanyum alaşımlarının çeşitli sınıflarının özellikleri	3
Tablo 3.1 Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (ASTM F42 Standartları) .	12
Tablo 3.2 Numune özellikleri	17
Tablo 4.1 Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi [22]	21
Tablo 4.3 Wafer süreci için üretim parametreleri.....	21
Tablo 4.2 Eritme süreci için üretim parametreleri.....	22
Tablo 4.4 Ağ işleme için üretim parametreleri	23
Tablo 4.5 Ön ısıtma süreci için üretim parametreleri.....	24
Tablo 4.6 Yapı platformunda farklı konumlarda dikey olarak yönlendirilmiş numuneler için çekme sonuçları ve bağıl standart sapmalar (BSS) [26].....	30
Tablo 4.7 “A” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Değerleri	33
Tablo 4.8 “B” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Değerleri.....	34

1. GİRİŞ

Titanyum (Ti) ve alaşımları hammaddesinin tedarik sürelerinin uzun olması, işlenebilirliğinin maliyetli ve zor olması gibi dezavantajlarına rağmen; korozyona dayanıklılığı, yüksek mukavemet dayanımı, düşük yoğunluğu ve biyouyumluluğu yüksek olması gibi mekanik özellikleri sayesinde sanayinin birçok alanında tercih edilmektedir [1].

Eklemeli imalat, endüstride kısa tasarım döngüleri, düşük maliyet ve esneklik sunması nedeniyle önemli bir yer edinmiştir. Eklemeli imalat teknolojileri toz veya teli, odaklanmış bir ısı kaynağı tarafından belirli bir katı cisim oluşturmak için ertitilip soğutulması ve birbirlerine bu şekilde katman katman bağlanması esasına dayanır [2]. Saf metallerin istenilen özellikleri sağlayamamasından dolayı, eklemeli imalata en uygun malzeme özellikleri alaşımlı malzemelerdir. Titanyum alaşımları, özellikle Ti6Al4V, uygun mekanik özellikleri nedeniyle eklemeli imalatta sıklıkla tercih edilmektedir [1,3].

Eklemeli imalat yöntemlerinden "Elektron Işını Ergitme (EBM)", geleneksel yöntemlerle üretilen parçaların malzeme özellikleriyle karşılaştırıldığında, daha karmaşık parçaların üretilmesine olanak tanımaktadır. Eklemeli imalat konvansiyonel yöntemlerinde olduğu gibi malzeme çıkarma prensibine değil, malzeme ekleme prensibine dayanır [4,5,6].

Bu çalışmada elektron ışını ertitme yöntemi kullanılarak çekme testi için gerekli olan standartlar göz önünde bulundurularak farklı konumlarda bulunan numuneler için çekme testi uygulanacaktır. Numunelerin üretimi çalışmalarda yer alan bilgiler ışığında "Z" yönünde gerçekleştirilmiştir. Üretim yönü diğer çalışmalarla belirlenmiş ancak bu numunelerin tezgah merkezinden uzaklıklarının etkileri bu tez çalışmasında incelenmiştir [7].

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Titanyum

Titanyum (Ti), çeliğe göre yaklaşık %56 daha düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen yüksek özgül dayanım (çekme mukavemeti/yoğunluk) sunan bir malzemedir. 1950'lerden itibaren sanayide kullanılan titanyum, demirin yoğunluğunun yaklaşık yarısı kadar bir yoğunluğa (4.54 g/cm³) sahiptir. Ayrıca, titanyumun ısı iletkenliği demirin yaklaşık beşte biri kadardır (15.7 W/m·K) ve ergime sıcaklığı demirinkinden yaklaşık 130 °C daha yüksektir. Titanyum, karbon ve oksijen gibi elementlere karşı yüksek reaksiyon eğilimi gösteren bir malzemedir [8, 9].

2.1.1. Titanyum Kullanım Alanları

Yerkabuğundaki yaklaşık %0,6'lık konsantrasyonu ile titanyum, demir, alüminyum ve magnezyumun ardından dördüncü en bol metal olarak kabul edilir. Titanyum, kromdan (Cr) 20 kat, nikelden (Ni) 30 kat, bakırdan (Cu) 60 kat, tungstenden (W) 100 kat ve molibdenden (Mo) 600 kat daha fazla miktarda bulunmaktadır [10]. Titanyumun bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de sunulmuştur [11].

Titanyum metalinin endüstrideki kullanımı, yüksek dayanımı, düşük yoğunluğu (hafifliği), sağlamlığı, korozyona karşı yüksek direnç özellikleri sayesinde havacılık, uzay, denizcilik, biyomedikal ve otomotiv sektörleri gibi birçok alanda tercih edilmesini sağlamaktadır [11, 12, 13].

Tablo 2.1 Titanyumun fiziksel özellikleri

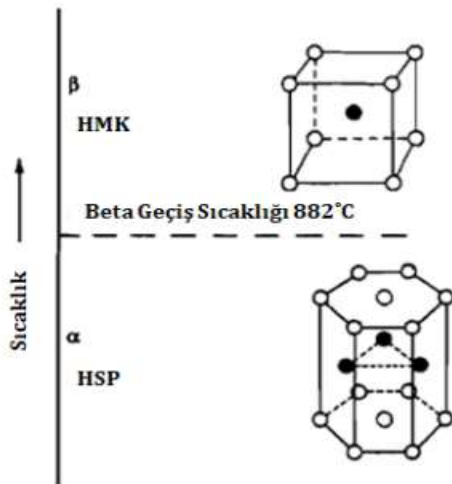
Element Adı	Atom Sembolü	Atom Numarası	Atomik Ağırlık	Yoğunluk (g/cm ³)	Kaynama noktası (°C)	Erime noktası (°C)
Titanyum	Ti	22	47.90	4.5	3130	1668

Günümüzde kullanılan en yaygın titanyum alaşımı olan Ti6Al4V, 1950'lerin ortalarında maksimum 300 °C çalışma sıcaklığıyla piyasaya sürüldü. Günümüzde bir titanyum alaşımının en yüksek kullanılabilir sıcaklığı 600 °C'nin hemen altındadır. Ancak, uygun soğutma tasarımı, kaplama yöntemleri veya termo kimyasal işlemlerle bu alaşımların maksimum çalışma sıcaklığı artırılabilir [10, 11].

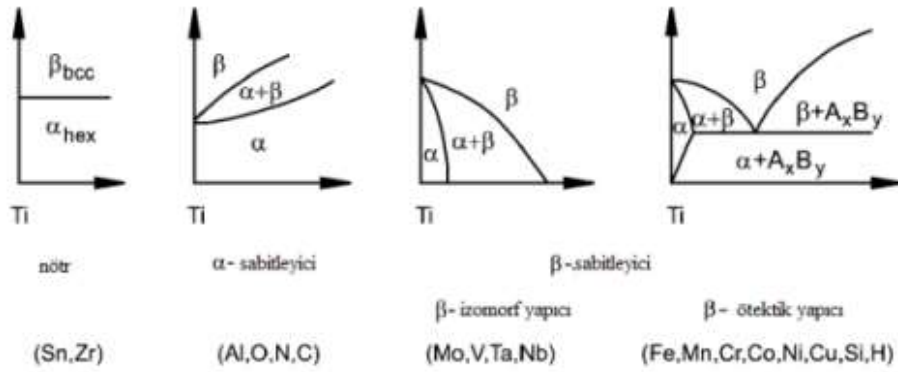
Titanyum, yüksek sıcaklıklarda çalışma gerektiren uçağın gövde ve kanat yapılarında, jet motorunun parçalarında ve uzay araçlarında sıkça kullanılan bir malzemedir. Ayrıca, biyouyumlu olması ve yüzeyde oluşan oksit tabakası sayesinde vücutta kararlı kalabilmesi ve korozyona direnç göstermesi nedeniyle biyomedikal uygulamalarda da vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Bu özelliklerinden dolayı, diz ve kalça protezleri ile diş implantları gibi tıbbi cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, titanyumun özelliklerinden yüksek özgül mukavemeti, çeşitli spor dallarında kullanılan ekipmanların yapımında tercih edilmesini sağlamıştır. Ancak, titanyumun yüksek maliyeti, genellikle yalnızca yüksek dayanıklılık ve güç gerektiren özel ürünlerde kullanılmasına yol açmıştır. Örneğin, otomotiv sektöründe de yarış araçlarının bazı parçalarında titanyum tercih edilmektedir [10, 12, 13].

2.2. Titanyum Alaşımları

Saf titanyumun oda sıcaklığındaki α -fazı, hegzagonal sıkı paket yapısına (HSP) sahiptir ve 882 °C'de β -fazına dönüşerek hacim merkezli kübik (HMK) yapıya geçer. α -fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al, O ve N gibi elementler dönüşüm sıcaklığını artırırken, β -fazı sabitleyicileri olarak bilinen V, Ta ve Nb gibi elementler bu sıcaklığı azaltır [8, 14, 15, 16, 17].



Şekil 2.1 Titanyum malzemenin kristal yapılarının şematik gösterimi [18]



Şekil 2.2 Titanyum alaşımlarının faz diyagramları [19]

Alaşım elementlerinin içeriği ve türüne göre sınıflandırılan titanyum alaşımları, çeşitli özelliklere sahip farklı kategorilere ayrılır. Bunlar arasında α ve yakın- α alaşımları, $\alpha + \beta$ alaşımları, β ve yakın- β alaşımları bulunmaktadır [20, 21].

2.2.1. Ti6Al4V Alaşımı

Ti6Al4V alaşımı, $\alpha+\beta$ fazlı bir alaşımdır. D şuk yoğunluğa sahip bu malzemeler, yüksek mukavemeti ve yüksek paslanma direncini çok yüksek sıcaklıklara kadar koruyabilmektedirler [8, 22, 23].

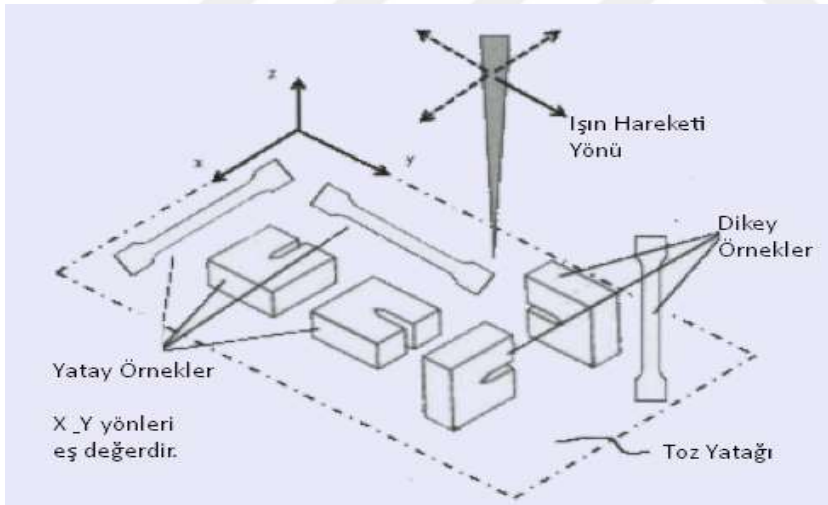
Tablo 2.2 Titanyum alaşımlarının çeşitli sınıflarının özellikleri

α alaşımı	Alaşımsız Titanyum Ti-5Al-2.5Sn	-Daha yüksek yoğunluk -Artan ısıl işlem yanıtı -Daha yüksek kısa süreli g� -Artan gerilme oranı hassasiyeti -Geliştirilmiş �retilebilirlik -Daha yüksek sürünme gücü -Gelişmiş kaynaklanabilirlik
yakın- α alaşım	Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	
$\alpha + \beta$ alaşımı	Ti-6Al-4V Ti-6Al-2Sn-6V	
β alaşımı	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-3Al-10V-2Fe	
yakın- β alaşımı	Ti-13V-11Cr-3Al Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	

Havacılık endüstrisinde sıkça kullanılan Ti6Al4V alaşımları, dövme ve döküm koşullarında çeşitli formlarda işlenebilir. Geleneksel yöntemde, Ti6Al4V bileşenleri dövme ve sıcak işleme yöntemleriyle üretilir. Bu alaşımın mekanik özellikleri, genellikle sıcaklık ve deformasyon hızından etkilenir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda deformasyon sırasında bu özellikler tanımlanır. Ti6Al4V alaşımı, çelik ve alüminyum alaşımlarına kıyasla sert plastik deformasyon gösterir. Gözenekli kalça eklemi diskleri gibi karmaşık parçaların geleneksel yöntemlerle üretilmesi, genellikle önemli bir talaşlı imalat süreci ve iş gücü gerektirir [24, 25].

Günümüz işleme teknolojilerinde, karmaşık Ti6Al4V parçalarının üretilmesi için daha basit ve ekonomik yöntemlere yönelik büyük bir talep bulunmaktadır. Eklemeli imalat, modern tekniklerden biri olarak, deformasyon, işleme ve kaynak gibi ara adımları ve kalıp gereksinimini ortadan kaldırarak üretim süresini büyük ölçüde azaltır [21, 24].

Edwards ve arkadaşları EBM ile üretilen Ti6Al4V numunelerinin ve bileşenlerinin yorulma özelliklerini araştırır. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi 6x20x200mm boyutlarında beş yatay yönlendirilmiş ve beş dikey yönlendirilmiş numune oluşturulmuştur.



Şekil 2.3 Makinede numune oryantasyonu şeması

Güç, 50 ila 3500 W arasında ayarlanmış, giriş parametreleri olarak 0,2–1,0 mm spot boyutu ve 3 m/s ışın hızı kullanılmıştır. İşlem, 700°C sıcaklıkta bir vakum odasında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin oluşturulmasının ardından herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır.

Testlerin sonuçları Tablo 2.4'te gösterilmektedir. Her iki yönde de mukavemet ve uzamalar, işlenmiş Ti6Al4V ve eklemeli imalat Ti malzemelerinin statik özellikleri üzerine yayınlanmış diğer çalışmalar için el kitabı değerlerinden daha düşüktür.

Tablo 2.3 EBM tarafından üretilen numunelerin çekme özellikleri [6]

	Nihai Çekme Mukavemeti (UTS) (MPa)		%0.2 Akma Mukavemeti (YS) (MPa)		Uzama %	
	Ortalama	Standart	Ortalama	Standart	Ort.	Std.
Yatay	833	22	783	15	2,7	0,4
Dikey	851	19	812	12	3,6	0,9

Erimiş tabakaların katılaşması ve soğutulması sırasında kalan gerilimi azaltmak ve gerilim giderme sonrası işlemi gerçekleştirmemek için üretim, yapı odasında yüksek sıcaklıkta yapıldı. Ancak, gözeneklilik veya yorulma ömrü söz konusu ise, yine de gerilim giderme ısıl işleminin gerekli olduğunu belirtmişlerdir [6].

Hrabe ve Quinn, EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V'nin mekanik özelliklerini yönlendirmenin etkilerini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlar, bildirilen nihai çekme mukavemeti (UTS) ve akma mukavemeti (YS) değerlerinin yönlendirmeden etkilenmediğini ortaya koydu (UTS: XY'de 1017-1030 MPa, Z'de 1009-1033 MPa, XY'de YS: 967-983 MPa, Z'de 961-984 MPa) ancak uzama X–Y yönünde %30 daha yüksektir (XY'de %12.2, Z'de %7.0-9.0) [4].

2.3. Eklemeli İmalat Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklerde Etkisi

2.3.1. Mikroyapı ve gözeneklilik

Galarraga ve arkadaşları, elektron ışını ergitme yöntemi kullanılarak üretilen Ti-6Al-4V -ELI alaşımı için mikroyapı ve gözeneklilik gibi özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada, çeşitli değişkenler, yönelimler ve yapı platformundan uzaklıklarla üretilen numuneler, bu değişkenlerin malzemenin içsel özellikleri ve performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek karakterize edilmiştir [26].

Yapı platformuna konumun ve mesafenin etkilerinin mikro yapıya olan etkileri incelenmiştir. Yapı platformunun merkezindeki ve kenarındaki örneklerin mikro yapıları arasında büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak, farklı yüksekliklerde hem tane büyüklüğünde hem de kafes kalınlığında küçük değişiklikler tespit edilmiştir. Yapı platformundan uzaklaştıkça, merkezde %47 ve kenarda %34 oranında kafes kalınlığının azaldığı görülmektedir. Ayrıca, kafes kalınlığı yapı platformundaki pozisyona göre değişir ve platformun merkezinde %30 daha düşük olmaktadır [26, 27, 28].

Kasperovich ve arkadaşlarının çalışmasında Ti6Al4V alaşımı kullanılarak işleme parametrelerinin gözeneklilik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Diğer bütün değerler sabit kaldığında gözenekliliğe en çok etki eden parametrenin tarama hızı, en az etki edenine ise yanal kayma mesafesi olduğu belirtilmiştir [29].

2.3.2. Lazer gücünün etkisi

Casalino ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada lazer gücü ve tarama hızının bazı mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bu çalışmaya göre 90 W'tan daha büyük lazer gücü ve 220 mm / s'den daha düşük hız olduğunda yoğunluğun %99'dan daha yüksek olduğu ve en iyi parça özelliklerini veren bir optimum alanın varlığından sözü edilmektedir [30].

Tablo 2.4 Ti6Al4V tozlarının optimum üretim parametreleri [29]

Üretim Parametreleri	
Tarama Hızı (mm/S)	200 – 1100
Lazer Gücü (W)	100 – 200
Yanal Kayma Mesafesi (μm)	40 – 180
Katman Kalınlığı (μm)	30

Toz için ışın akımına (2.5-3.5 mA) bağlı olarak elektron ışını ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımında mikro yapı evriminin deneysel ve teorik çalışmaları yapılmıştır. Faz bileşiminin dolaylı olarak ışın akımına bağlı olduğu ve 3 mA ışın akımında yüksek β faz içeriği (%7) olduğu belirlenmiştir.

Üretilen numuneler, işlenmiş Ti6Al4V alaşımına kıyasla yüksek mikro sertlikle karakterize edilmektedir. Mikro sertlik, ışın akımının uzunlamasına ve enine yönde artışıyla birlikte yükselmektedir. Eritilmemiş bölgeler, 2.5 mA ışın akımında üretilen örneklerin yapısında gözlemlenmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, erimiş havuzun ömrü ve boyutları, üretilen Ti6Al4V'nin mikro yapı gelişimini ve mekanik özelliklerini etkileyen ışın akımı ile artış göstermektedir [31, 32, 33].

2.3.3. Tarama hızının etkisi

Kempen ve arkadaşları tarafından yapılan lazer ergitme yöntemi çalışmasında, işleme parametreleri olarak 100 W lazer gücü, 30 µm katman kalınlığı, 150 mm/s tarama hızı ve 112 µm yanıl kayma mesafesi kullanılmıştır. Tarama hızı arttıkça yoğunluğun azaldığını ve bunun da sertlikte düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir [34].

2.3.4. Katman kalınlığının etkisi

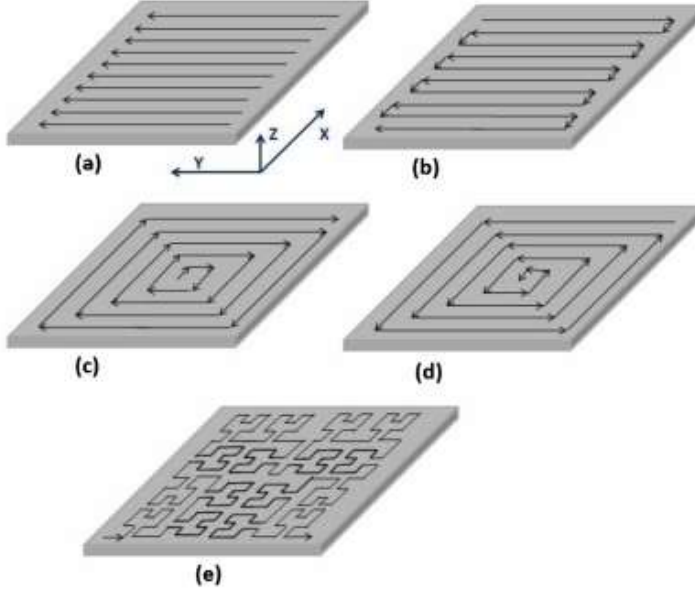
Basalah ve arkadaşlarının çalışmasında numunelerin gözenekliliği %17 ile 44 arasında, Young modülü 0,77–11,46 GPa arasında, ve akma mukavemeti, tabaka kalınlığı ve sinterleme sıcaklığı değiştirilerek 27-383 MPa arasında değişen bir değerdedir. 62,5, 87,5, 105, 125, 150 ve 175 µm olarak belirlenen katman kalınlığı değerleri ile varılan sonuç katman kalınlığı arttıkça Young modülü ve akma dayanımının azaldığı ve gözenekliliğin arttığını göstermektedir [35].

2.3.5. İnşıl yönü ve tarama deseni etkisi

Eklemeli imalatta kullanılan dört temel desen türü bulunmaktadır: ızgara deseni, çift yönlü desen, kaçıklık deseni ve fraktal desen. Kaçıklık ve fraktal desenler, daha düşük enerji tüketimi sağlar ve daha hassas geometrilere sahip parçaların üretimini mümkün kılar. Bu nedenle, diğer desen türlerine göre daha fazla tercih edilmektedir [36].

Çekme testine tabi tutulacak parçalar değerlendirildiğinde, çekme yönüne paralel üretilen parçaların, çekme yönüne dik üretilen parçalara kıyasla genellikle daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir [37].

Z eksenini boyunca yapılan parça üretiminde, katmanlar arasında lazerin geçiş süresi, X veya Y eksenleri boyunca gerçekleştirilen üretime göre daha uzun sürmektedir. Bu durum, Z eksenini boyunca üretimde daha yüksek soğuma oranlarına ve daha ince mikroyapılara yol açmaktadır [7, 37, 38, 39].



Şekil 2.4 Farklı tarama desenleri: (a) ızgara, (b) çift yönlü, (c) dışa doğru kaçıklık, (d) içe doğru kaçıklık, (e) fraktal [37]

Wauthle ve ekibinin çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının kurulum yönünün mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. 45° açıyla üretilen parçaların maksimum çekme ve akma dayanımlarının, yatay ve dikey yönlerde üretilen parçalara göre yaklaşık %35 daha düşük olduğu belirlenmiştir [40].

3. EKLEMELİ İMALAT

3.1. Eklemeli İmalat Tarihi

1980'li yıllarda geliştirilen eklemeli imalat, malzemenin eksiltilmesi yerine eklenerek parça üretimini sağlayan yenilikçi bir teknoloji olarak bilim dünyasında tanıtılmıştır. Başlangıçta, eklemeli imalatın potansiyelinin tam olarak anlaşılmasında nedeniyle yalnızca prototipleme amacıyla kullanılmaktaydı [41, 42]. Bu süreç, nihai ürüne ulaşmadan önce prototip üretme ve bu prototip üzerinde çeşitli testler gerçekleştirme aşamalarını içermektedir.

Hızlı üretim süreci ve genellikle prototip üretimi amacıyla kullanılması nedeniyle bu teknoloji ilk başta "Hızlı Prototipleme" olarak adlandırılmıştır [43, 44]. Eklemeli imalat ile üretilmiş bir örnek parça Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Toz yataklı metal eklemeli imalat örneği

Bilgisayar ortamında tasarlanan herhangi bir geometrinin kısa sürede, minimum malzeme kaybıyla ve ekonomik bir şekilde üretilebilmesi, yöntemi hızla endüstriyel pazarda en çok talep gören tekniklerden biri haline gelmiştir [45].

Eklemeli imalat teknolojileri, genellikle üç boyutlu (3B) yazıcı olarak bilinen hızlı prototipleme araçlarıyla ilişkilendirilir. Bu teknoloji, üç boyutlu tasarım dosyasından yararlanarak çeşitli malzemeleri katman katman ekleyip fiziksel bir nesne oluşturma yöntemidir.

Eklemeli imalat teknolojisi, talaşlı imalattan en belirgin farkı, malzeme çıkarmak yerine, malzemeyi katman katman ekleyerek üretim yapmasıdır. Bu süreçte, farklı form ve özellikteki malzemeler bir araya getirilerek istenen parça üretilir. Bu yöntem, zaman, üretim alanı ve iş gücü gereksinimlerinden tasarruf sağlarken, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesine olanak tanır [46].

Katmanlı üretim düşüncesi, eklemeli imalat terimi ortaya çıkmadan çok daha önceye dayanan bir yaklaşımdır. Kojima, 1952 yılında eklemeli üretimin avantajlarını ortaya koymuştur [47]. Ancak, eklemeli imalatın ticari olarak geliştirilmesi, bilgisayarlar, lazerler ve kontrol cihazlarındaki ilerlemelerle mümkün olmuştur. 1960-1980 yılları arasında Murutani (Japonya), Charles Hull (Amerika Birleşik Devletleri), ile Andre ve meslektaşları (Fransa) gibi bireysel patent başvuruları gerçekleştirilmiştir [48, 49].

Eklemeli imalat teknolojisinin temel ilkesi, geleneksel yöntemlerdeki karmaşık takım ve kalıp tasarımı gibi planlama süreçlerine gerek kalmadan, yalnızca bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile üretim yapabilmesidir [46].

Süreç, CAD modelinin ince dilimlere ayrılması ve bu katmanların üst üste birleştirilmesi prensibine dayanır. Katman kalınlığının azaltılması, geleneksel yöntemlerle üretilen parçalara daha yakın sonuçlar sağlar. Eklemeli imalat teknolojisi, çeşitli malzemeler için farklı üretim parametreleri sunar; bu nedenle ticarete kullanılan eklemeli imalat cihazları yöntem gereksinimleri kullanılan malzeme türüne göre değişir [50, 51, 52, 53]. Bu teknoloji, üretim ve ürün geliştirme süreçlerinde devrim niteliğinde bir yenilik olarak görülmekte ve yakın gelecekte yeni bir sanayi devriminin öncüsü olabilir [54]. Eklemeli imalatın geleneksel yöntemlerden en büyük farkı, yüksek tasarım özgürlüğü sunması ve karmaşık parçaların tek bir adımda üretilebilmesidir [47]. Örneğin, eklemeli imalat yöntemi kullanılarak 1000 parçadan oluşan bir roket bileşeni 100 parçaya düşürülmüştür [55].

Tasarım esnekliğinin yanı sıra eklemeli imalat teknolojileri, üretim süreçlerinde birçok avantaj sunmaktadır [46, 47, 56, 57]:

- Parçanın karmaşıklığının artırılması, üretim maliyetine önemli katkı sağlayan kalıp ve takım masraflarını ortadan kaldırabilir.

- Eklemeli imalat, birden fazla fonksiyonun tek bir parçada entegrasyonunu sağlar, bu da montaj süreçlerini basitleştirir ve maliyetleri düşürür.
- Malzeme ekleme yöntemi kullanıldığı için atık miktarı en aza indirilir.
- Yardımcı ekipman gerektirmeden yalnızca eklemeli imalat cihazıyla nihai ürünler üretilebilir.
- Karmaşık, boşluklu gibi tasarımlar üretilebilir.
- Geleneksel yöntemlerle üretilmiş bir parçanın ağırlığı, mekanik özelliklerde değişiklik olmadan azaltılabilir.
- Birden fazla malzeme türü tek bir işlemde üretilebilir.
- Üretilen parçanın kalitesi, cihaz ve parametrelere bağlı olup, operatör faktörünün kalite üzerindeki etkisi daha azdır.

Eklemeli imalatın diğer üretim yöntemlerine kıyasla bazı dezavantajları da vardır:

- Eklemeli imalatın parça büyüklüğü ve ölçeklenebilirliği, kullanılan teknolojiye ve ekipmanına bağlı olarak sınırlı olabilir. Büyük ölçekli üretimlerde, bu teknoloji genellikle geleneksel yöntemler kadar etkili olmayabilir.
- Eklemeli imalat sürecinde, özellikle yüksek ısı kaynakları kullanıldığında, malzemenin termal işleme maruz kalması nedeniyle iç gerilmeler ve deformasyonlar meydana gelebilir.
- Katman katman üretim nedeniyle, bazı eklemeli imalat yöntemlerinde yüzey pürüzlülüğü veya çizgilenme gibi estetik sorunlar oluşabilir. Bu, ek işlem gerektirebilir.
- Özellikle yüksek kaliteli ve büyük parçalar üretirken, eklemeli imalat teknolojisinin maliyeti yüksek olabilir. Malzeme maliyetleri ve ekipman maliyetleri, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha fazla olabilir [56, 58, 59].

Eklemeli imalat yöntemi ile polimer, seramik ve metal parçalar üretilebilmektedir ve kullanılan malzeme türü ile ekleme yöntemi gibi özelliklere göre gruplandırılmaktadır.

Eklemeli imalatın geleneksel yöntemlere kıyasla sağladığı birçok üstün özellik, yöntemlerin günümüzde yaygın olarak kullanılmasına olanak tanımıştır [43, 44, 60].

Tablo 3.1 Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (ASTM F42 Standartları)

YÖNTEM	UYGULAMA
MALZEME EKSTRÜZYONU	Malzemenin bir nozul veya kafa aracılığıyla katman katman dışarı çıkarılarak birleştirilmesi yöntemi.
TOZ YATAĞI FÜZYONU	Toz halindeki malzemenin bir lazer veya elektron ışını ile seçici olarak eritilerek katmanlar halinde birleştirilmesi yöntemi.
MALZEME PÜSKÜRTME	Sıvı malzemenin seçici olarak bir yüzeye damlatılarak katman katman birleştirilmesi yöntemi.
BAĞLAYICI PÜSKÜRTME	Toz yatağı üzerine yapıştırıcı bir sıvının püskürtülmesiyle katmanların birleştirilmesi yöntemi.
YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ DEPOZİSYONU	Malzemenin bir enerji kaynağı (lazer, elektron ışını vb.) kullanılarak doğrudan erime noktasında birleştirildiği yöntemdir.
TABAKA LAMİNASYON	Metal, kağıt veya plastik levhaların kesilip yapıştırılarak veya kaynaştırılarak katman katman birleştirildiği yöntemdir.
FOTOPOLİMERİZASYON	Sıvı fotopolimer reçinesinin bir ışık kaynağı (genellikle lazer veya UV ışığı) ile seçici olarak sertleştirilerek katman katman birleştirilmesi yöntemi.

3.2. Eklemeli İmalatın Kullanım Alanları

Eklemeli imalat, havacılık ve uzay endüstrisinde hafif ve güçlü parçalar üretmek için kullanılır [10]. Karmaşık geometriler ve özel tasarımlar bu teknolojiyle kolayca üretilir. Ayrıca, bu alanda hızlı prototipleme ve onarım işlemleri için de kullanılır. Araç tasarımı ve üretiminde eklemeli imalat, prototiplerin hızla üretilmesini ve

özelleştirilmiş parçaların yapılmasını sağlar. Ayrıca, düşük hacimli üretimlerde maliyet etkin çözümler sunar. Eklemeli imalat, kişiye özel protezler, implantlar ve cerrahi aletler üretmek için kullanılır. Özellikle bireysel ihtiyaçlara uygun özelleştirilmiş medikal çözümler sunar [61, 62].

Moda ve tüketim ürünleri sektöründe, kişiselleştirilmiş ve özel tasarımlı ürünlerin üretiminde kullanılır. Eklemeli imalat, yenilikçi ve özelleştirilmiş ürünlerin hızlı bir şekilde piyasaya sürülmesini sağlar. Eklemeli imalat, inşaat sektöründe yapı elemanlarının ve bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca, bazı projelerde doğrudan bina inşaatı için büyük ölçekli 3B yazıcılar kullanılmaktadır. Eğitim kurumları ve araştırma laboratuvarlarında, prototip üretimi ve denemeler için eklemeli imalat teknolojisi kullanılır. Bu, yenilikçi tasarımların ve fikirlerin hızlı bir şekilde test edilmesini sağlar. Sanatçılar ve tasarımcılar, özgün ve karmaşık sanat eserleri ve tasarımlar oluşturmak için eklemeli imalatı kullanırlar. Bu teknoloji, yaratıcı süreçlere büyük esneklik sunar. Askeri ve savunma sektöründe, özelleştirilmiş ve yüksek performanslı ekipmanlar ile yedek parçaların hızlı bir şekilde üretimi için eklemeli imalat kullanılır [10].

3.3. Elektron Işını Ergitme (EBM)

Eklemeli imalat yöntemleri farklı firmalar ve kurumlar tarafından çeşitli isimlerle bilinse de genel olarak üç ana türü bulunmaktadır: lazer ergitme, lazer sinterleme ve lazer metal biriktirme.

Elektron ışınının enerji kaynağı olarak kullanıldığı yöntemle elektron ışını ergitme (EBM) denir. Bu yöntem, önceden serilmiş tozların lazer yardımıyla ergitilmesi ilkesine dayanır. Metal tozlarının her katmanı, bir elektron ışını ile ergitilir ve üretim tamamlandığında, parçanın soğutulur, böylece birbirlerine bağlanarak katı bir cisim oluştururlar. Bu süreç sayesinde, %99,9 yoğunlukta parçalar üretmek mümkündür [63, 64, 65].

Toz yataklı bir katlamalı imalat teknolojisi olan EBM, İsveç'te yerleşik ARCAM Şirketi tarafından ortaya çıkarıldı. EBM, karmaşık havacılık yapısal parçaları veya türbin kanatları gibi zorlu tasarımlar üretmek amacıyla geliştirilmiş olup, döküm veya dövme

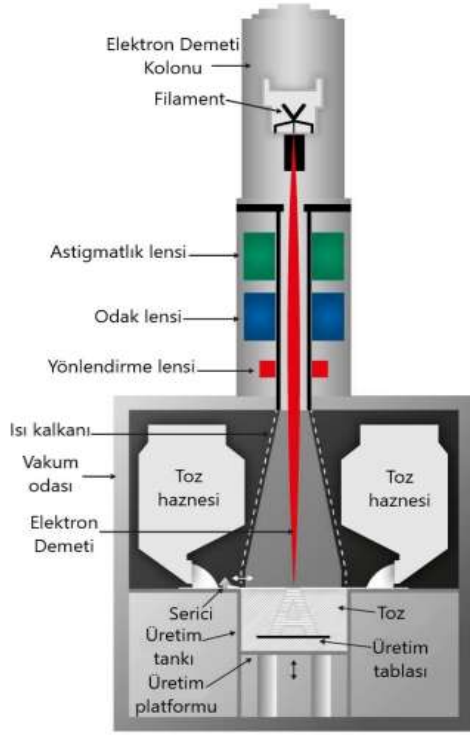
malzemelerle geleneksel yöntemlerle üretilen parçalarla karşılaştırılabilir özelliklere sahiptir [66, 67].

EBM, bir toz tabanlı üretim tekniğidir ve ARCAM AB (İsveç) tarafından geliştirilmiş olup, 2001 yılında ticari kullanıma sunulmuştur [68, 59]. EBM başlangıçta sadece takım çeliği için uygun olsa da günümüzde iletken olması gereken birçok metal Ti bazlı alaşımlar (örn. TiAl ve Ti6Al4V alaşımları), Co bazlı alaşımlar, Ni bazlı alaşımlar (örn. Inconel 625 ve 718) ve Cu EBM tekniği ile üretilebilir [66, 67].

EBM sisteminde, elektron tabancası tarafından üretilen elektron ışınları manyetik mercekle odaklanır ve ivme gerilimi (60 kW) ile hızlandırılır. Metal tozu hazneden beslenir ve bir tırmıkla dağıtılır; hızlandırılmış elektron ışını bu tozu seçici bir şekilde eriterek şekillendirir. Yapı plakası boyutları genellikle 200 mm x 200 mm x 350 mm'dir ve elektron ışınının hava ile etkileşimini önlemek için işlem vakum altında gerçekleştirilir (yaklaşık 10^{-4} torr). Ayrıca, işlemin termal stabilitesini sağlamak ve tozda elektrik yüklerinin birikmesini engellemek amacıyla eritme sırasında küçük miktarda inert helyum gazı kullanılır. Üretim süreci Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Başlangıç plakası, ilk katman eklenmeden önce önceden ısıtılır ve nihai parçanın taban kısmı, eritilmiş ilk toz katmanları ile elde edilen destek yapısı ile oluşturulur [20, 66, 67, 69, 70].

3.3.1. EBM yönteminin avantajları

- Takım gereksinimleri (örneğin, fikstürler) minimum düzeyde ya da hiç yoktur.
- Geleneksel yöntemlerle üretimi oldukça zor veya imkansız olan karmaşık geometriler, örneğin kafes yapıları, üretilebilir.
- EBM, geleneksel üretim yöntemlerine göre daha düşük malzeme israfı sunar.
- Lazer katkılı üretim teknolojilerine göre daha yüksek enerji verimliliğine sahiptir.
- Prototip üretiminde maliyet ve zaman açısından avantaj sağlar.
- Ön ısıtma stratejisi sayesinde düşük kalıntı gerilimleri oluşur [63].



Şekil 3.2 Elektron ışını ergitme yönteminin şematik halini [69]

3.3.2. EBM yönteminin dezavantajları ve sınırlamalar

- İnce ve kafes geometrileri için minimum giriş çapı bir sınırlamadır.
- Gözeneklilik ve yüzey kalitesi, sürecin temel endişeleri arasındadır. EBM, SLM gibi diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine göre daha pürüzlü yüzeyler oluşturabilir [71].
- Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla maliyeti yüksektir.
- Makinenin düzenli bakımının yapılması gereklidir.
- Makinenin hazırlanması ve son işlemler uzun zaman alabilir, ayrıca EBM süreci için geniş çapta validasyon gerektirir.
- Destek geometrilerini çıkarmak zor olabilir ve yüzey kalitesini iyileştirmek için ek işleme gerekebilir [72].
- Karmaşık parçalar için wafer destekleri gerekebilir ve bu, ısıl genleşmeler nedeniyle parça geometrisinde deformasyonlara yol açabilir.
- Sınırlı tedarik zinciri nedeniyle gerekli toz malzeme ve ekipmanların teslim süresi uzun olabilir [63].

3.4. EBM Yöntemi ile Üretim

Selen Temel Yiğitbaşı'nın "Elektron Işını Ergitme Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V Parçaların Farklı Kurulum Yönlerindeki Mekanik Özellikleri ve Topoloji Optimizasyonu" çalışmasında ARCAM Q20 EBM makinesi ile üç farklı kurulum yönüne sahip dokuz adet numune üretmiştir. İşlem süresince kurulum yönü haricindeki parametreler sabit tutulmuştur. Taşıyıcı geometriler taşlanarak çıkarılmış ve yüzey kusurlarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla her yöndeki numunelerden biri tornada işlenmiştir. Numuneler üretildikten sonra, mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testleri yapılmış ve yüzey pürüzlülüğü ile kırılma yüzeyleri incelenmiştir [7].

Yiğitbaşı'nın çalışması ayrıca EBM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özelliklerini anlamak için yapılan testleri ve elde edilen sonuçları da kapsamaktadır [7].

Edwards ve diğerleri, erimiş katmanların soğutulması ve katılaşması sırasında kalan gerilimleri azaltmak amacıyla üretim sürecinin yapı odasındaki yüksek sıcaklıkta gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Stres giderme işleminden sonra herhangi bir ek işlem yapılmamıştır. Ancak, çekme özellikleri yerine gözeneklilik veya yorulma ömrü gibi endişeler gözetildiğinde, stres giderme ısıl işleminin gerekli olduğunu vurgulamışlardır [4].

Formanoir ve arkadaşları, yüzey pürüzlülüğüne ek olarak imalat sonrası ısıl işlemi de incelemiş ve bu işlemin çekme özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermişlerdir [63].

3.4.1. EBM yöntemi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri

Her numune için grafiksel sonuçlar ilgili tez çalışmasında görülebilir, sonuç grafiklerinden her numune için Nihai Çekme Mukavemeti (UTS), Akma Mukavemeti (YS) ve Uzama (E) değerleri alınmıştır. Her biri için uzama yüzdesi, kırılmadaki uzamayı ilk uzunluğa bölerek uzamaya karşı yük grafiklerinden de bulunur. Testten elde edilen tüm ilgili değerler Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Numune özellikleri

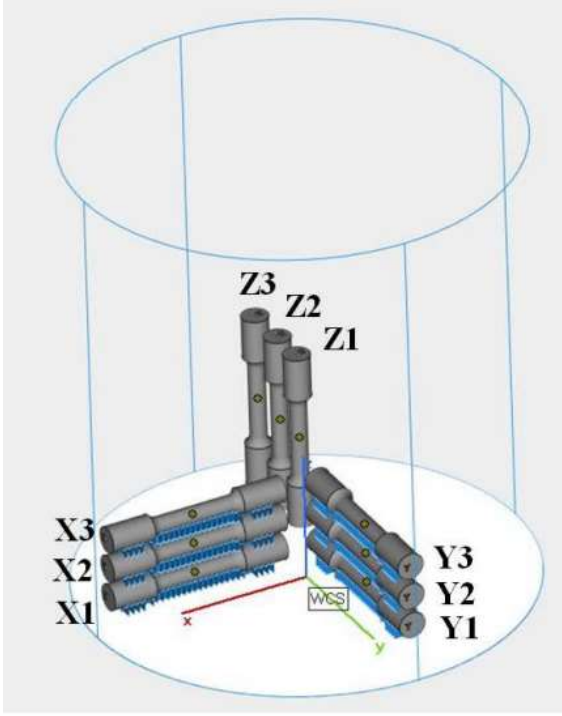
Numune Adı	Uzunluk [mm]	UTS [MPa]	YS [MPa]	Young Modülü [GPa]	Uzama [%]
X1 (İşlenmiş)	12.49	999.6	868.1	156.9	24
X2 (İnşa edildiği şekilde)	13.54	938	839.5	138.2	14
X3 (İnşa edildiği şekilde)	13.44	976.6	836.7	172.3	15
Y1 (İşlenmiş)	12.47	992.4	881.7	122	19
Y2 (İnşa edildiği şekilde)	13.43	975.3	884.6	153.8	15
Y3 (İnşa edildiği şekilde)	13.37	1000.5	909.2	118.9	12
Z1 (İşlenmiş)	12.48	1023.7	942.1	152.7	12
Z2 (İnşa edildiği şekilde)	13.51	1003.4	917	136.6	12
Z3 (İnşa edildiği şekilde)	13.49	1044.2	963.3	180	9

Y numunelerinin çekme özelliklerinin ortalama değerleri, Tablo 3.2'de gösterildiği üzere X numunelerinden daha yüksektir [7]. Ancak her bir numune ayrı ayrı incelenirken, Tablo 3.2.'de X numunesinin Y numunesinden daha iyi sonuç verdiği, Z numunesinin ise X ve Y numunesinden her zaman daha iyi olduğu görülmektedir.

Çekme testi için uygulanan yüke göre aynı yönde yapıldıkları için, algoritma olarak tanımlanan tarama stratejisi nedeniyle X ve Y numuneleri arasında fark oluşabilir. İlgili araştırmalar, tarama stratejisinin parçaların nihai özelliklerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır [48, 73].

3.5. EBM Yöntemi ile Üretimde İnşa Yönü Belirlenmesi

Referans aldığımız tezde, EBM yöntemi ile X, Y ve Z koordinat yönlerinde numuneler üretilmiştir. Mekanik özelliklere yüzey pürüzlülüğü nasıl etki edecek görmek amacıyla, her yönden üretilmiş numuneler tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir [7].



Şekil 3.3 Üretim eksenlerine göre numuneler ve yerleri [7]

Uygulanan çekme testi ile numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmiş ve kırılma yüzeyleri mikroskobik incelemeye tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, dikey olarak ("Z" ekseninde) üretilen parçaların çekme özelliklerinin diğer yönlerde üretilen parçalardan daha iyi olduğu tespit edilmiştir [7].

Bir diğer çalışmada ise uygulanan kuvvete paralel kurulum edilen Z numuneleri (yani dikey kısımlar), uygulanan yüke dik kurulum edilen X ve Y numunelerine (yani yatay kısımlar) göre Nihai Çekme Mukavemeti (UTS), Akma Mukavemeti (YS) ve Uzama (E) değerleri üzerinde daha iyi sonuçlar vermiştir. Z numuneleri, kırılma sırasında X ve Y numunelerine kıyasla daha düşük uzama oranlarına sahip olarak gözlemlenmiştir [48, 73].

4. DENEYSEL PLAN

Bu çalışmada Elektron Işını Ergitme (EBM) teknolojisi kullanılarak üretim yönü “Z” olarak belirlenen çekme çubuklarının tabla merkezine olan uzaklıkları dikkate alınarak mekanik özelliklerinin araştırılması gerçekleştirilecektir.

4.1. Deneysel Prosedür

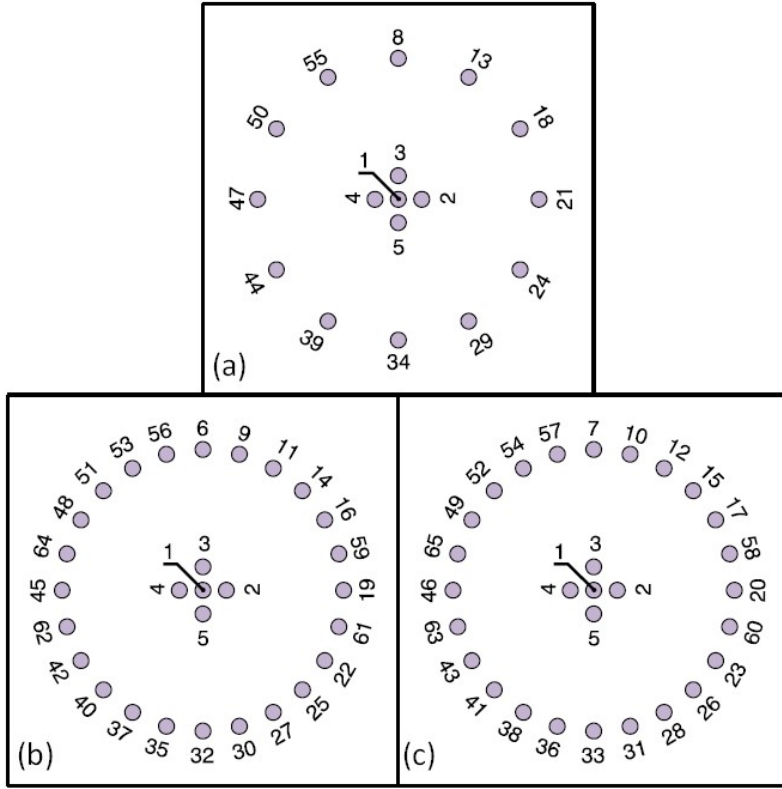
Eklemeli imalat teknikleri, parçaların bir bloktan malzeme çıkarılarak üretildiği geleneksel çıkarmalı imalat yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir.

Eklemeli imalat teknikleri, genellikle hizmet ömürleri boyunca döngüsel yüklemeye maruz kalan kritik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, eklemeli imalat metallerinin yorulma davranışını anlamak, tasarım sürecinde önemli bir aşama olarak değerlendirilmektedir.

Eklemeli imalat süreçleri, çok düşük veya hiç malzeme israfı olmadan yüksek malzeme verimliliği sağlar. Bu teknolojinin avantajlarından biri, eksiltici üretim yöntemleriyle genellikle üretimi imkânsız veya oldukça zor olan karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilebilmesidir. Ayrıca, yerinde yedek parça üretimi, birden fazla parçanın entegrasyonu ve düşük sayıda parçaların ekonomik ve verimli bir şekilde üretimi, eklemeli imalatın diğer önemli avantajları arasında yer almaktadır. Bu nedenlerle, eklemeli imalat süreçleri havacılık ve biyomedikal uygulamalar gibi çeşitli endüstrilerde giderek daha popüler hale gelmiştir [1, 3, 74].

Eklemeli imalatta enerji kaynağı olarak lazer ışını veya elektron ışını kullanılabilir. Lazer ışını genellikle daha yüksek yapı toleransları ve daha iyi yüzey kalitesi sağlar. Öte yandan, elektron ışınının daha yüksek enerjisi ve daha derin penetrasyonu, genellikle daha hızlı üretim sürelerine ve daha düşük kalıntı gerilimlerine olanak tanır.

Yapılan çalışmada, merkezde 5 adet referans karşılaştırma numuneleri çevresinde Şekil 4.1’de gösterildiği gibi 360 mm çapta 12 adet, 24 adet ve 24 adet olmak üzere yorulma numuneleri Z ekseninde üretilmiştir.



Şekil 4.1 Üretilen numuneler ve yerleşimleri (a): 360mm çapta yerleştirilmiş 12 adet numune. (b): 360mm çapta yerleştirilmiş 24 adet numune. (c): 360mm çapta yerleştirilmiş 24 adet numune.

Üretilen numuneler 2 grupta değerlendirilmiştir. Her bir değerlendirme adımı maddeler halinde sırasıyla; ham yüzey ile test edilenler ve işlenmiş yüzey ile test edilenler.

Numuneler, Ti6Al4V tozu kullanılarak üretilmiş ve boyutları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Referans çekme uzunluğu standartlardan 1 mm büyük üretilmiştir. Bunun nedeni yüzeylerin işleme ve taşlandığında standartlara uygun ölçülerde olmasıdır.



G: 50, L: 145, R: 10, W: 12.5, C:20

Şekil 4.2 Çekme -basma deneyleri için standart deney boyutları (Eklemeli imalat)

Tozun kimyasal özellikleri Tablo 4.1'de yer almaktadır. ARCAM Ti6Al4V tozunun partikül boyutu ise 45 ile 100 µm arasında değişmektedir.

Tablo 4.1 Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi [22]

Alüminyum (AL)	% 6
Vanadyum (V)	% 4
Karbon (C)	% 0.03
Demir (Fe)	% 0.10
Oksijen (O)	% 0.15
Nitrojen (N)	% 0.01
Hidrojen (H)	% 0.00
Titanyum (Ti)	Kalan

4.2. İşlem Parametreleri

Numunelerin tümü, Tablo 4.2 ile 4.3'te gösterildiği gibi ARCAM şirketi tarafından sağlanan ve önerilen aynı işlem parametreleriyle yapılmıştır. Numuneler aynı üretim yönlerinde aynı işlem parametreleri ile üretilmiştir.

Tablo 4.2 Wafer süreci için üretim parametreleri

Wafer	Tekrarlar	2
	Min. Tekrar Mesafesi	0.9 mm
	Multispot Hızı	140000 mm/s
	Akım	10 mA
	Hız	1950 mm/s
	Odak Uzaklığı	9 mA

Tablo 4.3 Eritme süreci için üretim parametreleri

Eritme	Yüzey Sıcaklığı	925 °C			
	Mevcut ekleme için Maks. Derinlik	65 mm			
	Konturler	Konturlerin Numarası	3		
		Dış Konturler	Işın Hızı	500 mm/s	
			Maks. Işın Akımı	9 mA	
			Işın Uzaklığı	0.27 mm	
			Multispot Hızı	80000 mm/s	
		İç Konturler	Işın Hızı	550 mm/s	
			Maks. Işın Akımı	9 mA	
			Işın Uzaklığı	0.18 mm	
	Multispot Hızı		80000 mm/s		
	Tarama	Maks. Işın Akımı	28 mA		
		Hat Uzaklığı	0.22 mm		
		Tarama Derinliği	0.09 mm		
		Min. Akım	3.5 mA		
Tarama Uzunluğu Ref.		45 mm			

Tablo 4.4 Ağ işlemleri için üretim parametreleri

Net	Yüzey Sıcaklığı	750 °C				
	Mevcut ekleme için Maks. Derinlik	5000 mm				
	Konturler	Konturlerin Numarası	4			
		Dış Konturler	Işın Hızı	400 mm/s		
			Maks. Işın Akımı	3.2 mA		
			Işın Uzaklığı	0.2 mm		
			Multispot Hızı	10000 mm/s		
		İç Konturler	Işın Hızı	400 mm/s		
			Maks. Işın Akımı	3.2 mA		
			Işın Uzaklığı	0.08 mm		
	Multispot Hızı		10000 mm/s			
	Tarama	Maks. Işın Akımı	3 mA			
		Hat Uzaklığı	0.2 mm			
		Tarama Derinliği	0.07 mm			
		Min. Akım	0 mA			
Tarama Uzunluğu Ref.		70 mm				

4.3. Tarama Stratejisi

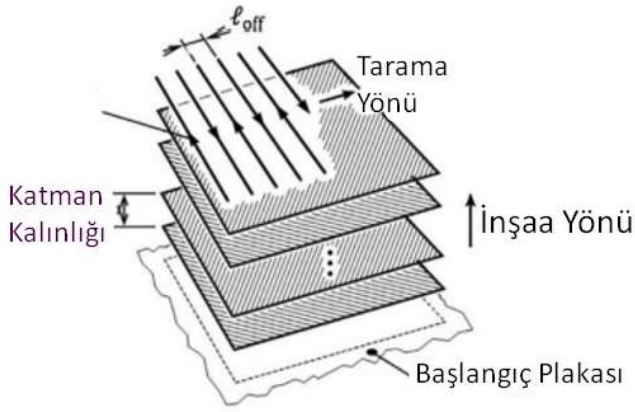
Tarama stratejisi, ARCAM tarafından belirlenen algoritmayı temel alarak uygulanmıştır. EBM kontrol yazılımı, operatör müdahalesi olmaksızın daha homojen bir metalurji elde etmek amacıyla çizgilerin, açılarının ve kapakların sanal hareket kombinasyonlarını optimize eder. EBM üretim sürecinde ön ısıtma iki aşamadan oluşur: Ön ısıtma-1, tüm yatağın taranmasını içerirken, Ön ısıtma-2, algoritma tarafından belirlenen eritilecek adaları, parça konumu, şekli ve boyutuna göre önceden tarar. Ardından, yapı dizisi erime süreciyle devam eder [7, 49].

Tablo 4.5 Ön ısıtma süreci için üretim parametreleri

Ön Isıtma	Odak Uzaklığı	44 mA		
	Isıtma Odak Ofseti	100 mA		
	Maksimum Isı Süresi	60 s		
	Kare Boyutu	144 mm		
	Parçanın Uzaklığı	4 mm		
	Maksimum Akım	48 mA		
	Ön Isıtma 1	Maks. Işın Akımı	36 mA	
		Min. Işın Akımı	36 mA	
		Işın Hızı	40500 mm/s	
		Tekrar sayısı	3	
		Satır Uzaklığı	0.4 mm	
		Tarama Derinliği	0.09 mm	
	Ön Isıtma 2	Maks. Işın Akımı	45 mA	
		Min. Işın Akımı	45 mA	
		Işın Hızı	40500 mm/s	
		Tekrar sayısı	3	
		Hat Uzaklığı	0.4 mm	
Tarama Derinliği		0.09 mm		

Erime aşaması, her adanın dış konturları ile başlar. Çoklu Işın Teknolojisi, konturları oluştururken birden fazla eriyik havuzunu aynı anda aktif tutmak için kullanılır. Tanımlanan algoritma gereğince, dış kontur, iç konturlardan daha düşük güçle yavaş yavaş oluşturulur. Konturlar oluşturulduktan sonra, adalar sürekli bir yol oluşturan kapaklarla doldurulur [7, 49, 75].

EBM kontrol yazılımı, ışın akımını her tarama hattının uzunluğuna göre ayarlar ve her katman arasındaki tarama açısını değiştirir. Bir adanın katman katman inşası Şekil 4.3'de görülmektedir.

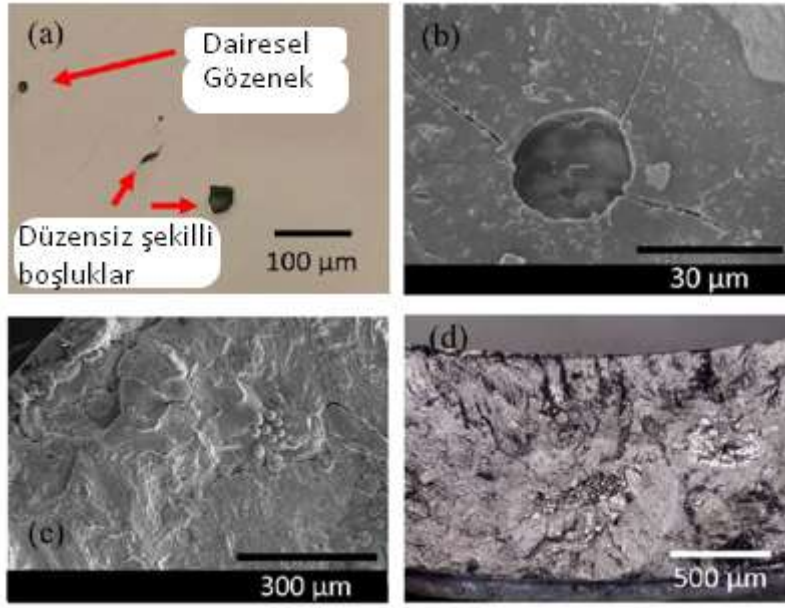


Şekil 4.3 Katman katman oluşturma işlemi için bir örnek [76]

4.4. Numunelerin Üretimi

Eklemeli imalat parçaların üretimi sırasında oluşan karmaşık termal döngü ve parça geometrisindeki değişiklikler, kusurların yönelimini ve geometrisini etkileyebilir. Tarama stratejisine bağlı olarak, kusurlar belirli bir yönde oluşabilir ve yayılabilir. Yorulma özellikleri açısından, kusur oryantasyonunun etkisi, hapsolmuş gazdan kaynaklanan gözenekler gibi daha küresel kusurlardan ziyade, erimemiş partiküller içeren Füzyon eksikliği (LOF - Loss of Fusion) kusurları gibi daha düşük en-boy oranına sahip büyük kusurlar için daha belirgin olabilir. Fatemi ve arkadaşlarına göre, gözlemlenen gözeneklerin çoğu daireseldi (yani 3-D'de küresel), boyutu 5 μm ila 80 μm arasında değişiyordu [77, 78].

Bazı durumlarda, füzyon eksikliği veya çoklu gaz ceplerinin birleşmesi nedeniyle oluşan, uzunluğu 500 μm 'ye kadar olan düzensiz şekilli boşluklar da gözlemlendi. Füzyon eksikliği boşluğunun bir örneği Şekil 4.4 (c)'de sunulmuştur. Bu tür kusurlar, yorulma çatlaklarının başlangıç noktası olarak işlev görür. Şekil 4.4 (b)'de bir gözeneklilikten çatlama örneği ve Şekil 4.4 (d)'de ise Füzyon eksikliği boşluklarından çatlak başlangıcı ve büyümesi örnekleri gösterilmektedir [79].



Şekil 4.4 (a) Düzensiz şekilli boşluklar (yani füzyon eksikliği) ve dairesel gözenekler (yani sıkışmış gaz) (b) hapsolmuş gaz nedeniyle oluşan gözenek, (c) Füzyon eksikliği kusuru ve (d) Füzyon eksikliği kusurlarından çatlakların başlaması.

Şekil 4.4 (a) Düzensiz şekilli boşlukları ve dairesel gözenekleri göstermektedir. Lazer Bazlı Toz Yatak Füzyon (L-PBF) Ti6Al4V'de yorulma çatlaklarının başlangıç noktası olarak çeşitli kusurlar Şekil 4.4 (b), (c) ve (d)'de görülmektedir.

Edwards ve arkadaşlarının çalışmasında, erimiş katmanların katılaşması ve soğutulması sırasında kalan gerilimi azaltmak için üretim işlemi, yapı odasındaki yükseltilmiş sıcaklıkta yapılmıştır ve stres giderme sonrası işlem yapılmamıştır. Ancak endişe, çekme özellikleri yerine gözeneklilik veya yorulma ömrü ise, gerilim giderme ısı işleminin gerekli olduğunu belirtmişlerdir [6].

Yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra, Formanoir ve arkadaşları imalat sonrası ısı işlemleri de incelemiş ve bu işlemlerin çekme özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermişlerdir [22]. Bu çalışmada, EBM parçalarının çekme özellikleri ana odak olduğundan, gerilim giderme ısı işlemleri uygulanmamıştır.

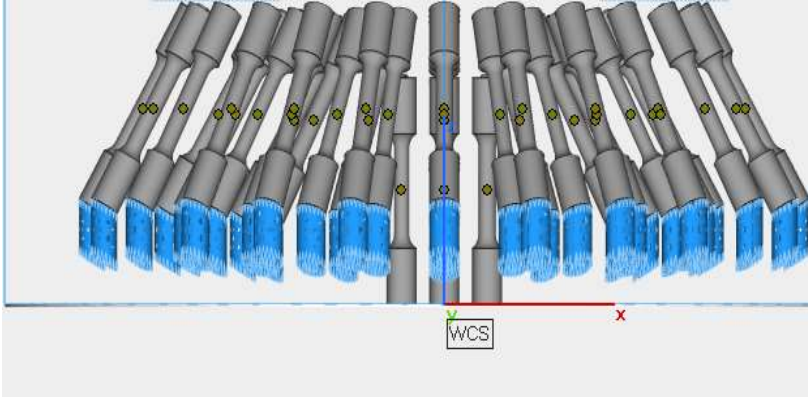
Artık gerilmeler, özellikle yüzeye yakın bölgelerde [81], üretilmiş eklemeli imalat Ti6Al4V numunelerinin akma dayanımının önemli bir kısmını etkileyebilir ve malzemelerin mekanik ve yorulma davranışlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Leuders

ve arkadaşları [81], sadece yapı yönünde değil, aynı zamanda diğer yönlerde de artık gerilmelerin mevcut olabileceğini göstermiştir.

Artık gerilmelerin doğası çok eksenli olduğundan, uygulanan yüklerle etkileşime girerek yönlerine ve büyüklüklerine bağlı olarak deformasyon ve yorulma davranışları üzerinde faydalı veya zararlı etkilere neden olabilir.

Zararlı kalıntı gerilmeler, uygun imalat proses parametreleri, tabaka yönelimleri veya imalat sonrası ısıtma yöntemleri ile ortadan kaldırılabılır veya en azından azaltılabilir. Uygulamadan önce malzemenin içinde önemli kalıntı gerilmeler kalırsa, imal edilen parçaların yorulma analizinde bunların dikkate alınması gerekir.

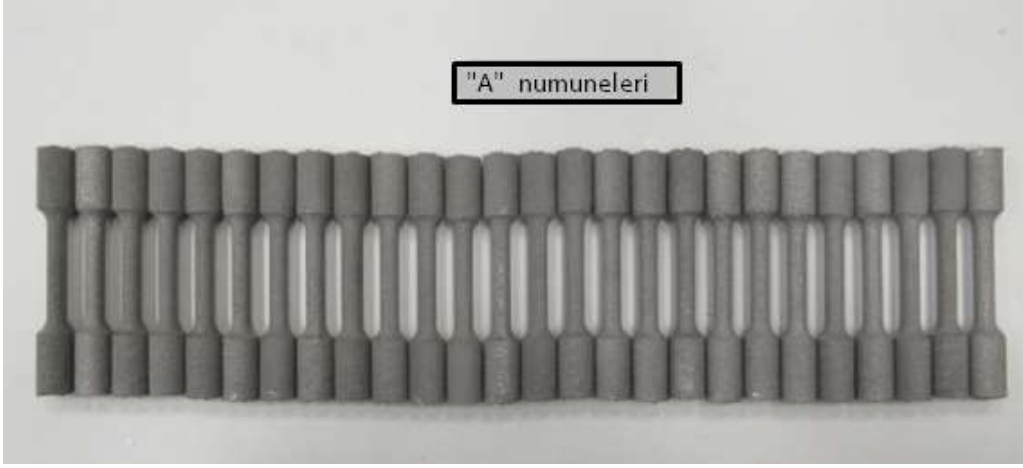
Sonuç olarak, güvenilir bileşen tasarımı ve erken arızaların önlenmesi için çok eksenli artık gerilim dağılımını anlamak çok önemlidir. Farklı üretim yöntemleri, artık gerilmelerde gözle görülür değişikliklere neden olabilir.



Şekil 4.5 Üretim Destekleri

4.4.1. Elektron ışını ergitme yöntemi ile üretilen yorulma numuneleri

Eklemeli imalattan çıktığı gibi ham olarak değerlendirilecek olan “A” grubu numuneleri şekilde görülmektedir.



Şekil 4.6 EBM Yöntemi ile Üretilen Ham Numuneler

Eklemeli imalattan çıktıktan sonra çekme bölgeleri üzerinden talaş kaldırılarak yüzey pürüzlülüğü azaltılmış olarak değerlendirilecek olan “B” grubu numuneleri şekilde görülmektedir.



Şekil 4.7 EBM Yöntemi ile Üretilen Çekme Bölgelerinden Talaş Kaldırılan Numuneler

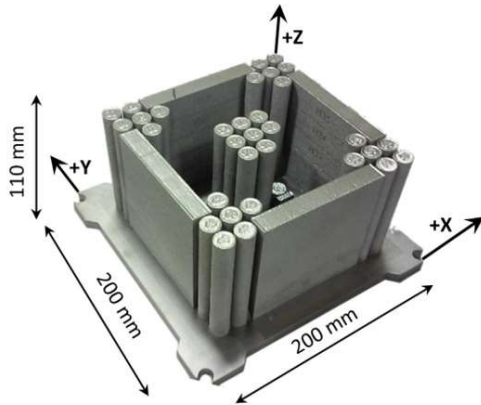
4.5. Çekme – Basma Yorulma Testi

En yaygın test yöntemlerinden biri olan çekme testi, bir aksenal germe yükü altında numunenin nasıl davrandığını belirlemek için kullanılır. Bu tür deneyler, bir malzemenin gerilme özelliklerini ölçmek amacıyla yapılır. Çekme testi, uygulanan kuvvet ile numunenin uzunluğundaki değişikliklerin izlenmesi olarak da tanımlanabilir. Test cihazı, numuneyi sabit bir hızda uzatacak şekilde bir yük hücresi ve bir uzatma

ölçer (ekstensometre) ile donatılmıştır. Yük hücresi, anlık kuvveti ölçerken, uzatma ölçer de oluşan uzamayı sürekli ve eş zamanlı olarak kaydeder [82].

Basma testi, kuvvetin basma olması ve numunelerin gerilme eksenini boyunca sıkıştırılması dışında çekme testine benzer şekilde gerçekleştirilir [82].

Galarraga ve arkadaşlarının çalışmasında çekme deneyi, yapı platformundan farklı yüksekliklerde beş yatay yönlendirilmiş örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir ve önemli bir fark veya eğilim gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.8 Standart eklemeli imalat eksen sistemi ile yapı platformunda örneklerin yerleşimi [26]

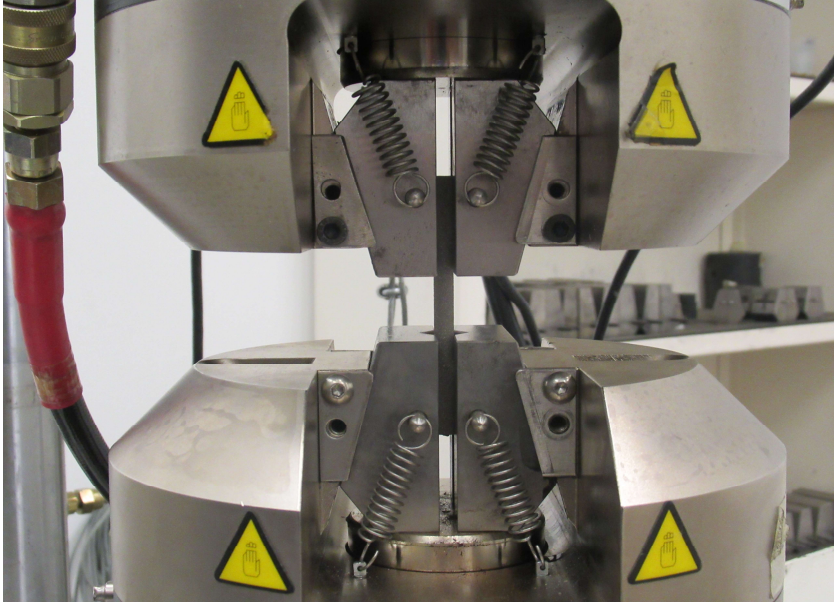
Akma mukavemeti ve uzama, nihai gerilme mukavemetinden daha belirgin sapmalar göstermektedir, ancak yapı platformundan uzaklığa bağlı olarak herhangi bir belirgin eğilim gözlemlenmemiştir. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi makine ön kenarında olan numunelerin, üç gerilme özelliği için daha yüksek ortalama değerlere sahip olduğu görülebilir [26].

Tablo 4.6 Yapı platformunda farklı konumlarda dikey olarak yönlendirilmiş numuneler için çekme sonuçları ve bağıl standart sapmalar (BSS) [26]

	Arka Kenar		Merkez		Ön Kenar	
	Ortalama	BSS (%)	Ortalama	BSS(%)	Ortalama	BSS(%)
UTS (MPa)	1065	2,2	1050	1,0	1102	1,0
YS (MPa)	993	2,3	983	1,0	1026	1,5
Uzama (%)	10,7	26,7	10,4	10,3	11,3	19,8

Bu çalışmada, malzemeye **çekme** (gerilme) ve **basma** (sıkıştırma) kuvvetleri sırasıyla uygulanır. Yük sürekli olarak pozitiften negatife geçer, yani malzeme sırasıyla çekilir ve sıkıştırılır. Bu döngüsel yükleme, malzeme üzerinde yorulma oluşturarak, kaç döngü sonunda malzemenin çatlamaya veya kırılmaya başladığını belirlemeye olanak tanır.

Test kurulumu, Şekil 4.8’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9 Test Kurulum Görüntüsü

4.5.1. Cihazın temel bileşenleri

Yük Hücresi: Uygulanan çekme ve basma kuvvetini hassas bir şekilde ölçer.

Servo-motor veya Hidrolik Sistem: Döngüsel yüklemeyi sağlar. Malzemeye belirli frekansta çekme ve basma kuvveti uygulanır.

Test Numunesi: Teste tabi tutulacak malzeme veya numune.

Kontrol Ünitesi: Yükleme koşullarını (frekans, gerilme genliği, döngü sayısı) kontrol eder ve ölçümleri kaydeder.

Veri Toplama Sistemi: Malzemenin deformasyonu, gerilme, yük ve yorulma ömrü gibi parametreleri kaydeder.

4.5.2. Testin parametreleri

Gerilme genliği: Malzemeye uygulanan maksimum çekme ve basma kuvvetleri arasındaki fark.

Ortalama gerilme: Çekme ve basma kuvvetlerinin ortalama değeri.

Yükleme frekansı: Yükün ne kadar hızlı tekrarladığı, yani bir saniyede kaç döngü uygulandığı.

Yükleme döngü sayısı: Malzemenin kırılma veya yorulma hasarı meydana gelene kadar kaç döngüye dayanabildiği.

4.5.3. Uygulama alanları

Malzeme mühendisliği: Farklı malzemelerin yorulma ömürlerini belirlemek için.

Otomotiv ve havacılık sanayii: Araç ve uçak parçalarının dinamik yükler altında nasıl performans göstereceğini incelemek amacıyla.

İnşaat mühendisliği: Yapı malzemelerinin yorulma dayanımlarını test etmek.

Biyomalzeme araştırmaları: Özellikle ortopedik implantlar gibi insan vücudunda dinamik yüklerle karşılaşan malzemelerin yorulma ömrünü değerlendirmek için.

4.5.4. Çekme - basma yorulma testinin avantajları

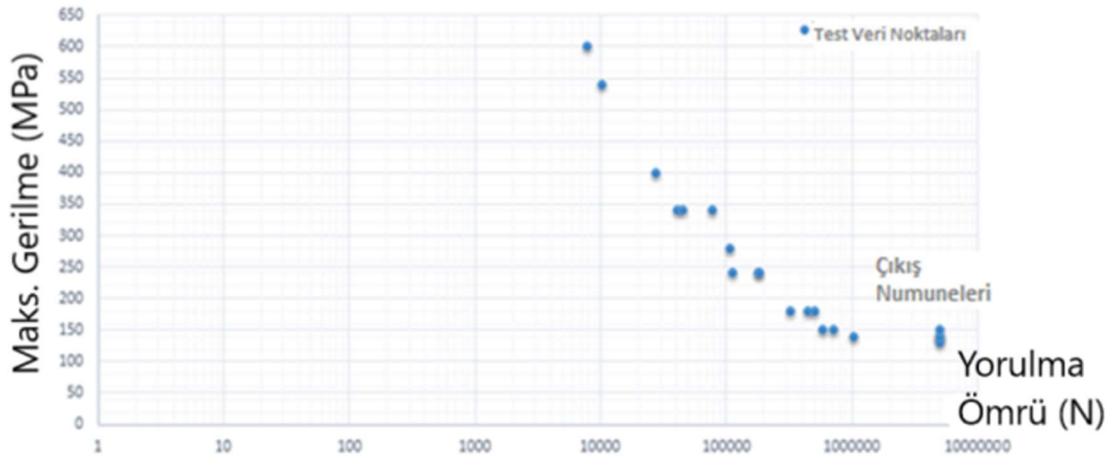
Çekme ve basma kuvvetlerinin kombinasyonu: Bu test, sadece çekme ya da basma değil, her iki kuvvetin kombinasyonu altında malzemenin nasıl davrandığını inceleyerek daha gerçekçi sonuçlar sağlar.

Dinamik yüklerin simülasyonu: Gerçek dünyada, çoğu malzeme dinamik, tekrarlayan yüklere maruz kalır. Bu test, malzemenin günlük uygulamalarda nasıl performans göstereceğini anlamak için idealdir.

Bu cihaz, malzemelerin yorulma dayanımlarını ve tekrarlayan yüklere karşı nasıl tepki verdiklerini değerlendirmek için kullanılır ve malzeme ömrünün öngörülmesi açısından kritik bir rol oynar.

4.6. EBM Yöntemi ile Üretilen Numunelerin Yorulma Testi Değerleri

EBM yöntemi ile üretilen ham numuneler “A” için gerilme ve yorulma ömrü eğrisi Şekil 4.9’da ve değerlerin olduğu Tablo 4.7’de verilmiştir.

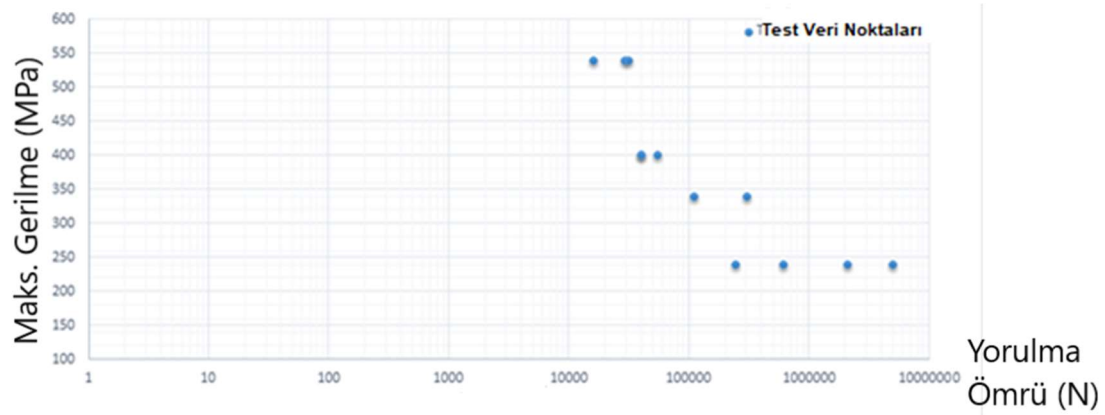


Şekil 4.10 “A” Numuneleri için Gerilme – Yorulma Ömrü Eğrisi

Tablo 4.7 “A” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Değerleri

“A” - Test Sonuçları				
SP	Maksimum Gerilme (MPa)	Yorulma Döngüsü	Test Makinesi	Geçerlilik
SP2	340,0	77.485	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP4	240,0	111.578	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP5	180,0	321.548	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP7	600,0	7.758	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP10	540,0	10230	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP12	400,0	27679	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP15	340,0	40.534	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP17	280,0	105.541	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP20	240,0	0	INSTRON_8802/220	Geçersiz
SP23	180,0	442.440	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP26	180,0	500.943	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP28	340,0	45.025	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP31*	140,0	5.000.001	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP36	240,0	179.445	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP38	240,0	182.535	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP41	150,0	590.460	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP43*	140,0	5.000.001	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP46	150,0	715.681	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP49	140,0	1.022.010	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP52*	130,0	4.999.999	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP54*	140,0	5.000.001	INSTRON_8802/220	Geçerli
SP57*	150,0	5.000.001	INSTRON_8802/220	Geçerli
*: Çıkış numuneleri				

EBM yöntemi ile üretilen ham numuneler “B” için gerilme ve yorulma ömrü eğrisi Şekil 4.11’de ve değerlerin olduğu Tablo 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.11 “B” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Eğrisi

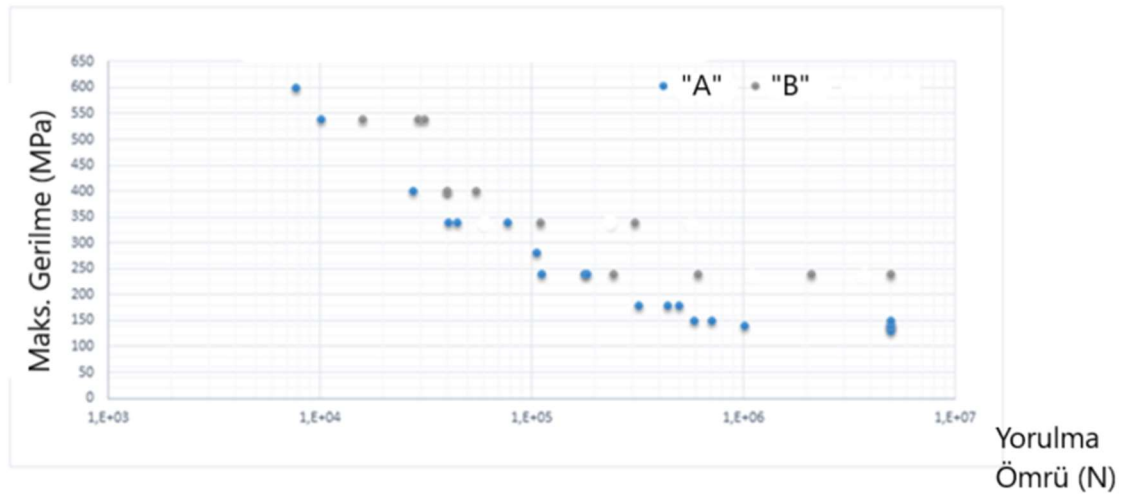
Tablo 4.8 “B” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Değerleri

“B” – Test Sonuçları				
SP	Maksimum Gerilme (MPa)	Yorulma Döngüsü	Test Makinesi	Geçerlilik
SP1	340,0	86.166	BESMAK_1	Geçersiz
SP11	340,0	110.894	BESMAK_1	Geçerli
SP13	340,0	307.409	BESMAK_1	Geçerli
SP21*	240,0	5.000.000	BESMAK_1	Geçerli
SP25	240,0	2.092.005	BESMAK_1	Geçerli
SP27	240,0	613.606	BESMAK_1	Geçerli
SP29	400,0	40.256	BESMAK_1	Geçerli
SP48	400,0	40.256	BESMAK_1	Geçerli
SP37	400,0	54.958	BESMAK_1	Geçerli
SP50	540,0	29.294	BESMAK_1	Geçerli
SP51	540,0	15.947	BESMAK_1	Geçerli
SP55	540,0	31.489	BESMAK_1	Geçerli
SP64	240,0	245.505	BESMAK_1	Geçerli
*: Çıkış numuneleri				

5. SONUÇ

Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla sunduğu önemli avantajlar nedeniyle geniş bir ilgi toplamıştır. Ancak, bu tekniği kullanan kritik yüklü bileşenlerin tasarımı henüz geliştirme aşamasındadır. Bunun nedeni çoğunlukla, bu tür bileşenlerin hizmet ömürleri boyunca döngüsel yüklere maruz kalması ve AM metallerin yorulma performansının geleneksel olarak üretilen parçalara kıyasla çok daha az anlaşılmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü ve anizotropik davranışın yanı sıra kusurların ve artık gerilmelerin oluşumu, AM işlemlerinden kaynaklanan ayırt edici özelliklerden bazılarıdır.

Esas olarak gözeneklilik ve füzyon eksikliği (LOF) boşluklarından oluşan imalat süreci kaynaklı kusurlar, AM parçalarında yorulma davranışını büyük ölçüde etkiler. Bu kusurların miktarı, boyutu, şekli, yönü ve konumu süreç parametrelerine, tarama stratejisine, yapı yönelimine ve parça geometrisine bağlıdır. Kusurların etkisi genellikle Yüksek Döngü Yorulma (HCF) rejiminde daha belirgin hale gelir. Ayrıca, LOF boşlukları, genellikle küresel olan sıkışmış gaz gözeneklerine kıyasla daha büyük bir stres konsantrasyonu oluşturabilir, bu yüzden düzensiz şekilleri nedeniyle daha zararlı olabilirler [83].



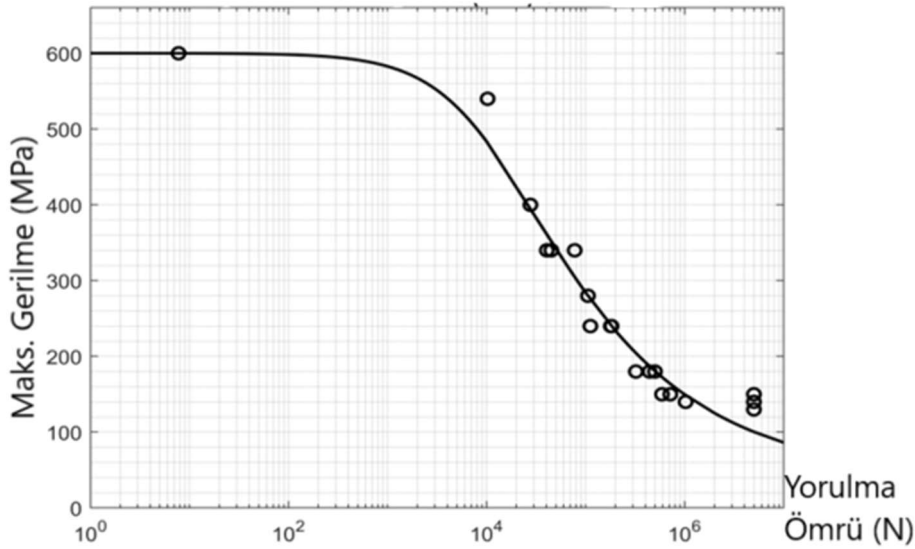
Şekil 5.1 “A” ve “B” Numune Grubu için Gerilme – Yorulma Ömrü Eğrisi

Kusurların en yüksek oranının genellikle yüzeye daha yakın olduğu gözlemlenir; bu tür kusurlar, genellikle daha yüksek yerel gerilmeler nedeniyle yorulma direncine daha fazla zarar verebilir. Sıcak izostatik presleme (HIP), özellikle LOF boşluklarını azaltmada ve

kusur popülasyonunu ve boyutunu kontrol etmede etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [83, 84].

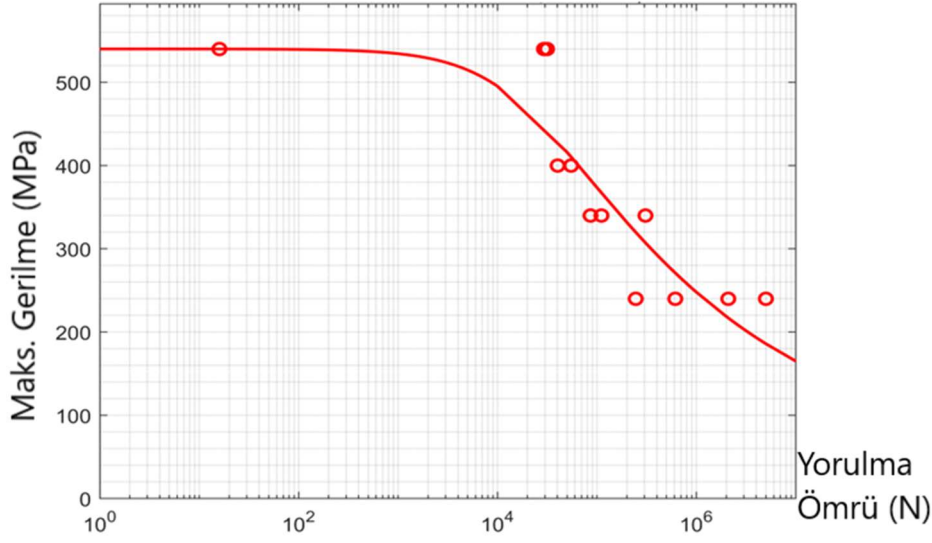
AM süreçlerinde yüksek termal gradyanlar, yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı katılaşma, parçaların bozulmasına ve önemli miktarda artık gerilimin oluşmasına yol açabilir. Artık çekme gerilmelerinin yorulma davranışını olumsuz etkilediği iyi bilinmektedir. Bu gerilmeler, uygun üretim süreci parametreleri, katman yönelimleri ve üretim sonrası ısıtma işlem süreçleri kullanılarak ortadan kaldırılabılır veya önemli ölçüde azaltılabilir.

Sonuç olarak bu numuneleri her birinin çevrimleri ve maksimum stres değerleri merkezde olmasına rağmen farklı farklı değerler ömür değerleri göstermiştir. Bunların nedeni yukarıda geçen konulardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.2 “A” Numuneleri için Maksimum Gerilme – Yorulma Ömrü Grafiği

Tez çalışmasının amacı olan merkezden uzaklaştıkça numunelerin yorulma diğengenliğindeki durumun incelenmesi olması nedeni ile bu şekilde numuneler değerlendirilmiştir. Merkezden uzaklaştıkça numunelerin yorulma ömürlerinde gözle görülen büyük farklılıklar gözlemlenmemiştir. En büyük etkinin eklemedeki üzerinde oluşan kusurların azaltılması olarak değerlendirme yapılmıştır. Pürüzlü yüzey yapısına sahip parçaların yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için yapılacak ek çalışmalar, yorulma mukavemetini artıracak ve bu sayede AM'nin havacılık uygulamalarındaki kullanım alanını genişletecektir.



Şekil 5.3 “B” Numuneleri için Gerilme – Yorulma Ömrü Grafiği

AM den direk olarak çıkan parçaların yorulma direngenliği sonsuz ömürde 140 MPa civarında gelmektedir. Bu AL 7050 ile aynı ömrü göstermektedir. Malzemenin özgül ağırlığını yükselterek aynı yorulma ömrünü elde etmek mühendislerin istemeyeceği bir durumdur. Ancak parçaların çekme yüzeylerinin işlenmesi ile elde edilen sonuçlar daha tutarlı ve teknolojinin kullanımına olanak tanıyan sonuçlar olarak değerlendirilebilir.

Sonuçlar, yüzey kalitesinin yorgunluk ömrü üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

5.1. Yüzey Kalitesinin Etkisi:

Ham Numuneler: Ham numunelerde yüzey pürüzlülüğü en yüksek olduğu için, bu numuneler en düşük yorgunluk ömrüne sahip olmuştur.

İşlenmiş Numuneler: İşlenmiş numunelerde yüzey pürüzlülüğü azaltıldığından, yorgunluk ömrü ham numunelere göre belirgin şekilde artmıştır.

Yorgunluğa maruz kalacak parçalar için yüzey kalitesinin artırılması, yorgunluk ömründe önemli bir artış sağlamaktadır. Bu nedenle, EBM ile üretilcek parçalar için yüzey işlemlerine özel önem verilmelidir.

5.2. Anizotropik Özellikler:

Aynı yüzey kalitesine sahip numuneler arasında bile yorgunluk ömrü değişiklik göstermiştir. Bu durum, EBM üretim sırasında oluşan gözeneklilik ve üretim masasının merkezle olan konumu gibi faktörlerden kaynaklanan anizotropik özelliklere bağlanmıştır.

Üretim sürecinde oluşabilecek anizotropik özelliklerin minimize edilmesi için süreç parametrelerinin ve üretim stratejilerinin dikkatli bir şekilde planlanması gerekmektedir.

5.3. Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu:

Üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve sürecin mükemmelleştirilmesi ile ürünlerin belirli bir standardın altında kalmadan üretilebileceği vurgulanmıştır. Bu, özellikle yorulma dayanımı yüksek parçalar için kritik bir öneme sahiptir.

Üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, ürünlerin daha tutarlı ve yüksek kalitede olmasını sağlayacaktır.

Bu çalışma, EBM ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünün yorgunluk ömrü üzerindeki etkilerini anlamada önemli bir katkı sağlamış olup, gelecekteki çalışmalara ve uygulamalara ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Kaur, M., Singh, K. (2019) Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. *Materials Science and Engineering: C*, 102, 844-862.
- [2] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. (2016) Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
- [3] Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kırka, M. M., Nandwana, P. (2016) Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Additive Manufacturing*, 10, 47-57.
- [4] Hrabe, N., 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 1: Distance from build plate and part size. *Materials Science and Engineering: A*, 573, 264-270.
- [5] Zhai, Y., Galarraga, H., Lados, D. A. (2015) Microstructure Evolution, Tensile Properties, and Fatigue Damage Mechanisms in Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Two Additive Manufacturing Techniques. *Procedia Engineering*, 114, 658-666.
- [6] Edwards, P., Oconner, A., Ramulu, M. (2013) Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(6), 061016.
- [7] Temel Yiğitbaşı, S. (2018) Mechanical Properties Of Ti6al4v Parts Produced By Electron Beam Melting And Topology Optimization In Different Building Directions, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [8] Ensarioğlu, C., Çakır, M.C. (2005) Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü Bölüm I, *Mühendis ve Makine*, 46, 546.
- [9] Khan, H.M., et al., (2020) Influence of the post-processing operations on surface integrity of metal components produced by laser powder bed fusion additive manufacturing: a review. *Machining Science and Technology*, 25(1), 118-176.
71.

- [10] Kaya, M. Ş. (2021) Helikopter İçin Eklemeli İmalat ile Ti6Al4v Dişli Üretimi ve Ardıl İşlemlerin Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [11] Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S., and Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface & Coatings Technology*, 200(7), 2192-2207.
- [12] Szymczyk-Ziółkowska, P., et al., (2021) Corrosion resistance characteristics of a Ti6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting after the applied postprocess treatment methods. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 41(4),1575-1588. 95.
- [13] Yeganeh, M., Shoushtari, M. T., Khanjar A. T., Al Hasan, N. H. J., (2023) Microstructure evolution, corrosion behavior, and biocompatibility of Ti-6Al-4V alloy manufactured by electron beam melting (EBM) technique. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 679, 132519.
- [14] Walter J., Jackson M., Sims C. (1988). *Titanium and its alloys: Principles of alloying titanium*. Metals Park, USA: ASM International.
- [15] Lütjering, G. (1998) Influence of Processing on Microstructure na Mechanical Properties of ($\alpha + \beta$) Titanium Alloys. *Materials Science and Engineering*, A243, 23-45.
- [16] Damkroger B. K., Edwards G. (1990) Continuous cooling transformation kinetics in alpha-beta titanium alloys. *Simulation and Theory of Evolving Microstructures*. The Metals, Minerals & Materials Society, 129-150
- [17] Leyens, C., Peters, M. (2003) *Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH, 2-34p, Germany
- [18] Williams, J. C., Lütjering, G. (2007) *Titanium, Engineering Materials and Process*. Springer, 399p, Berlin.
- [19] Ateş, G. (2018) Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İç Yapısı ve Yüzey Özellikleri Üzerine Termokimyasal İşlem Parametrelerinin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

- [20] Doğu, M. N. (2019) Production Of Ti-6Al-4V Alloy By 3d Electron Beam Melting Technique And Development Of Its Post Treatments. Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [21] Tepe, S. A. (2019) Havacılık Uygulamalarında Kullanılan Saf Titanyum ve Ti6Al4V Alaşımının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [22] Yalçın, B., Varol, R. (2008) Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe Alaşımının Toz Metalürji Yöntemiyle İmalatı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Politeknik Dergisi, 11, 3, 235-241.
- [23] Nguyen, H.D., et al., (2022) A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties. Journal of Materials Research and Technology, 18, 4641-4661. 193.
- [24] Bilgin, G. M. (2017) Optimization of the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy produced by three dimensional additive manufacturing using thermochemical processes. Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [25] Vayssette, B., et al., (2018) Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life. Procedia engineering, 213, 89-97 33.
- [26] Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., Nandwana, P. (2016) Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). Additive Manufacturing, 10, 47-57.
- [27] Del Guercio, G., et al., (2020) Microstructure and mechanical performance of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured via electron beam melting (EBM): a review. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 33(2), 183-203. 57.
- [28] Nesli, S., et al., (2023) Influence of laser polishing process parameters on surface integrity and morphology of Ti-6Al-4V parts produced via electron beam melting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 1-16. 78

- [29] Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., Requena, G. (2016) Correlation between porosity and processing parameters in Ti6Al4V produced by selective laser melting, *Materials and Design*, 105, 160-170.
- [30] Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N., Ludovico, A. D. (2015) Experimental investigation and statistical optimization of the selective laser melting process of a maraging steel”, *Optics & Laser Technology*, 65, 151-158.
- [31] Fedorov, V., Klimenov, V., Cherepanov, R., Batranin, A. (2019) Powder and wire melting titanium alloys by electron beam, *Procedia Manufacturing*, 37, 584-591.
- [32] Prisco, U., et al., (2019) Influence of processing parameters on microstructure and roughness of electron beam melted Ti-6Al-4V titanium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(15), 1753-1760. 56.
- [33] Fleishel, R., Ferrell, W., TerMaath, S., (2023) Fatigue-Damage Initiation at Process Introduced Internal Defects in Electron-Beam-Melted Ti-6Al-4V. *Metals* 2023, 13, 350.
- [34] Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V. (2011) “Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel”, *Physics Procedia*, 12, 255-263.
- [35] Basalah, A., Esmacili, S., Toyserkani, E. (2016) On the influence of sintering protocols and layer thickness on the physical and mechanical properties of additive manufactured titanium porous bio-structures, *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 341-351.
- [36] Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J. (2011) Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF). *Material Science and Engineering A*, 528, 1094-1104.
- [37] Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., and Thompson, S. M. (2015) An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, 8, 12-35.

- [38] Blackwell, P.L. (2015) The mechanical and microstructural characteristics of laser-deposited IN718. *Journal of Material Processing Technology*, 170, 240–246.
- [39] Alves, J., Morgado, T., Galvão, I., Pereira A., Pereira M., (2024) Development of a Life Prediction Model of Ti-6Al-4V obtained by. *Additive Manufacturing Procedia Structural Integrity*, 53, 236–245
- [40] Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J., Humbeeck, J. V. (2015) Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, 5, 77–84.
- [41] Kayacan, M. Y., ve Yılmaz, N. (2019). DMLS ile eklemeli imalatta dengesiz sıcaklık dağılımı ve parçaya etkilerinin araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 79–94.
- [42] Akıllılar, H. (2020). Elektron Işını ile Ergitme Yöntemi İle Ti-6al-4v İçin Isıl Modelleme ve Ergiyik Havuzun Geometrik İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [43] Wong, K. V., Hernandez, A., (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 208760.
- [44] Jarosinski, W., Zhang J., (2018) Additive manufacturing processes and equipment. *Additive Manufacturing*. Zhang J. ve Jung J. G. (Editörler). *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*. Birinci baskı, Oxford: Butterworth-Heinemann, 39-51.
- [45] Beyer, C. (2014). Strategic implications of current trends in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 1–8.
- [46] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015) *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer.
- [47] Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., Wiener, S. (2017) *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. New York: Springer

- [48] Suard, M. (2006) Characterization and optimization of lattice structures made by Electron Beam Melting. Phd Thesis, Universite de Grenoble, France.
- [49] Tammas-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I., & Prangnell, P. (2015) XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Materials Characterization*, 102, 47-61.
- [50] Y. Lu et al. (2015) Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy. *Opt. Laser Technol.*
- [51] Balachandramurthi, A.R., et al., (2019) Additive manufacturing of alloy 718 via electron beam melting: Effect of post-treatment on the microstructure and the mechanical properties, *Materials* 2019, 12, 68.
- [52] Higashi, M., Yoshimi, K., (2021) Electron beam surface melting of MoSiBTiC alloys: Effect of preheating on cracking behavior and microstructure evolution. *Materials & Design*, 209, 110010.
- [53] Wu, Y., Wang, Y., Liu, M., Shi, D., Hu, N., Feng, W., (2023) Mechanical Properties and in Vivo Assessment of Electron Beam Melted Porous Structures for Orthopedic Applications, *Metals* 2023, 13, 1034.
- [54] F. Liu et al. (2011) The effect of laser scanning path on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel-base superalloy Inconel 718. *J. Alloys Compd.*
- [55] Qian, B., Shi, Y. S., Wei, Q. S., and Wang, H. B. (2012) The helix scan strategy applied to the selective laser melting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*
- [56] Memu, F. (2019) Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Ti-6al-4v Alaşımının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [57] Narra, S. P. (2017) Melt Pool Geometry and Microstructure Control Across Alloys in Metal Based Additive Manufacturing Processes. Doktora Tezi, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 11-56.

- [58] Akbulut, E. (2019) Investigating The Effects Of The Scanning Strategy And Layer Thickness For Electron Beam Melting By Using Finite Element Method. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [59] Ednie, L., Antonysamy, A. A., Parimi, L., Mani, M., Thomas, M., Lancaster R. J., (2024) Understanding the fatigue behaviour of Ti–6Al–4V manufactured via various additive processes. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 1337–1354.
- [60] Redwood, B. Additive manufacturing technologies: An overview. Available from: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>.
- [61] Webb, P. A. (2000) A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 24(4), 149– 153
- [62] Kavak, R., et al., (2021) A Beam Diagnostics System of Electron Beam Melting for Additive Manufacturing.
- [63] Formanoir, C. D., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., & Godet, S. (2016) Electron beam melted Ti–6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material. *Materials Science and Engineering: A*, 652, 105-119.
- [64] Yang, J., et al., (2022) Electron beam-based additive manufacturing of Fe93.5Si6.5 (wt.%) soft magnetic material with controllable magnetic performance. *Scripta Materialia*, 210, 114460.
- [65] Hryha, E., Riabov, D., (2022) Metal powder production for additive manufacturing. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 3, 264-271.
- [66] Murr, L.E., Gaytan, S.M. (2014) Electron Beam Melting, in: *Compr. Mater. Process.* doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01004-9.
- [67] Chua, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S. (2010) *Rapid prototyping: Principles and applications.* third edition, doi:10.1142/6665.

- [68] Burgman, O., Lundberg, C., (2021) Understanding process atmosphere interactions in Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) additive manufacturing. Master of Science, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [69] EBM, erişim adresi: <https://www.ge.com/additive/ebm/>, erişim tarihi: ağustos 2024.
- [70] Galati, M., Iuliano, L. (2018) A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. *Addit. Manuf.* 19, 1–20.
- [71] Cozzolino, E., and A. Astarita, A., (2023) Energy saving in milling of electron beam–melted Ti6Al4V parts: influence of process parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(1), 179-194.
- [72] Yaman, N., et al., (2022) Enhancing Surface Integrity of Additively Manufactured Inconel 718 by Roller Burnishing Process. *Procedia CIRP*, 108, 681-686. 68
- [73] Everhart, W., Dinardo, J., & Barr, C. (2016) The Effect of Scan Length on the Structure and Mechanical Properties of Electron Beam-Melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(2), 697-705.
- [74] Herrera, P., Hernandez-Nava, E., Thornton, R., Slatter, T., (2023) Abrasive wear resistance of Ti-6AL-4V obtained by the conventional manufacturing process and by electron beam melting (EBM). *Wear* 524-525, 204879.
- [75] Shao, M., et al., (2020) The effect of beam scan strategies on microstructural variations in Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion. *Materials & Design*, 196, 109165.
- [76] Klassen, A., Forster, V. E., Juechter, V., & Körner, C. (2017) Numerical simulation of multi-component evaporation during selective electron beam melting of TiAl. *Journal of Materials Processing Technology*, 247, 280-288.
- [77] Fatemi, A., Molaei, R., Sharifimehr, S., Shamsaei, N., Phan, N. (2017) Torsional fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V by powder bed fusion including surface finish effect. *International Journal of Fatigue*, 99, 187–201.

- [78] Fatemi, A., Molaei, R., Sharifimehr, S., Phan, N., Shamsaei, N. (2017) Multiaxial fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V including surface finish effect. *International Journal of Fatigue*, 100, 347–366.
- [79] Yu, H., et al., (2019) Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: Influence of surface finishing, hot isostatic pressing and heat treatments. *International Journal of Fatigue*, 120, 175-183.
- [80] Li, P., Warner, D., Fatemi, A., Phan, N., (2016) Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti–6Al–4V and perspective for future research. *International Journal of Fatigue*, 85, 130-143.
- [81] Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H., and Maier, H., (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.
- [82] Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2013) *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği / Materials Science and Engineering*, 8. Basımdan Çeviri (Prof. Dr. Kenan Genel), Nobel Yayıncılık, 150-196.
- [83] Ganor, Y.I., et al., (2021) Tailoring microstructure and mechanical properties of additively-manufactured ti6al4v using post processing. *Materials*, 14(3), 658.
- [84] Popov, V.V., et al., (2021) Texturing and Phase Evolution in Ti-6Al-4V: Effect of Electron Beam Melting Process, Powder Re-Using, and HIP Treatment. *Materials*, 14(16), 4473.
- [85] Şirin, T. B. (2021) Elektron Demeti İle Ergitme Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Farklı Geometrilerdeki Ti-6al-4v Alaşım Malzemelerine Uygulanan İkincil İşlemlerin Malzemenin Yüzey Bütünlüğüne Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [86] Aydın, K. (2022) Katmanlı İmalat ile Üretilen ve Lazer Kaynağı ile Birleştirilen Ti6Al4V Malzemenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisi, Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Türkiye.

- [87] Aydın, D.S. (2022) Ti6Al4V Alaşımının Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Üretilmesinde Belirli Üretim Parametrelerinin Malzeme Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- [88] Jiang, J., A (2023) survey of machine learning in additive manufacturing technologies. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1-23.
- [89] Persenot, T., et al., (2019) Effect of ultrasonic shot peening on the surface defects of thin struts built by electron beam melting: Consequences on fatigue resistance. Additive Manufacturing, 28, 821-830.
- [90] Liu, Z., et al., (2021) Improved surface integrity of Ti6Al4V fabricated by selective electron beam melting using ultrasonic surface rolling processing. Journal of Materials Processing Technology, 297, 117264.