



**ELEKTRON DEMETİ İLE ERGİTME İŞLEMİNDE ÜRETİM
ORYANTASYONUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Berat ŞEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

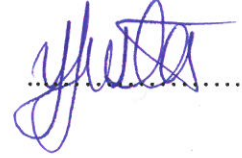
MART 2020

Berat ŞEN tarafından hazırlanan “ELEKTRON DEMETİ İLE ERGİTME İŞLEMİNDE ÜRETİM ORYANTASYONUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Yusuf USTA

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

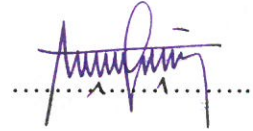
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Teyfik DEMİR

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TOBB ETÜ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 05/03/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Berat ŞEN

05/03/2020

ELEKTRON DEMETİ İLE ERGİTME İŞLEMİNDE ÜRETİM ORYANTASYONUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Berat ŞEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2020

ÖZET

Eklemeli İmalat (Eİ) geleneksel imalat yöntemlerine alternatif oluşturan yeni sayılabilecek bir imalat yöntemidir. Yöntem başlarda hızlı prototipleme amacıyla kullanılsa da günümüzde son ürün olarak kullanılabilecek nitelikte hem polimer hem de metal ürünler üretebilen yöntemleri geliştirilmiştir. Elektron demeti ile ergitme (*EBM, ing. Electron Beam Melting*) de toz yataklı bir metal eklemeli imalat yöntemidir. Tez çalışmasında EBM ile üretilen numunelerin üretim oryantasyonuna göre mekanik özelliklerinin değişimi ve mikroyapıları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar üretim oryantasyonuna göre mekanik özelliklerin ve mikroyapıların değiştiğini göstermiştir. Çekme dayanımında yatay oryantasyonda üretilen numunelerin konvansiyonel yöntemler ile üretilmiş parçalar kadar dayanım gösterebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Mikroyapılar soğuma hızı ve ısı transferi yönüne göre şekillenmektedir. Çalışmada, oluşan mikroyapıların çentik darbe testi sonuçlarına etki ettiği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, Katmanlı imalat, Elektron demeti ile ergitme, Elektron ışını
Sayfa Adedi : 79
Danışman : Prof. Dr. Yusuf USTA

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BUILD ORIENTATION ON MECHANICAL
PROPERTIES IN ELECTRON BEAM MELTING PROCESS

(M. Sc. Thesis)

Berat ŞEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2020

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) is a new manufacturing method which is an alternative to traditional manufacturing methods. Although the method was initially used for rapid prototyping, some methods have been developed that can produce end products both from polymer and metal. EBM is a powder-bed metal additive manufacturing method. In this thesis, the change of mechanical properties and microstructures of samples produced by EBM according to build orientation were investigated. Studies have shown that mechanical properties and microstructures are subject to change according to build orientation. It was concluded that the samples produced in horizontal orientation might have same strength as the parts produced by conventional methods considering the tensile strength. Microstructures are shaped according to the cooling rate and heat transfer direction. In the study, it is concluded that the microstructures affect the notch impact test results.

Science Code : 91438
Key Words : Additive manufacturing, Electron beam melting, EBM
Page Number : 79
Supervisor : Prof. Dr. Yusuf USTA

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen aileme, her şartta yanımda olan Elif, Zeynep, Hazal başta olmak üzere tüm arkadaşlarıma, her konuda rahatça fikrini alabildiğim tez danışmanım sayın Prof. Dr. Yusuf USTA'ya, tezim ile ilgili her imkanı sağlayan Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM) müdürü sayın Prof. Dr. Metin U. SALAMCI'ya, iş arkadaşlarım EKTAM ekibine, laboratuvar çalışmalarında tecrübesinden faydalandığım sayın Arif BALCI ve Yusuf ŞAHİNKAYA'ya ve numunelerin üretilmesinde “G.E. Additive C.E.C Munich” ile bağlantımı sağlayan sayın Sadık Sinan KOŞUMCU'ya ve TUSAŞ çalışanları Hakan YAVAŞ, Ahmet Alptuğ TANRIKULU, Remzi Ecmel ECE'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. EKLEMELİ İMALAT VE EBM.....	3
2.1. Eklemeli İmalat Terminolojisi ve Standartları	3
2.2. Eklemeli İmalat Tarihçesi	4
2.3. Eklemeli İmalat Süreci	5
2.4. Eklemeli İmalatın Uygulamaları Güçlü Yönleri ve Geleceği.....	6
2.5. Eklemeli İmalatın Yöntemleri	7
2.5.1. Elektron demeti ile ergitme	9
3. LİTERATÜR	29
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	43
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53
5.1. Toz Karakterizasyon Sonuçları	53
5.1.1. Hall akış testi sonuçları.....	53
5.1.2. Optik mikroskop incelemesi.....	55
5.1.3. SEM incelemesi.....	55
5.2. Pürüzlülük Sonuçları	57

	Sayfa
5.3. Sertlik Sonuçları	60
5.4. Mikroyapı İncelemeleri.....	63
5.5. Çentik Darbe Testi Sonuçları.....	69
5.6. Çekme Testi Sonuçları.....	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Alaşım elementlerinin titanyum fazlarına etkisi	26
Çizelge 2.2. Ti6Al4V alaşımının ASTM standardına göre (%) kütlece kimyasal kompozisyonları	28
Çizelge 3.1. Hrabe ve arkadaşlarının elde ettiği sonuçlar	32
Çizelge 4.1. A2X üretim parametreleri	44
Çizelge 5.1. Hall akış testi sonuçları	53
Çizelge 5.2. Carr indeks ve Hausner oranına göre akış özellikleri	54
Çizelge 5.3. Dikey ve 30 derece çekme dayanımları p-değerleri.....	71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli imalat üretim basamakları	5
Şekil 2.2. Merdiven etkisi	7
Şekil 2.3. Eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırması.....	8
Şekil 2.4. Toz yataklı yöntemlerin üretim miktarı ve malitelerinin geleneksel yöntemler ile karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.5. EBM ve SLM yöntemleri ile üretilmiş iki parça	12
Şekil 2.6. Üretim öncesi hazırlık.....	13
Şekil 2.7. Ön ısıtma bölgeleri	14
Şekil 2.8. SLM prosesi şematik görüntüsü	15
Şekil 2.9. EBM prosesi şematik görüntüsü.....	16
Şekil 2.10. a) EBM ile üretilmiş Ti6Al4V b) SLM ile üretilmiş Ti6Al4V.....	17
Şekil 2.11. Sıvı fazın katıyı ısıtma şematiği.....	19
Şekil 2.12. Sinterlenme sırasında sıcaklığa göre tozların kurduğu bağ miktarları	21
Şekil 2.13. Ön ısıtma yapılmamış bir toz yatağında meydana gelen toz saçılması görüntüleri.....	21
Şekil 2.14. EBM prosesi sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar	22
Şekil 2.15. Ergiyik havuz şematiği	23
Şekil 2.16. İdeal nüfuz derinliği.....	24
Şekil 2.17. Titanyum birim hücre yapıları	25
Şekil 2.18. Fazlar arasındaki özellik farkları	26
Şekil 2.19. Alaşım elementlerinin α ve β fazlarına etkileri	27
Şekil 2.20. Ti6Al4V faz diyagramı.....	27
Şekil 3.1. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gurubu.....	29

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gruplarında oluşan α çita kalınlıkları	30
Şekil 3.3. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gruplarında ölçülen sertlikler....	30
Şekil 3.4. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gruplarında çekme gerilmeleri ve % uzama miktarları.....	31
Şekil 3.5. Hrabe ve arkadaşlarının ürettiği numune grubu lokasyonları.....	32
Şekil 3.6. Chern'in elde ettiği mikroyapı görüntüleri a) XY düzleminde b) üretim yönünde c) 3 boyutlu mikroyapı görüntüsü	33
Şekil 3.7. Üretim yönünde uzamış taneler	34
Şekil 3.8. Chern'in çalışmasında incelenen numuneler	34
Şekil 3.9. Chern'in çalışmasında ortaya çıkan mikroyapılar	35
Şekil 3.10. Lewandowski ve Seifi'nin derlediği sonuçlarda incelenen numuneler	36
Şekil 3.11. Todai ve arkadaşlarının elde ettiği sonuçlar	37
Şekil 3.12. Persenot ve arkadaşlarının incelediği numune grubu	37
Şekil 3.13. Roy ve arkadaşlarının incelediği numune grubu	38
Şekil 3.14. Roy ve arkadaşlarının elde ettiği gerilme - gerilme sonuçları	38
Şekil 3.15. Roy ve arkadaşlarının elde ettiği sertlik sonuçları.....	39
Şekil 3.16. Galarraga ve arkadaşlarının incelediği numune grubu	40
Şekil 3.17. Galarraga ve arkadaşlarının çalışmasında elde edilen mikroyapı sonuçları.	40
Şekil 3.18. Galarraga ve arkadaşlarının çalışmasında elde edilen sertlik sonuçları	41
Şekil 3.19. Galarraga ve arkadaşlarının çalışmasında elde edilen çekme dayanımı sonuçları.....	41
Şekil 4.1. Arcam A2X EBM makinesi.....	43
Şekil 4.2. Mikroyapısına bakılan bakalite alınmış çentik darbe numuneleri	44
Şekil 4.3. Bakalite alma cihazı.....	45
Şekil 4.4. Hall hunisi.....	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Optik mikroskop	46
Şekil 4.6. SEM cihazı.....	47
Şekil 4.7. Sertlik ölçüm cihazı	48
Şekil 4.8. Pürüzlülük ölçüm cihazı	48
Şekil 4.9. Kırılmış çentik darbe numuneleri	49
Şekil 4.10. Çentik darbe test düzeneği.....	49
Şekil 4.11. Çentik darbe numuneleri.....	50
Şekil 4.12. Çekme testi cihazı.....	50
Şekil 4.13. Test öncesi bazı çekme numuneleri	51
Şekil 4.14. Test sonrası bazı çekme numuneleri.....	51
Şekil 5.1. Bakalite alınmış ve zımparalanmış Ti6Al4V tozlarının optik mikroskop görüntüsü.....	55
Şekil 5.2. Bakalite alınmış ve zımparalanmış Ti6Al4V tozlarının SEM görüntüsü.....	56
Şekil 5.3. Ti6Al4V tozlarının SEM görüntüsü	56
Şekil 5.4. Ti6Al4V tozlarının SEM görüntüsü ve toz boyutları	56
Şekil 5.5. A2X makinesinde üretilen numunelerin çentikli yüzey pürüzlülükleri.....	58
Şekil 5.6. A2X makinesinde üretilen numunelerin çentiksiz yüzey pürüzlülükleri	59
Şekil 5.7. Pürüzlülük ölçümü yapılan A2X numune gurubu	59
Şekil 5.8. Q20 makinesinde üretilen numunelerin çentikli yüzey pürüzlülükleri.....	60
Şekil 5.9. Yatay numune sertlik sonuçları	61
Şekil 5.10. 30 derece numune sertlik sonuçları	61
Şekil 5.11. 60 derece numune sertlik sonuçları	62
Şekil 5.12. Dikey numune sertlik sonuçları	62
Şekil 5.13. Ti6Al4V alaşımı soğuma hızı faz dönüşümü grafiği.....	63
Şekil 5.14. Ti6Al4V soğuma hızına göre mikroyapıları.....	64

Şekil	Sayfa
Şekil 5.15. Yatay oryantasyon mikroyapısı	65
Şekil 5.16. Yatay oryantasyon tane yönleri	65
Şekil 5.17. Yatay oryantasyonda oluşan kaba lamel yapıları	66
Şekil 5.18. Ti6Al4V sürekli soğuma (CCT) diyagramı	67
Şekil 5.19. Dikey oryantasyon mikroyapısı	67
Şekil 5.20. Dikey oryantasyon tane yönleri	68
Şekil 5.21. 60 derece oryantasyon mikroyapısı	68
Şekil 5.22. Oryantasyonlara göre çentik darbe enerji	69
Şekil 5.23. Üretildiği hali ile test edilen numunelerin oryantasyonlara göre çekme gerilmeleri	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
μm	Mikrometre
Al	Alüminyum
C	Karbon
°C	Santigrat Derece
Co	Kobalt
CO₂	Karbon Dioksit
Cr	Krom
Fe	Demir
GPa	Gigapascal
gr	Gram
H	Hidrojen
J	Joule
kV	Kilovolt
mA	Miliamper
mm	Milimetre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Megapascal
N	Azot
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
nm	Nanometre
O	Oksijen
Ra	Ortalama Pürüzlülük
s	Saniye
Sn	Kalay
Ti	Titanyum

Simgeler**V****Zr****Açıklamalar**

Vanadyum

Zirkon

Kısaltmalar**Açıklamalar****ADF****AM****ASTM****BCC****CAD****CNC****DED****DEM****DFAM****EBM****Eİ****HCP****HIP****SEM****SLA****SLM****STL****TRL****WAAM**

Atomik Dolgu Faktörü

Additive Manufacturing

American Society for Testing and Materials

Body Centered Cubic

Computer Aided Design

Computer Numerical Control

Direct Energy Deposition

Discrete Element Method

Design for additive manufacturing

Electron Beam Melting

Eklemeli İmalat

Hexagonal Close Packed

Hot Isostatic Pressing

Scanning Electron Microscope

Stereolithography Apparatus

Selective Laser Melting

Stereolithography

Technology Readiness Level

Wire Arc Additive Manufacturing

1. GİRİŞ

Günümüzde üretim teknolojileri açısından devrim yaratma potansiyeli bulunan eklemeli imalat teknolojileri hızla gelişmekte ve sanayi devriminden bu yana kullanılan geleneksel imalat yöntemlerine bir alternatif oluşturmaktadır. Eklemeli imalat genellikle katman katman malzeme birleştirilerek son ürüne gidilen bir üretim yöntemidir. Eklemeli imalat yöntemleri katmanların birleştiriliş yöntemlerine göre, prosesin karakteristik özelliklerine göre veya birleştirilen malzemelerin cinsine göre sınıflandırılabilir. Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan EBM (*Elektron demeti ile ergitme, ing. Electron Beam Melting*) toz yataklı ve metal bazlı bir eklemeli imalat yöntemi olup yöntem hakkında yapılan çalışmalar gerek dünyada gerek ülkemizde hızla sürmektedir.

Endüstrinin, sanayi devriminden bu güne çeşitli sıçramalar yaşadığı gibi üretim yöntemleri de bazı dönemlerde sıçramalar yaşamıştır. Eklemeli imalat, literatürü geliştikçe ve yöntemlerin çeşitli dezavantajlarının önüne geçecek çözümler üretildikçe sektörler tarafından tercih edilirliliğinin artacağı ve imalat sektörüne bir sıçrama yaşatacağı düşünülmektedir.

Günümüzde mühendisler, imalat kaynaklı kısıtların bu yöne doğru ilerleyen teknolojiyle birlikte ortadan kalkması sonucu, zihinlerindeki tüm tasarımları kısa sürede hayata geçirebilmekte, daha hafif ve belki de imal edilemez şekilleri gündemlerine alabilmektedirler. Eklemeli imalat için tasarım denilen yeni tasarım kriterleri de olgunlaşma aşamasındadır. Eskiden imalat yöntemlerinin kısıtlarına göre geliştirilmiş tasarım kuralları ve yaklaşımları günümüzde eklemeli imalatın avantajlarını en etkili şekilde kullanabilmek için değişmekte ve yeni tasarım kriterleri ve stratejileri geliştirilmektedir.

Tezin amacı; uzay-havacılık ve savunma sanayinde kullanımı hızla yaygınlaşan eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan EBM yönteminin literatürüne katkı yapmak ve üretim oryantasyonlarının parça özelliklerine olan etkilerini incelemektir. Tez kapsamında, EBM’de kullanılan tozların karakterizasyonunun yapılması ve farklı oryantasyonlarda üretilen numunelerin testlerinde literatürde ele alınmamış bir numune geometrisi inceleneyek geometrinin etkilerini değerlendirmek ve kıyaslamak amaçlanmıştır.

2. EKLEMELİ İMALAT VE EBM

Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde arzu edilen son ürünü elde etmek için son üründen daha büyük ölçülerde bir hammadde veya yarı mamul üzerinden fazlalıkların alınması ile son ürün elde edilir. Son yıllarda farklı bir üretim yaklaşımının sanayide kendine yer bulmaya başladığı görülmektedir, bu yöntem “Eklemeli İmalat” yöntemidir. Eklemeli imalat yönteminin bir diğer yaygın kullanılan adı katmanlı imalattır. Hızlı prototip amaçlı kullanılan genellikle polimer üretimi yapan yöntemlerde “3 boyutlu yazıcı” terimi de kullanılmaktadır. Eklemeli imalatta son ürüne genellikle katman katman malzemelerin birbirine eklenmesiyle gidilir. EBM yöntemi 90’lı yılların ortalarında ark kaynağından ilham alarak temelleri atılmaya başlanan bir yöntemdir. 1998’de elektron tabancasıyla ilk denemeler yapılmış ve 2001’de ilk tezgah oluşturulmuştur. 2003’te ilk ticari ürün “S12” modeli İsveç firması Arcam tarafından piyasaya sürülmüştür [1]. Günümüze uzanan bu süreçte Arcam firması farklı malzemeler ve farklı müşteri profilleri için bir çok model geliştirmiştir. Firmanın sahip olduğu patentlerden dolayı başka bir firma ticari bir ürün çıkaramamaktadır. Tez kapsamında üretilen numuneler A2X model makine ile ve Ti6Al4V malzemesi ile üretilmiştir.

2.1. Eklemeli İmalat Terminolojisi ve Standartları

Eklemeli imalatın terminolojisi için ASTM F2792 – 12a (güncel değil) ve ISO/ASTM 52900:2015(E) (güncel) standartlarına bakılabilir. ASTM F42 (*ing. American Society for Testing and Materials*) teknik komitesi eklemeli imalatı “Eksiltmeli üretim metodolojilerinin tersine, genellikle katman katman, 3 boyutlu model verilerinden nesneler yapmak için malzeme birleştirme süreci” olarak tanımlar. ASTM’ye göre eklemeli imalat, üretim yöntemlerinin içinde 3 ana direktten birisidir. Üretim yöntemlerinin diğer iki ana direği ise eksiltmeli üretim yöntemleri ve şekil verme yöntemleridir [2].

Yabancı literatürde eklemeli imalat yerine kullanılan yaygın ifadeler; *ing. additive manufacturing*, *ing. free form fabrication*, *ing. direct digital manufacturing*, *ing. 3D printing* vb. şeklindedir [3]. Bu terimlerin bazılarına Türkçe karşılık bulmak için bir çalışma yapılmamıştır. Türkçe’de yaygın olarak katmanlı imalat ya da eklemeli imalat

isimlendirmesi kullanılmasına karşın ortak bir dil kullanılması amacıyla henüz standardizasyon çalışması yapılmamıştır.

ASTM F42 komitesi 2009'dan günümüze her sene genellikle 100 üyesi ile 2 kere toplanır. Komite 400'e yakın üyeye sahiptir ve 6 teknik alt komitesi vardır. Komite günümüze kadar eklemeli imalat ile ilgili bir çok standardizasyon çalışması yapmıştır [4].

2.2. Eklemeli İmalat Tarihçesi

Eklemeli imalat ilk önce hızlı prototipleme ile kullanım alanı bulmuş ve hatta bu sebep ile geliştirilmiştir. Mühendisler bilgisayar destekli tasarımlarının STL (*ing. Stereolithography*) dosyası haline getirilebilmesinden sonra STL verileri üzerinden parçanın geometrisini katman katman bölebilmişlerdir. İlk olarak, ışık ile tepkimeye girerek katılacak kimyasalların katman katman taranarak STL verisindeki geometrinin elde edilmesine dayanan bir polimer bazlı 3B yazma teknolojisi olan SLA (*ing. Stereolithography Apparatus*) yöntemi geliştirilmiştir. Bahsedilen SLA teknolojisi Wohler'in 2014 raporuna göre ticarileşen ilk eklemeli imalat yöntemidir ve 1987 yılında ticarileşmiştir [5, 6].

Eklemeli imalat ticari anlamda 30 yıllık bir geçmişe sahip ve artık hızlı prototipleme ile sınırlandırılmayan, güncel uygulama alanlarında metal uygulamalar ve fonksiyonel parçalar da bulunan, hızla gelişen bir üretim yöntemidir [7].

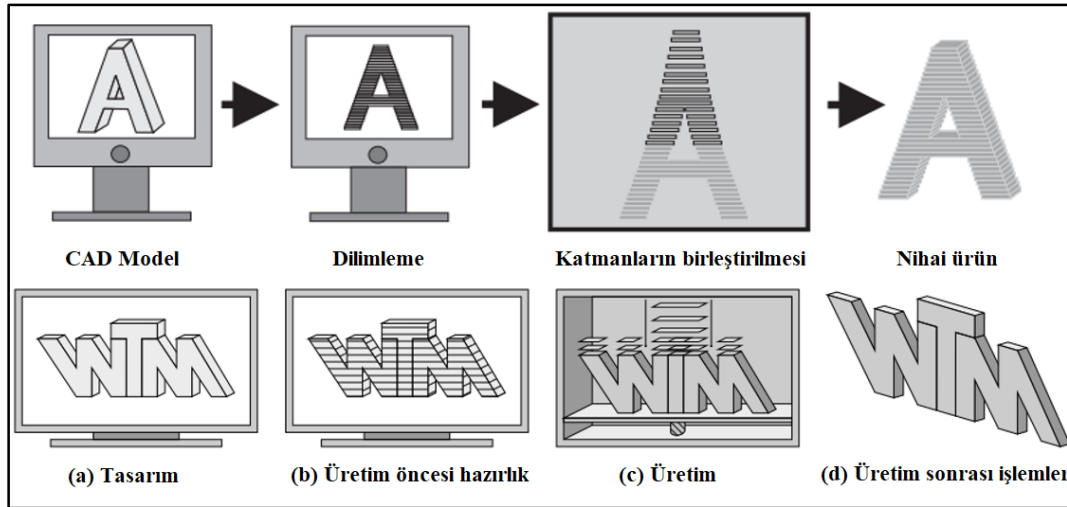
İlk zamanlarda hızlı prototipleme ve basit model yapma amacıyla başlayan bu yeni imalat teknolojisinde, zamanla kullanılan malzemelerin çeşitliliğinin artması, hassasiyetlerin iyileşmesi ve parça kalitesinde de iyileştirmelerin gerçekleşmesiyle “3F (Form, Fit, Function)” özelliklerini sağlayabilen ürünler üretilebilir hale gelmiş ve fonksiyonel parçaların da üretilmesi sağlanmıştır. İlk başlarda prototip üretimi amaçlı kullanılan bu yöntemler günümüzde son parça üretimi amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. Bu yeni ve gelişmiş teknolojinin ürün geliştirme ve imalatta devrim niteliğinde olduğu ve gelecekte bu hızla gelişmeye devam ettiği takdirde geleneksel imalat yöntemlerinin artık tamamen yetersiz kalacağı ve kullanımlarına son verileceği öngörülmektedir. Eklemeli imalata son yıllarda verilen bu denli önemle birlikte başta uzay ve havacılık, savunma sanayii, otomotiv, medikal, mimari gibi birçok alanda kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır [8, 9]

2.3. Eklemeli İmalat Süreci

Eklemeli imalatın tanımında belirtildiği gibi, son parçayı üç boyutlu model verileriyle oluşturmak önemli bir özelliktir. Model verileri, kullanıcı tarafından tasarlanan veya otomatik olarak ters mühendislik uygulanmış, bilgisayar destekli tasarım yardımıyla elde edilir. Çoğu sistem katı modeller kullanır ve istenen parçanın yüzey gösterimlerini birleştirerek karmaşık hacimler oluşturur.

Şekil 2.1’de de görülebileceği üzere eklemeli imalat süreç zinciri, dört aşamaya bölünmüştür:

1. Kavramsallaştırma: CAD (*Bilgisayar destekli tasarım, ing. Computer Aided Design*)
2. Ön işleme: İşlenebilir dosya formatlarına dilimleme (*ing. Slicing*) ve dönüştürme
3. Üretim: Makine kurulumu, oluşturma, kaldırma ve temizleme
4. İşleme sonrası işlemler.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat üretim basamakları

Eklemeli imalat; ürünlerin tasarım aşamasından ürünün kendisine gidilen yoldaki basamaklardan bazılarının azaltılması konusunda iyi kabiliyetlere sahip bir imalat yöntemidir. Ürünler üretim sonrası işlemlere (*ing. Post process*) tabi olsalar dahi çeşitli parçaların montajlanmış şekilde üretilmesi ile parçaların teker teker üretilmesinden sonra ihtiyaç duyulan montaj basamağından kurtulma imkanı sağlanabilmektedir. Benzer şekilde karmaşık parçaların üretiminde de CNC (*Bilgisayarlı sayısal kontrol, ing. Computer*

Numerical Control) tezgahında üretebilmek için farklı açılardan defalarca bağlanıp sıfırlama işlemleri yapılarak ürün üretilebilecekken toz yataklı sistemlerde ürün direkt CAD modelinden üretilmektedir.

Üretim basamaklarının birinci adımı olan tasarımda eklemeli imalata yönelik tasarım (*ing. Design for additive manufacturing - DFAM*) yaklaşımı ile üç boyutlu modeller oluşturularak eklemeli imalatın güçlü yönlerini en iyi şekilde kullanmak gerekmektedir. Üretim yöntemine uygun ve üretilabilir bir tasarım yaptıktan sonra CAD dosyasını üretime hazırlık yazılımları ile eklemeli imalat makinesinin algılayacağı formata çevirmek gerekir. Bu aşamada tarama stratejileri, katman kalınlıkları, destek yapılar, parametreler ve parçanın oryantasyonu ayarlanarak dilimleme işlemi yapılır. Üretim aşamasında dosyalar makineye aktarılır, makine temizliği ve hazırlığı yapılır daha sonra üretim başlatılır. Üretimin sonunda parça makineden çıkartılır ve üretim sonrası işlemler yapılır.

2.4. Eklemeli İmalatın Uygulamaları Güçlü Yönleri ve Geleceği

Eklemeli imalat küresel ölçekte parça imalatı ve lojistik konularında devrim yaratacak potansiyele sahiptir. Maliyet, enerji tüketimi ve karbon ayak izini azaltma potansiyeli sunarken, talep üzerine parçaların üretilmesine imkan da sağlar [10].

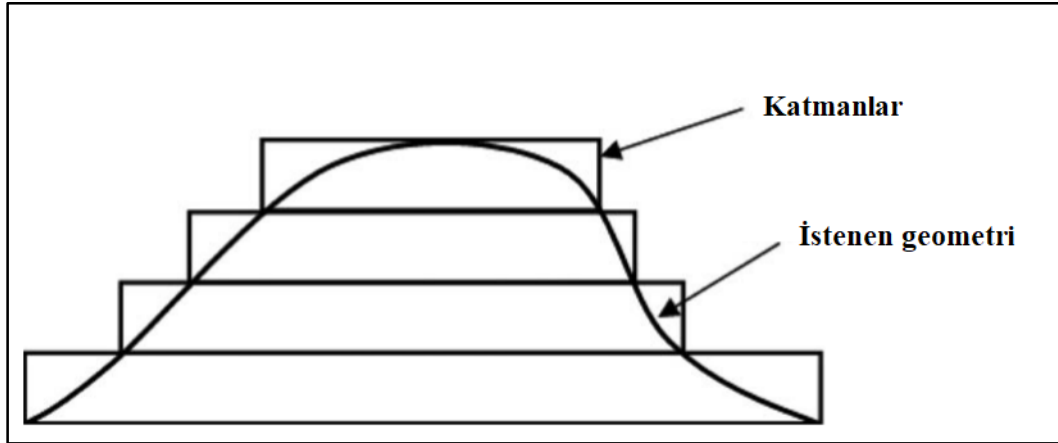
Eklemeli imalatın bazı olumlu yönleri aşağıda sıralanmıştır [11, 12]:

- Döküm parçalarınınkinden daha üstün mekanik özellikler sağlar ve dövme parçaların mekanik özelliklerine yaklaşır.
- Kafes yapıları, topolojik olarak optimize edilmiş yapılar, konfigürasyonel soğutma kanalları için girintiler vs. gibi diğer üretim yöntemleri ile üretilmesi mümkün olmayan karmaşık 3B geometriler ortaya çıkarılabilir.
- Üretim ve montaj aşamalarının ortadan kaldırılması nedeniyle üretim süresini ve maliyetini önemli ölçüde kısaltırken malzeme atıklarını ve çevresel etkileri azaltır.
- İşlem sırasında kesici takım kullanılmaz.

Eklemeli imalatın aşması gereken çeşitli zorluklar da mevcuttur. Her eklemeli imalat yönteminin kendi dezavantajları vardır. Aşılması gereken en büyük sorunlardan biri “eklemeli imalata yönelik tasarım” kriterlerinin henüz olgunlaşmamış olması ve bir çok

şeyin deneme yanılmaya ve tecrübeye dayalı olmasıdır. Metal eklemeli imalat yöntemleri ele alındığında kullanılacak malzemelerin iki özelliğe sahip olması gerekmektedir. Birincisi metalin kaynak edilebilirliği iyi olmalıdır, ikincisi ise bu metalin tozunu istenen küçük boyutlarda küresel yapıda üretebilmek mümkün olmalıdır. Halihazırda 50'den fazla farklı alaşım, yaklaşık 15 tedarikçiden atomize tozlar olarak tedarik edilebilmektedir ve çeşitli teknoloji hazırlık seviyelerinde (*ing. Technology Readiness Level, TRL*) eklemeli imalatla kullanılmaktadır. Mühendislik malzemeleri perspektifinden baktığımızda bu malzeme yelpazesi yetersiz olarak değerlendirilebilir.

Merdiven etkisi de eklemeli imalat yöntemlerine özgü bir dezavantajdır. Şekil 2.2'de eklemeli imalat yöntemlerinde meydana gelen merdiven etkisini gösteren bir görsel görülmektedir. Katman kalınlığı azaltılarak merdiven etkisi azaltılabilir ama katman sayısının artması üretim süresini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerdendir. Ayrıca yöntemlerin elde edebilecekleri yüzey pürüzlülüğü ve geometrik doğruluklar da limitlidir. Bu sebeple merdiven etkisinden kaçınmak için gereksiz yere katman sayısını arttırmamaya dikkat edilmelidir.

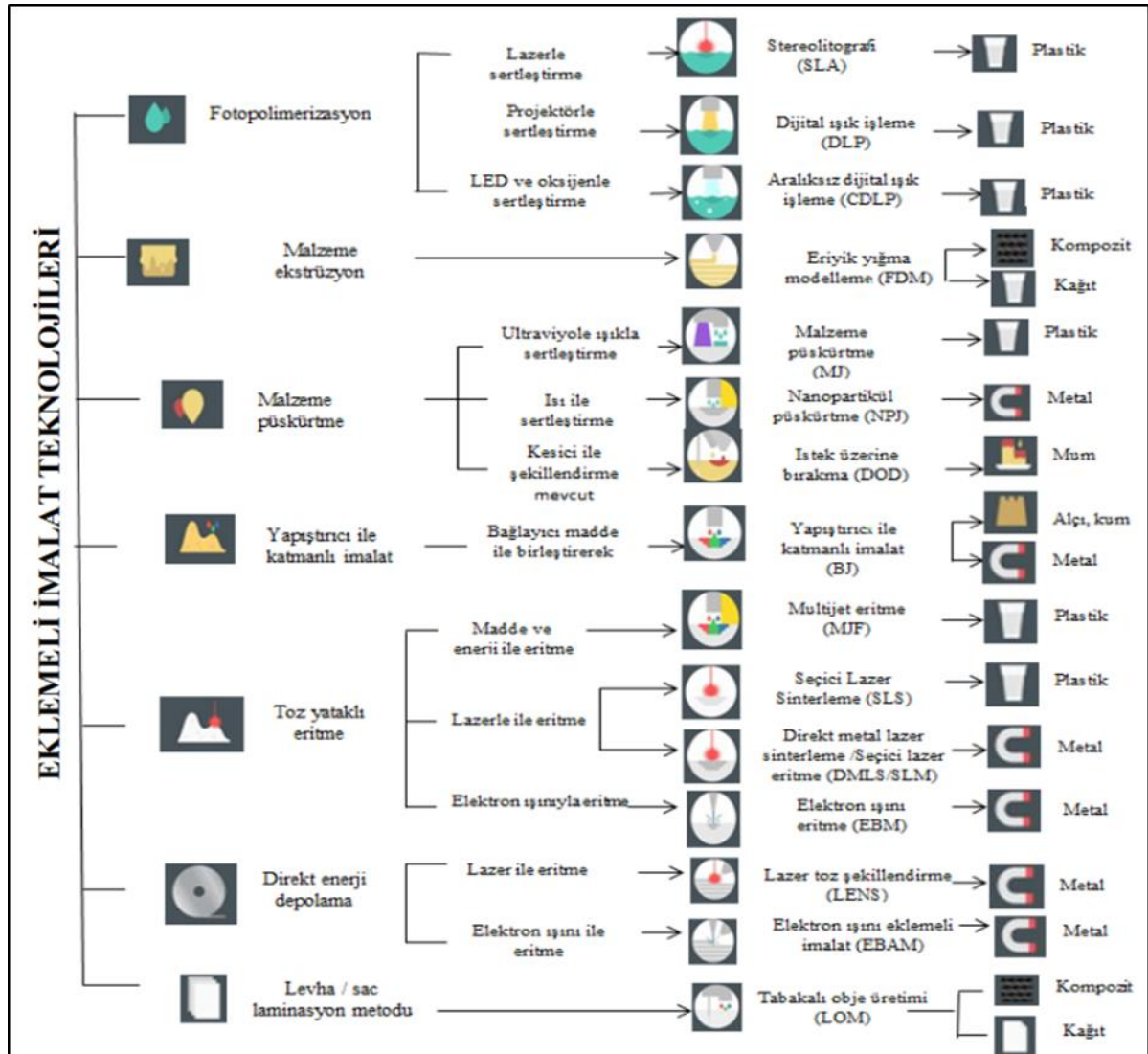


Şekil 2.2. Merdiven etkisi

2.5. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat teknolojileri 7 ana başlıkta sınıflandırılabilir. Fotopolimerizasyon yöntemi çeşitli ışıklar ile reaksiyona girerek katılacak plastik malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılır. Ekstrüzyon bazlı yöntemler bir nozul ucundan malzemenin istenen konuma bırakılması ile ve nozulun bulunduğu kafanın hareket ettirilmesiyle malzemeye istenen şeklin verildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. Malzeme püskürtme ve yapıştırıcı püskürtme

de püskürtme ile üretim yapan yöntemlerdir ve püskürtme işleminden sonra genellikle püskürtülen malzeme veya yapıştırıcıya kürlleme yapılır ve birleşme sağlanır. Toz yataklı yöntemler fonksiyonel parça üretiminde en kabiliyetli yöntemlerdir. Direkt enerji depolama yönteminde toz yataklı yöntemlerin aksine toz yatağı bir enerji kaynağı ile taranmaz fakat enerji kaynağının ergitmek üzere odaklandığı yere toz püskürtülür.. Levha/sac laminasyonu yönteminde ise malzemeler katman katman yapıştırılarak son ürün elde edilir. Şekil 2.3'te eklemeli imalat yöntemlerinin bir sınıflandırılması gösterilmiştir [5, 6].

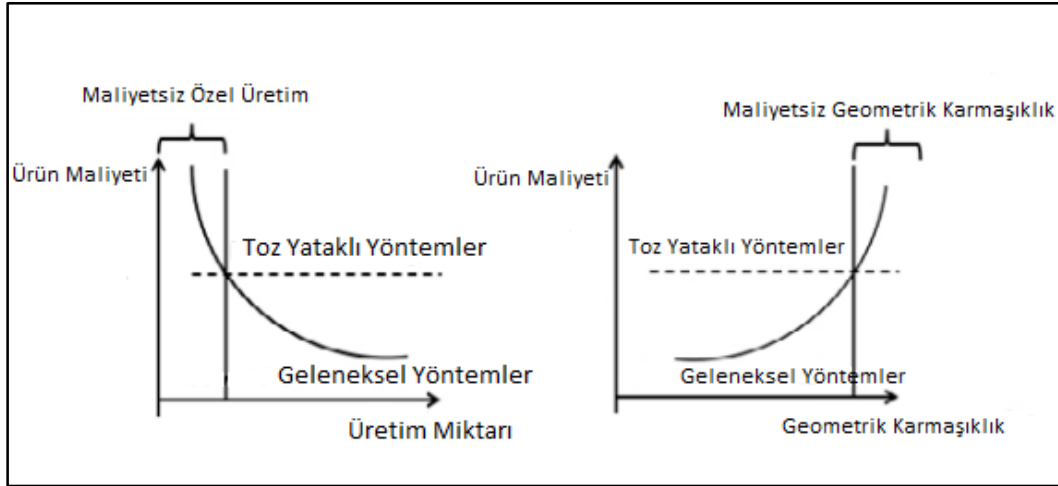


Şekil 2.3. Eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırması

2.5.1. Elektron demeti ile ergitme

Endüstride kendisine önemli kullanım alanı bulan metal eklemeli imalat yöntemlerinden biri EBM'dir. EBM tam yoğunlukta ve geleneksel imalat ile üretilen parça özelliklerine yakın mekanik özellikler taşıyan ürünler elde etmek için kullanılan toz yataklı bir eklemeli imalat yöntemidir [13]. Eklemeli imalat alanında elektron ışını kullanımı nispeten yenidir. Havacılık ve sağlık alanlarında EBM teknolojisi ile üretilmiş bir çok parça vardır. EBM iyi özelliklere sahip karmaşık parçaların üretimi konusunda diğer yöntemlerden daha masrafsızdır [14].

Şekil 2.4'te [15] toz yataklı eklemeli imalat yöntemleri ile geleneksel imalat yöntemlerinin getirdiği maliyetlerin üretim miktarı ve geometrik karmaşıklıklar karşısında gösterdiği değişimler gösterilmektedir. Toz yataklı yöntemlerin ürün başına maliyeti değişmezken geleneksel yöntemlerin maliyetlerinin geometrik karmaşıklık arttıkça arttığı ve üretim miktarı arttıkça azaldığı görülmektedir. Böylece toz yataklı yöntemler için maliyetsiz geometrik karmaşıklık bölgesi ve maliyetsiz özel üretim bölgesi oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.4. Toz yataklı yöntemlerin üretim miktarı ve malitelerinin geleneksel yöntemler ile karşılaştırılması.

Elektron ışını; kaynak, lehimleme, hurda ıslahı gibi işlemler için uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Arcam AB firması, döküm parçalarının benzer özelliklere sahip özel parçaların ve karmaşık şekilli nesnelerin üretiminde kullanılan Seçici Elektron Işını Ergitme (SEBM) veya Elektron Işını Ergitme (EBM) adı verilen yeni bir üretim süreci geliştirmiştir [16]. Firma 1997'de kurulmuştur ve elektron ışını kullanılarak toz ergitme ile ilgili aldığı

patent sayesinde EBM teknolojisini ticari anlamda kullanabilen tek firmadır. Firma EBM teknolojisini 2001’de ticari hale getirmiştir. Arcam’ın güncel ürün gamında Arcam Spectra H, Arcam Q10plus, Arcam Q20plus, Arcam A2X ürünleri bulunmaktadır [8, 17].

EBM parametreleri

EBM yönteminde bir çok parametre bulunmaktadır. Bu parametreleri kendi aralarında şu şekilde sınıflandırmak mümkündür:

1. İşleme parametreleri
 - a. Güç
 - b. Akım
 - c. Gerilim
 - d. Tarama hızı
 - e. Katman kalınlığı
 - f. Odak çapı
 - g. Elektron ışını şekli (Astigmatizm lenslerine bağlıdır)
 - h. Tarama yolunda odaklar arası uzaklık (*ing. Hatch distance*)
 - i. Tarama stratejisi
 - i. Çoklu elektron demeti özelliği
 - ii. Adacık taraması vb.
 - iii. Kontur taraması
 - iv. Ergitme “Hatch” taraması
 - v. Diğer stratejiler
 - j. Destek yapı parametreleri (*ing. support structures*)
 - i. Katı destekler
 1. Konik destekler
 2. Ağaç destekler
 3. Hacimli destekler vb.
 - ii. Katı olmayan destekler
 1. Blok destekler
 2. Ağ destekler
 3. “Wafer” destekler
 4. Kontur destekler
 5. Noktasal ve çizgisel destekler

2. Toz ve malzeme parametreleri
 - a. Toz partikül boyut dağılımı
 - b. Tozların küresellikleri, akışkanlıkları, paketlenme yoğunlukları vb.
3. Makinenin donanımsal parametreleri
 - a. Katot (filament) malzemesi
 - b. Üretim tablası sıcaklığı veya ön ısıtma parametreleri
 - c. Toz serici serme hızı serme sayısı ve serici tipi
 - d. Vakum seviyesi veya asal gaz değişkenleri vb.

Bu parametre listesi daha da genişletilebilir. İşlem sırasında değişen veya değiştirilebilen her şey bir parametredir.

SLM ve EBM yöntemlerinin farkları

EBM sistemi çalışma prensibi açısından SLM (*Seçici lazer ergitme, ing. Selective Laser Melting*) prosesine yakındır. Bir enerji kaynağının seçici şekilde toz yatağına yönlendirilerek ergiyik oluşturulması her iki işlemin de çalışma prensibidir. Prosesteki bu enerji kaynağı elektron ışını ise EBM, lazer ışını ise SLM olarak adlandırılır. Günümüzde EBM yöntemi üretim hızı $80\text{cm}^3/\text{saat}$ değerlerine ulaşabilmektedir [7]. Bu üretim hızı değerleri SLM yöntemine göre daha yüksektir. SLM makineleri donanım olarak birden fazla lazer bulundurabilmektedir ve üretim hızları bu lazerlerin güçlerine ve sayısına göre değişim göstermektedir. EBM sistemlerinde ise tek bir fiziksel elektron tabancası vardır fakat elektron demetinin 8 km/s hız ile sıçrama yaparak yönlendirilebilmesi aynı anda bir çok ergiyik havuzun aktif tutulmasını sağlamakta ve çoklu elektron demeti etkisi yaratabilmektedir. SLM teknolojisinde lazerin yönlendirilmesi mekanik sistemlere bağlıdır dolayısı ile sistemlerin reaksiyon hızları sınırlıdır. EBM yönteminde ise elektron demeti elektron tabancasındaki lenslerin manyetik alanı değiştirmesiyle kontrol edildiği için reaksiyon hızları çok daha üst seviyededir.

Ticari açıdan incelendiğinde EBM sahasında Arcam firması tek olduğu için rekabet bulunmamaktadır. SLM sahasında ise bir çok büyük firma pazarı ele geçirme yarışındadır. Concept Laser, EOS, SLM Solutions, Renishaw, Trumpf, Additive Industries, Matsuura, 3D Systems vb. bir çok firma bu sektörde tezgah satan firmalara örnek olarak verilebilir.

SLM yönteminde kullanılan toz boyutları 10-45 μm aralığındadır. Bu toz boyutu aralığı patlayıcılık bakımından ATEX 22 standartları seviyesindedir ve bu teknolojiye kullanılan tüm ekipmanlar bu standardı sağlamalıdır. Bu yüksek patlayıcılık sebebiyle proses sırasında ortam asal gazlar kullanılarak oksijenden arındırılmalıdır. Genellikle SLM yönteminde azot ve argon gazları kullanılmaktadır. Argon gazı yüksek maliyeti sebebiyle sadece çok reaktif malzemelerin işlenmesinde tercih edilmektedir. EBM yönteminde kullanılan tozlar ise 45-105 μm aralığındadır.

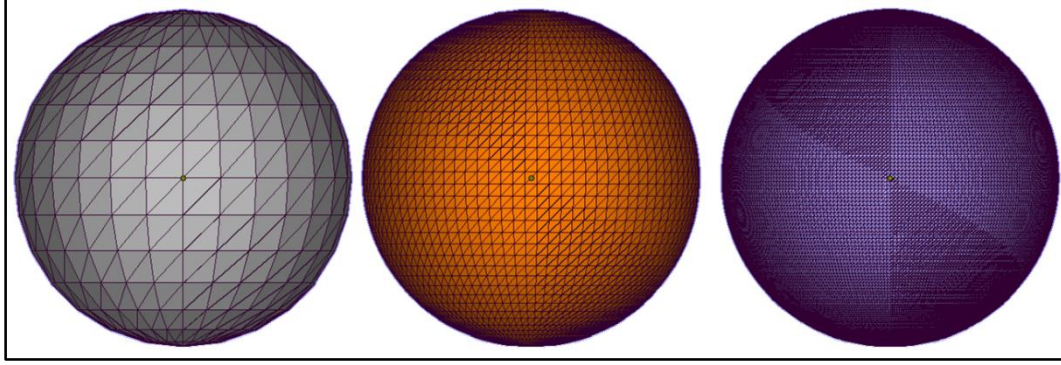
SLM ve EBM yöntemleri ile üretilen ürünler arasında yüzey kalitesi açısından büyük farklılıklar görülür. SLM yöntemi için yüzey pürüzlülüğü $5\mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 40\mu\text{m}$ aralığında ve EBM yöntemi için yüzey pürüzlülüğü $25\mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 130\mu\text{m}$ aralığındadır [18]. Şekil 2.5'te EBM ve SLM yöntemleri ile üretilmiş iki parçanın yüzeyleri arasındaki fark görülmektedir.



Şekil 2.5. EBM ve SLM yöntemleri ile üretilmiş iki parça

Yöntemlerin erişebilecekleri yüzey kalitelerine göre CAD verilerinin hazırlanmasında fayda vardır. Şekil 2.6'da CAD modelin üretim öncesi hazırlığına dair bir görsel verilmiştir. Bu

örnekte birinci küre 700 üçgenden oluşmaktadır ve toleransı 100 μm 'dir, ikinci küre 7.000 üçgenden oluşmaktadır ve toleransı 10 μm 'dir, üçüncü küre 70.000 üçgenden oluşmaktadır ve toleransı 1 μm 'dir. EBM yöntemi için en hassas kürenin üretimi ile en kaba kürenin üretimi arasında fark olmayacaktır.



Şekil 2.6. Üretim öncesi hazırlık

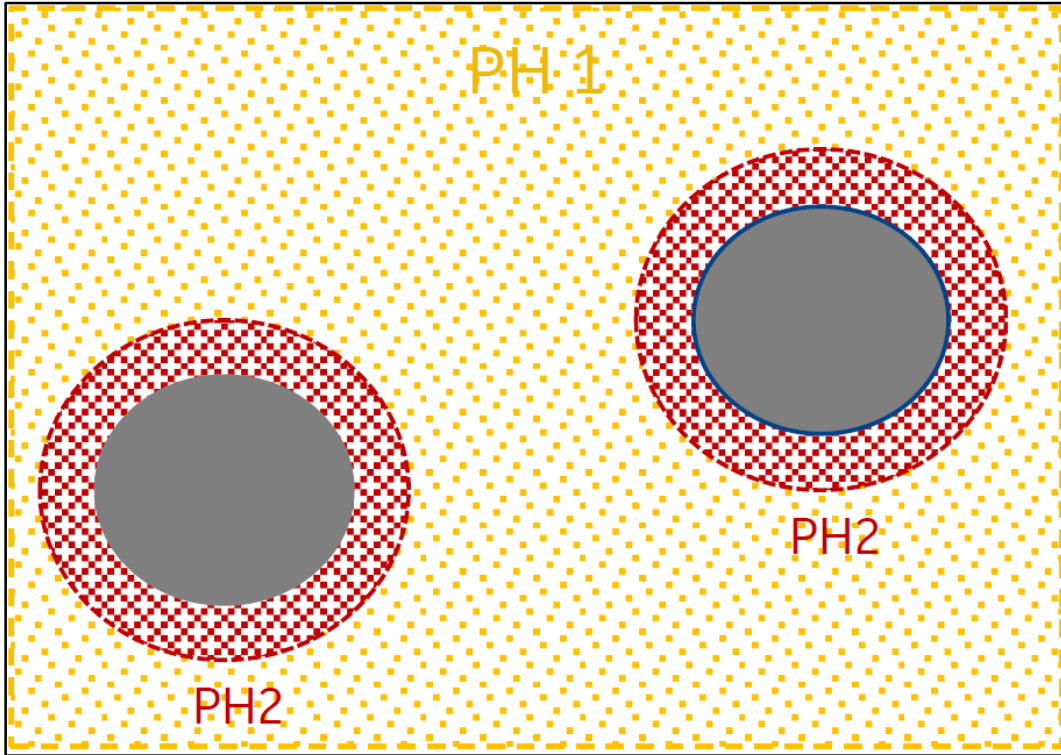
Prosesin gerçekleştiği ortam sıcaklığı ve tabla sıcaklıkları açısından yöntemleri kıyasladığımıza iki yöntem de sıcak ortamlarda gerçekleşmektedir fakat arada büyük farklar bulunmaktadır. Bir SLM parametresi olarak üretim tablasının sıcaklığı bazı modellerde ayarlanabilir olsa da bu sıcaklık EBM yönteminde üretim tablasına uygulanan ön ısıtma (*ing. Preheating*) sıcaklığının yanında çok küçük kalmaktadır. SLM yönteminde tabla 200 °C'ye kadar ısıtılabilirken EBM yönteminde malzemesine de bağlı olarak bu değer 600 – 1500 °C arasında değişmektedir.

İki yöntem arasında toz serme sistemleri açısından da farklılıklar vardır. SLM yönteminde genellikle kauçuk bir serici ile toz haznesinden katman kalınlığından bir miktar daha fazla yükseltelen toz haznesi, katman kalınlığı kadar aşağı indirilen üretim haznesi üzerine serilir. Toz haznesinin katman kalınlığından daha fazla yükselmesinin sebebi ergiyen bölgelerde teorik yoğunluğa ulaşılması sebebiyle toz ihtiyacının artması ve üretim alanını kapatacak tozun sağlanabilmesidir. Üretim alanındaki ergime alanının yoğunluğuna göre bu parametre ayarlanabilmektedir. Bazı makinelerde serme sistemine entegre edilen görüntü işleme ve kontrol yazılımları ile bu parametre dinamik olarak ayarlanabilmekte ve toz sarfiyatı minimuma indirilmektedir.

SLM ve EBM prosesleri arasındaki temel farklılıklardan birisi de destek yapıları ve kullanım amaçlarıdır. SLM yönteminde üretim tablası EBM'deki gibi bir ön ısıtmaya tabi tutulmaz,

sadece bazı cihazlarda belirli bir sıcaklığa ayarlanabilir fakat EBM tablası kadar yüksek sıcaklıklara erişilmez. Ayrıca EBM’de “*ing. Heat Model*” adı verilen ortam ve parça sıcaklığını stabil tutmayı amaçlayan bir kontrolcü vardır. Bu kontrolcü üretilen parçanın sıcaklığını dengede tutmak üzere katmana uygulanan ön ısıtmaları ve ergitmeden sonraki ısıtmaları (*ing Post heating*) ayarlar. Katmanlarda ergitme başlamadan önce her katmana ön ısıtma uygulanır. Tozlar sinterlendikten sonra tarama gerçekleştirilecek alana ikinci ön ısıtma uygulanır.

Şekil 2.7’de ön ısıtmaların uygulandığı alanlar gösterilmiştir. Birinci ön ısıtma sarı renk ile gösterilen alana uygulanır. Bu alan tabla kenarlarından beşer milimetre içeride kalan bölgeyi kapsayacak şekilde taranır.

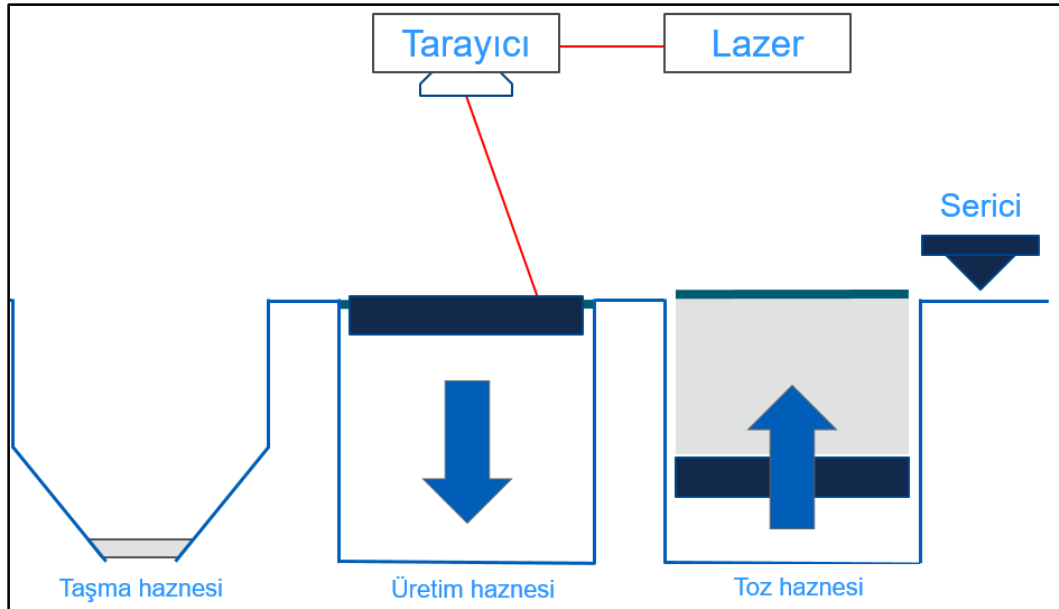


Şekil 2.7. Ön ısıtma bölgeleri

EBM prosesinin gerçekleştiği ortam vakum altında olduğu için konveksiyon ile ısı aktarımı çok zayıftır ve üretim hacminin sıcaklığının stabil tutulmasına yardımcı olur. EBM’de parçaya aktarılan enerjinin sıcaklık olarak parçada tutulması, ürün Z yönünde büyütüldükçe başlangıcı ile sonu arasındaki sıcaklık farkının minimum kalmasını sağlar. SLM’de ise inert gaz atmosferinde işlem gerçekleştiği için konveksiyon ile ısı aktarımı yüksek seviyede gerçekleşir. Taranan kesit alanı arttıkça taraması önce gerçekleşen parçalar sıcaklığını ciddi

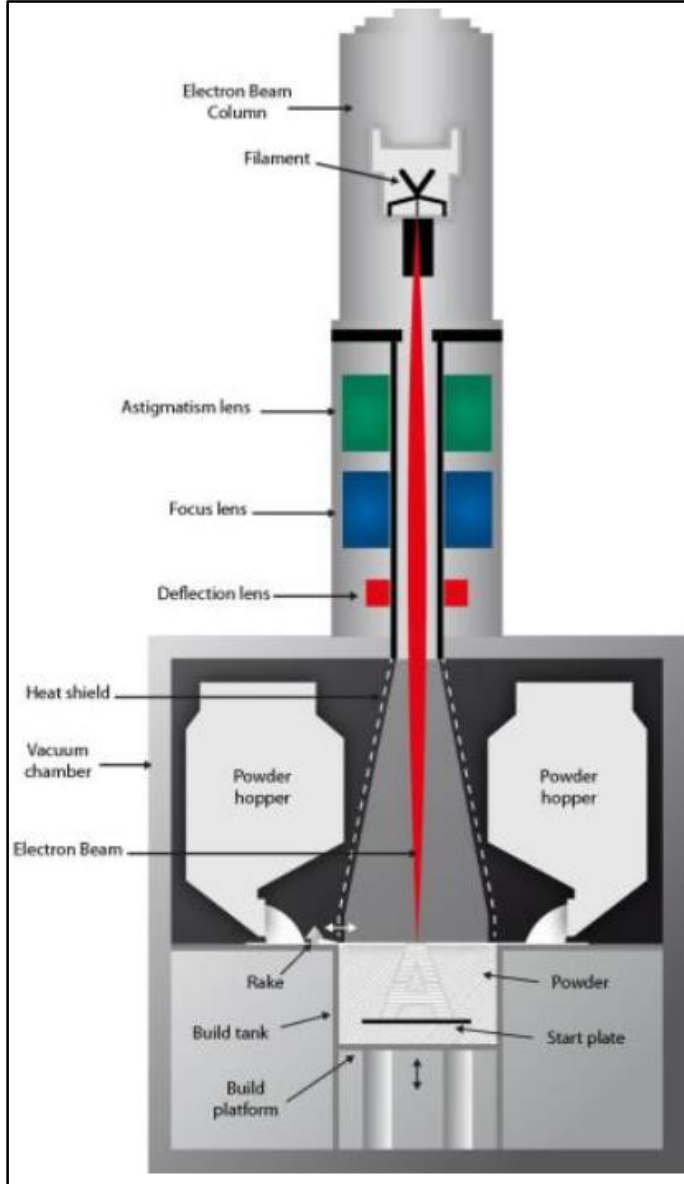
oranda kaybeder. Oluşan bu sıcaklık farkı ısı gerilmelere neden olur. Dolayısı ile SLM’de bu ısı gerilmeler sonucu oluşan çarpılmaları engellemek destek yapılarının asli görevidir. İkincil bir görev ise ısı destek sağlamaktır. EBM yönteminde kullanılan destek yapıları ise sadece sıcaklık dağılımını homojenize etmek amacıyla ısı destek olarak kullanılır.

Şekil 2.8’te [19] SLM prosesinin temsili bir görüntüsü verilmiştir. SLM yönteminde toz yatağını ergiten enerji kaynağı lazerdir. CO₂ lazerler, Nd:YAG lazerler ve fiber lazerler ticari tezgahlarda kullanılmaktadır. Yöntemde kullanılan lazerlerin dalga boyları 1.070 nm civarındadır.



Şekil 2.8. SLM prosesi şematik görüntüsü

EBM makinesi bir kontrol paneli ve turbo pompalar ile vakumlanmış bir üretim hacminden oluşur. Şekil 2.9’da [1] EBM prosesi şematik görüntüsü verilmiştir. Üretim hacmi; ayarlanabilir bir işlem platformu, iki adet toz tankı ve tozları yaymak için bir tırmık sisteminden meydana gelir. Elektron ışını genellikle bir tungsten filamandan oluşturulur. Elektronlar, 60 kV’luk bir hızlandırma voltajı kullanılarak ışık hızının 0,1 ila 0,4 katı arasında bir hıza hızlandırılır. Elektronlar elektromanyetik mercekler tarafından odaklanır ve sapmaları kontrol edilir [16]. Hızlandırılan elektronlar üretim hacmindeki toz yatağına çarparlar ve kinetik enerjilerini ısı enerjisine dönüştürerek tozları ergitirler [20].

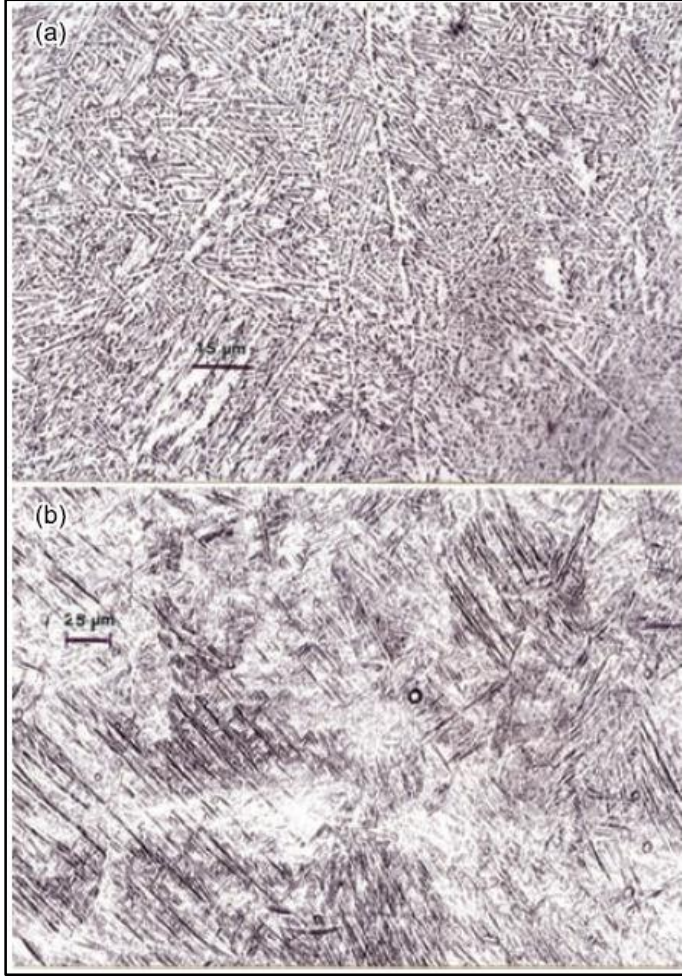


Şekil 2.9. EBM prosesi şematik görüntüsü

İlk olarak bir metal tozu katmanı, üretilecek parçaya temel oluşturması için üretim platformuna homojen bir şekilde serilir. EBM işlemi nispeten düşük elektron ışını akımı ve nispeten yüksek bir tarama hızı kullanılarak tozların ön ısıtma işlemi yapılmasıyla başlar. Ön ısıtma işleminde tozlar hafif bir bağ kurarak sinterlenir. Bu bağ kuvveti ergitme için tozlar taranmaya başladığında tozların dağılmamasını sağlar. Daha sonra elektron ışını toz yüzeyini katman verisine göre tarar, gevşek bir şekilde birleştirilen toz parçacıklarını istenen şekle sahip kompakt bir tabaka olacak şekilde ergitir [16, 20].

EBM'deki enerji kaynağı elektron olduğundan, EBM ve SLM arasında birtakım farklılıklar vardır. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da SLM ve EBM proseslerinin şematik görüntüleri

görülmektedir. SLM ile üretilmiş ürünler ve EBM ürünleri arasındaki farkları inceleyen bir çalışma Murr tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ortaya çıkan mikroyapı farklılıkları Şekil 2.10'da görülmektedir [21]. Şekil 2.10-a'da EBM ile üretilmiş Ti6Al4V mikroyapısının α fazında olduğu görülmektedir. Şekil 2.10-b'de ise SLM prosesi ile üretilmiş Ti6Al4V mikroyapısının hızlı soğumadan dolayı martenzitik bir yapıya dönüştüğü görülmektedir.



Şekil 2.10. a) EBM ile üretilmiş Ti6Al4V b) SLM ile üretilmiş Ti6Al4V

Elektron demeti, ışık hızına yakın hareket eden elektronlardan oluşur ancak lazer ışını fotonlardan oluşur. Bir elektron ışını bir gazdan geçerse, elektronlar gaz atomları ile etkileşir ve saptırılır. Bu nedenle, EBM düşük kısmi basınçta vakum ortamında uygulanır. Proses vakum altında gerçekleştiğinden, ürünün atmosferik gazlar ile etkileşime girmeden ve herhangi bir bozulma yaşanmadan yapılır [8].

Vakum ortamının metal tozlarının ergime özelliklerine etkisini anlayabilmek için vakum olmayan ortamda da bir işlem gerçekleştirilerek aradaki farklılıklar gözlemlenmeli ve

çıkarımlar yapılmalıdır. Fakat EBM prosesi vakum ortamında yapılmadığı zaman gaz atmosferi ile elektron ışınlarının etkileşmesinden dolayı proses kalitesi bozulduğu için gözlemlenen farklılıkların sadece basınç farkından olduğunu söylemek doğru olmaz. Elektron ışını ile gaz atmosferinin etkileşimi kaynaklı farklılıklar da meydana gelecektir. Bu sebeple ergiyik havuzun vakum ortamındaki davranışını incelemek için enerji kaynağı hem elektron ışını hem de lazer olarak incelenecektir.

Zhang ve arkadaşları saf titanyumun vakum ortamında lazer ile ergitilmesini inceleyen bir çalışma yapmışlardır [22]. Bu çalışmada incelenen malzeme saf titanyum olduğu için yüksek sıcaklıklarda alaşım elementleri arasındaki aktivasyon enerjisi farkından dolayı oluşan farklı buhar basınçları, farklı buharlaşma miktarları görülmemekte ve işlem sonucunda katılaştan malzemenin kimyasal kompozisyonu değişmemektedir. Choi ve arkadaşlarının titanyum alaşımlarının vakum ortamında buharlaşma kinetiğini inceleyen çalışmasına bakıldığında alüminyumun yüksek sıcaklıklardaki yüksek aktivasyon enerjisi ve yüksek buhar basıncından dolayı diğer alaşım elementlerinden daha fazla buharlaştığı ve katılaştan malzemedeki alüminyum miktarının kullanılan tozdaki alüminyum miktarından (%) kütlece daha az olduğu görülmektedir [23]. İşlem vakum ortamında gerçekleştiği için buharlaşma hızının artacağı bilinmektedir çünkü buharlaşma, buhar basıncının dış basınca eşit olduğu anda en hızlı şekilde gerçekleşir.

Ergiyik havuzun akışkan karakteristiği ergimiş metalin dinamik viskozitesine bağlıdır. Dinamik viskozite denklemi, Denklem 2.1’de verilmiştir [24].

$$\mu = \frac{16}{15} \gamma \sqrt{\frac{m}{k.T}} \quad (2.1)$$

μ : Dinamik viskozite

m : Atom ağırlığı

k : Boltzmann sabiti

T : Sıcaklık,

γ : Sıvı-katı fazları arasındaki yüzey gerilimi

Dinamik viskozite formülünde görüldüğü üzere sıcaklığın düşmesi dinamik viskoziteyi yükseltmektedir. Vakum ortamından dolayı daha düşük sıcaklıklarda ergime gerçekleşeceği için ergiyik havuzun dinamik viskozitesi vakum ortamında daha yüksek olacaktır. Uygun

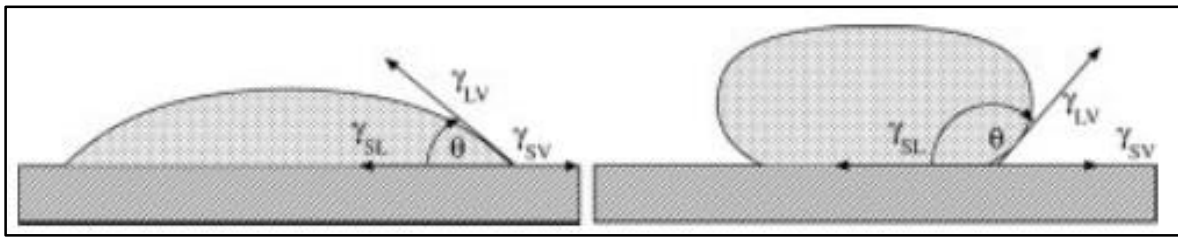
bir tarama hızıyla taranan metalin vakum ortamında oluşturacağı ergiyik havuzun daha kararlı bir yapıda olacağı söylenebilir.

Işın-metal etkileşimi sırasında meydana gelen fiziksel olaylar ve fiziksel model

SLM ve EBM prosesleri karmaşık süreçlerdir. Lazer ve elektron ışını ile toz yatağı arasında çeşitli fiziksel olgular gerçekleşir. Bu fiziksel mekanizmalar arasındaki güçlü etkileşim, süreci doğrudan etkiler ve işlenen malzemenin özelliklerini etkiler.

Sıvı fazın katı fazı ıslatma karakteristiği

Elektron ışınının tozu ergitmeye başlamasından sonra tozun hacmi azalır. Yüzey gerilimi nedeniyle ergiyik havuza daha fazla toz sürüklenebilir. Ergiyik havuz oldukça dinamiktir ve sıvı metallerin düşük viskozitesi ile birlikte yüksek yüzey gerilimi oluşur. Ergiyik havuz boyunca oluşan viskozite değişimleri sıvılaşma ve katılaşma (*ing. liquidus* ve *ing. solidus*) sıcaklıkları arasındaki viskozitenin değişmesine neden olur. Bu değişimler ürünün şeklini ve yüzey pürüzlülüğünü ciddi anlamda etkileyebilir. Bu durum stokastik (rastgele) ergiyik izlerine ve oluklu, düzensiz bir görünümün oluşmasına yol açar. Sıvı fazın katı fazı ıslatabilme karakteristiği başarılı bir işlem için çok önemlidir. Şekil 2.11'de [25] θ açısı artması ıslatabilirlik özelliğinin azaldığını gösterir.



Şekil 2.11. Sıvı fazın katı fazı ıslatma şematiği

Bir katının ıslatabilirliği; yüzey gerilimine, malzeme sıcaklığına, yüzey temizliğine-kirliliğine ve atmosfere bağlıdır. Kirlenme olmadığında bile, katı maddenin hemen hemen aynı sıcaklığa sahip olması halinde, sıvı tarafından ıslatılması problem olabilir. Bu durumda ıslatma için itici güç oluşmaz. Bir önceki tabakanın yeterli bir şekilde yeniden eritilmesini sağlamak için parametrelerin doğru seçilmesi ve hareketli ışın altında katı-sıvı arayüzünün devamlılığının sürdürülmesi önemlidir. Öte yandan, fazla enerji verilmesinin Marangoni

akışı olarak da bilinen ve ergiyik havuzun yüzey kalitesini etkileyecek sonuçları vardır. Ergiyik havuzdaki akış dengesizlikleri, ince ergiyik havuzlarının küresel damlacıklar halinde parçalanmasına yol açabilir ve bu da genellikle Rayleigh kararsızlıkları olarak adlandırılır [16, 25-27]

Ergiyik havuzda meydana gelen damlacık toplanması

Ergiyik havuzun küresel damlacıklar halinde parçalanmasına toplanmak (*ing. balling*) denir. Toplanma, ergiyik havuz boy/çap oranı 2.8-3.3 değerlerini geçtiğinde görülmeye başlanır [28]. Toplanma, pürüzlü bir yüzeye sebep olur ve tam yoğunluktaki bir parçanın elde edilmesinde zorluk yaşanmasına neden olur.

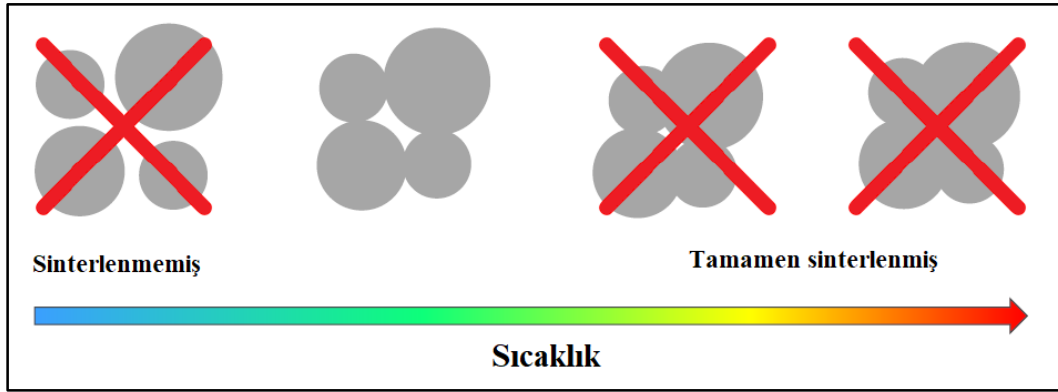
Genelde tam ergime işlemlerinde bağlanma mekanizması; yüzey gerilimi, viskozite, ıslatma, termokapiler etkiler, buharlaşma ve oksidasyon gibi durumlardan etkilenir. Elementlerin buharlaşması kaynak ve elektron ışını proseslerinde gerçekleştiği bilinen bir olgudur [25].

Ergimiş bir metalin buharlaşmasında dört farklı rejim görülür; ergiyiğin içinden yüzeyine atomların kütle taşınımı, yüzeyde gaz haline faz değişimi, gaz fazında ergiyiğin üstündeki kütle taşınımı ve son olarak yoğunlaşma. Yüksek vakum altında işlem yapılması ıslatmaya göre istenen sonuçlar vermesine rağmen, metallerin çoğu düşük basınçtan dolayı buharlaşır. Elektron ışını bazlı sistemler bir vakum ortamı gerektirdiğinden, alaşım elementlerinin buharlaşması önemli olabilir.

Toz saçılması

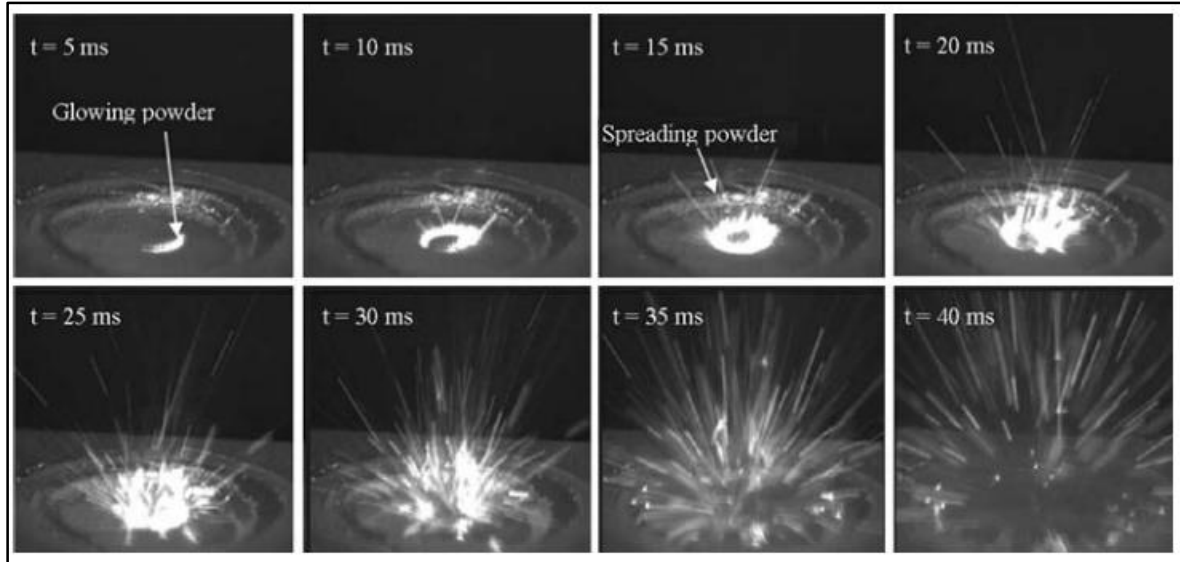
EBM prosesinde meydana gelen durumlardan biri de toz saçılmasıdır (*ing. pushing*). Toz saçılması elektron ışınının toz yatağına vurması sebebiyle tozların saçılmasıdır. Bu durum yüksek akımlı işlemlerde daha şiddetli görülür. Milberg ve diğ. toz saçılmasında etkisi bulunduğunu düşündükleri üç fiziksel etkiyi şu şekilde belirlemişlerdir; Tozdaki su kalıntıları, toz yatağına momentum aktarımı ve elektrostatik yük. Fakat yaptıkları çalışmalar saçılmaya etki eden tek olgunun elektrostatik yük olduğunu göstermiştir. Şekil 2.13'te elektron ışını ile etkileşime giren bir toz yatağında meydana gelen toz saçılması görülmektedir [29]. Diğer taraftan Qi ve diğ. elektron ışınının çarpma kuvvetinin saçılmanın ana nedeni olduğunu iddia etmiştir [30]. İşlem sırasında bu saçılmayı önlemek için tozlar

sinterlenir. Burada yapılan sinterleme tozların sadece saçılmasını engelleyecek kadar bağlanmalarını sağlamak amacıyla yapılır. Şekil 2.12’de saçılmayı önleyecek miktarda oluşturulması gereken sinter durumu görülmektedir.



Şekil 2.12. Sinterlenme sırasında sıcaklığa göre tozların kurduğu bağ miktarları

Şekil 2.13’te ön ısıtma uygulanmamış ve sinterleme gerçekleşmemiş bir toz yatağına elektron demeti vurması sonucu yaşanan saçılma görülmektedir.

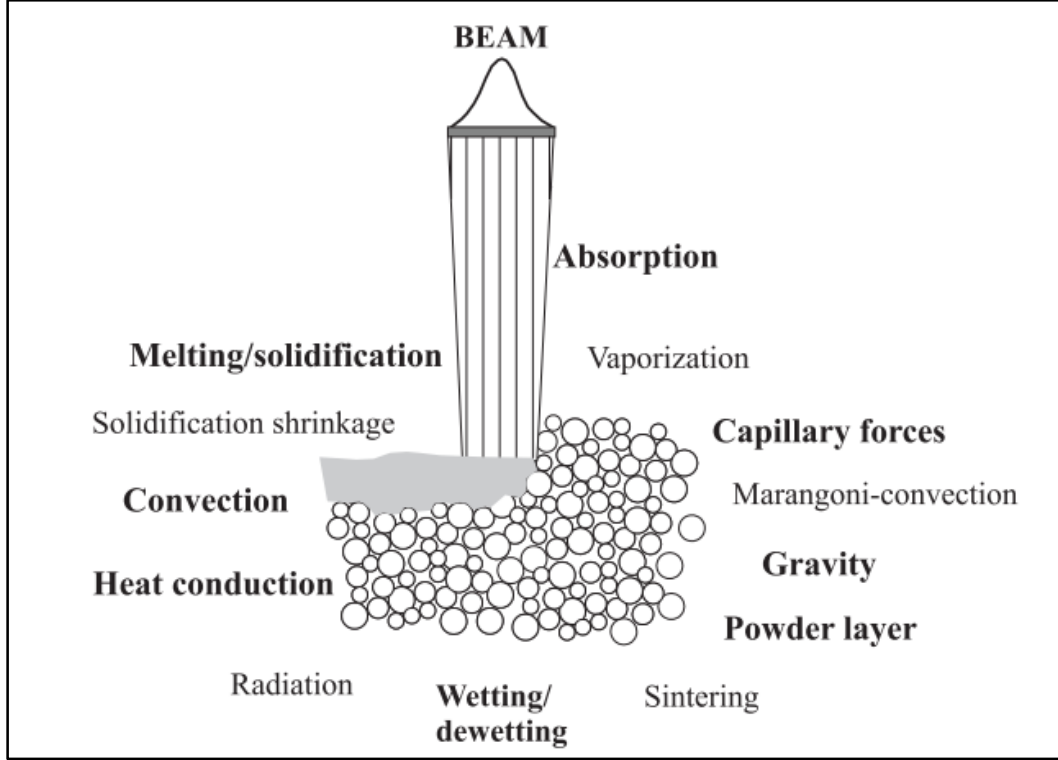


Şekil 2.13. Ön ısıtma yapılmamış bir toz yatağında meydana gelen toz saçılması görüntüleri

EBM işleminin fiziksel modeli

EBM prosesinde meydana gelen fiziksel olayların bazıları Şekil 2.14’te gösterilmiştir. Ergime-katılaşma olayları, katılaşmada yaşanan büzüşme ve hacim kaybı, buharlaşma-

metalizasyon, radyasyon, konveksiyon ve iletim yoluyla ısı aktarımı gibi bir çok olay işlem sırasında gerçekleşmektedir.



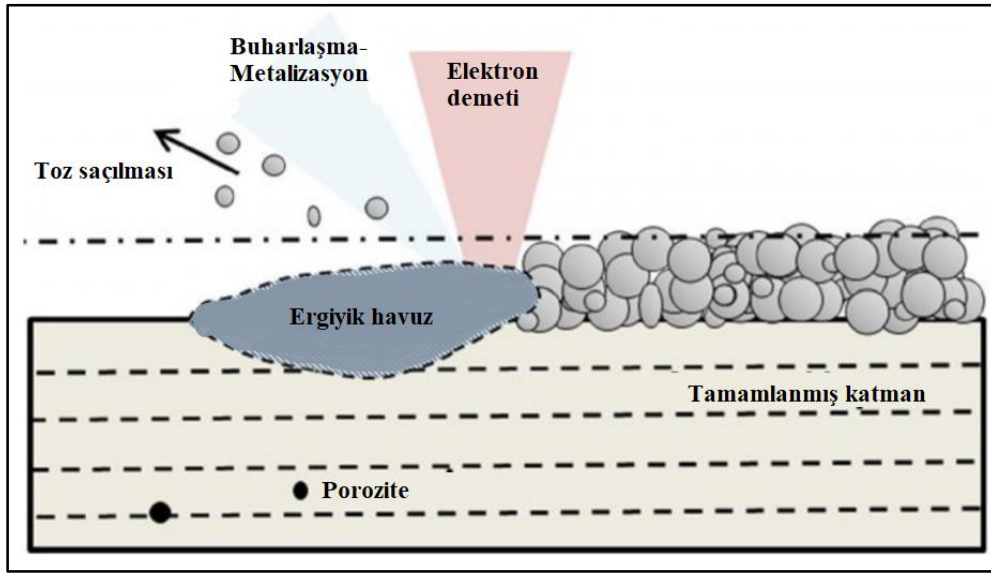
Şekil 2.14. EBM prosesi sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar

Prosesin önemli parametrelerinden bazıları da; toz yatağı toz dağılılımı, toz büyüklükleri ve katman kalınlıklarıdır. Katman kalınlıkları genelde 50 μm ile 150 μm arasında değişmektedir [31]. Arcam tarafından sağlanan doğrulanmış parametrelerde A2X makinesinde ve Ti6Al4V malzemesi için 50 μm katman kalınlığındadır.

Kullanılan tozların boyutları 45 μm – 100 μm , 45 μm – 115 μm aralığındadır [16]. Tozların sadece boyut aralıkları değil bu aralıkta gösterdikleri dağılım da paketlenme yoğunluğunu etkilediği için bu boyut aralıklarında tozların boyut dağılımı da çok önemlidir.

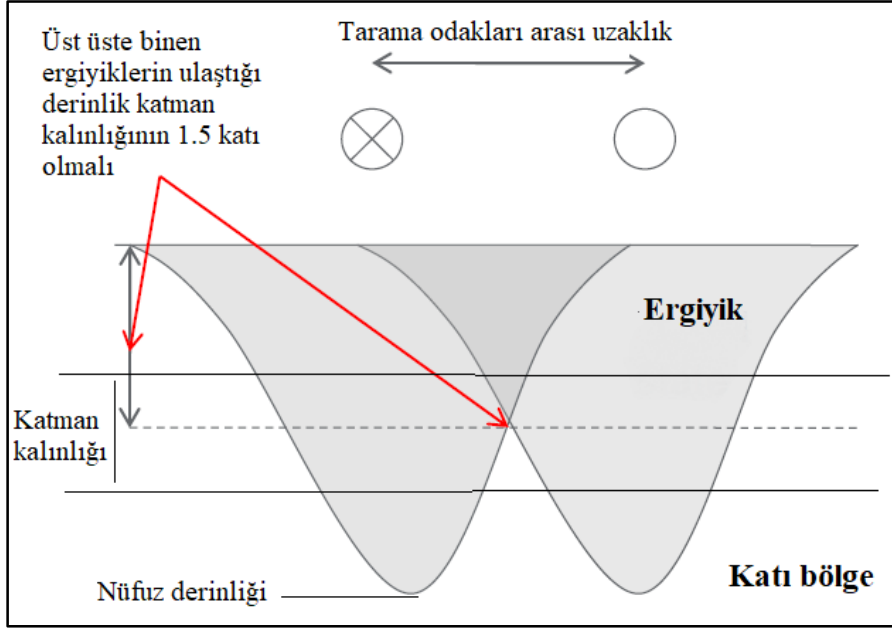
Toz yatağı toz dağılımının analizi ve modellenmesi için kullanılan bir yöntem DEM (*ing. Discrete Element Method*) dir. Bu yöntem Matthias'ın tezinde toz yatağı modellemelerinde ele alınmıştır [32].

Şekil 2.15’te verilen ergiyik havuz şematğinde görüldüğü üzere ergiyik havuz tamamlanmış katmanlara da nüfuz etmektedir. Şekilde dikkat çeken bir diğer husus da taranan bölgelerin yüksekliğinin azalmasıdır. En üstte kesikli çizgi ile belirtilen yükseklik serilen katman yüksekliğidir. Tozların birbiri arasındaki boşluklar ergime sonucu kaybolduğu için teorik yoğunluğa ulaşılır ve taranan bölgelerin yüksekliği azalır. Toz boyut aralığı 45-105 μm aralığında olan tozlar ile yürütülen işlemden 50 μm katman kalınlığı ile çalışılması bu durum ile açıklanabilir.



Şekil 2.15. Ergiyik havuz şematığı

İç yapıda porozitelerin oluşmasını engellemek açısından yeni serilen katman ertirilken daha önce ertitilen katmanlara da nüfuz edilerek ergiyik havuz oluşması sağlanır. Böylece aynı katman 2-3 sefer ertitildiği için ilk tarama sırasında oluşabilecek olan boşluklar ve gözeneklerin yok edilmesi sağlanır. Şekil 2.16’da kaliteli bir ürün için ergiyik havuzun nüfuz etmesi gereken ideal derinlik gösterilmiştir. İşlem sırasında %100 doluluğa erişmek çok zordur. Genellikle sıcak izostatik basınç (HIP – *ing. Hot Isostatic Pressing*) uygulaması gibi üretim sonrası işlemler ile %100 doluluğa yaklaşılar.



Şekil 2.16. İdeal nüfuz derinliği

EBM yönteminde kullanılan malzemeler

EBM yönteminde günümüzde TiAl, Ti6Al4V, CoCr (F75), Inconel 718 malzemelerini firmadan doğrulanmış parametreleriyle birlikte tedarik etmek mümkündür. Bunun dışında Arcam firmasının verdiği eğitimlerin üç seviyesini de tamamlayan kişiler açık parametre çalışma yetkisini elde eder. Farklı malzemeler ile çalışan ve kendi malzemelerinin parametrelerini geliştiren kişiler ve kurumlar bulunmaktadır fakat Arcam firması bu malzemeleri ve parametreleri tedarik etmemektedir.

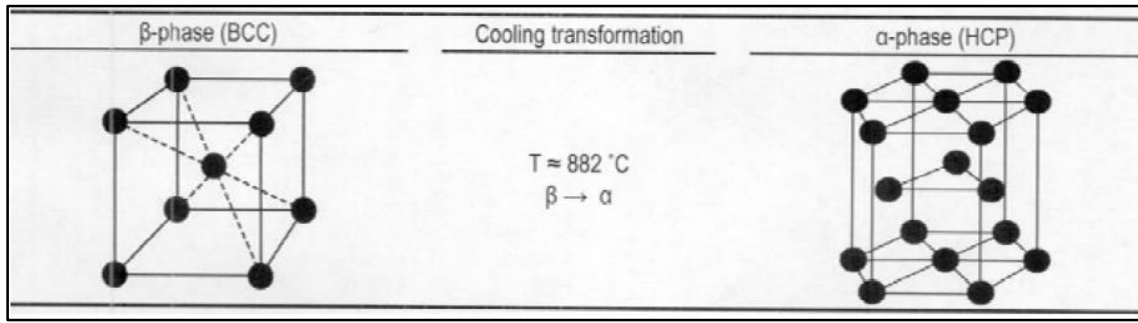
Ti6Al4V alaşımı

Çok sayıda titanyum alaşımları geliştirilse de titanyum alaşımları; α alaşımları, β alaşımları ve $\alpha+\beta$ alaşımları olarak üç ana kategoride gruplandırılabilir. Özellikleri ise kimyasal kompozisyonlarına ve mikroyapılarına bağlıdır [33]. Yüksek spesifik mukavemetleri ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle, titanyum alaşımları mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır.

Saf titanyum düşük ısı iletkenliğine, göreceli olarak düşük yoğunluğu ve elastik modüle, iyi korozyon direncine ve çeşitli elementlerle yüksek reaktiviteye sahiptir.

Tez kapsamında incelenen Ti6Al4V ise $\alpha+\beta$ alaşımdır. Sıra dışı özelliklere kesinlikle ihtiyaç duyulmadıkça, alaşım seçimi yapmak için daha yaygın kullanılan alaşımları tercih etmek akıllıca olur, Ti6Al4V alaşımı ise açık ara en yaygın kullanılan titanyum alaşımdır. Titanyumun ticari olarak temin edilebildiği yaklaşık 50 yıl boyunca, birçok alaşım geliştirilmiştir ancak hiçbiri Ti6Al4V'nin sahip olduğu neredeyse %50 pazar payına yaklaşmamıştır [34].

Düşük sıcaklıklarda, saf titanyum α -titanyum denilen altıgen kapalı paketlenmiş bir atom yapısına (HCP - *ing. Hexagonal Close Packed*) sahiptir. Ancak yüksek sıcaklıklarda stabil yapı, β titanyum olarak adlandırılan hacim merkezli kübiktir (BCC - *ing. Body Centered Cubic*). Bahsedilen kafes kristal yapısı, Şekil 2.17’de gösterilmektedir.



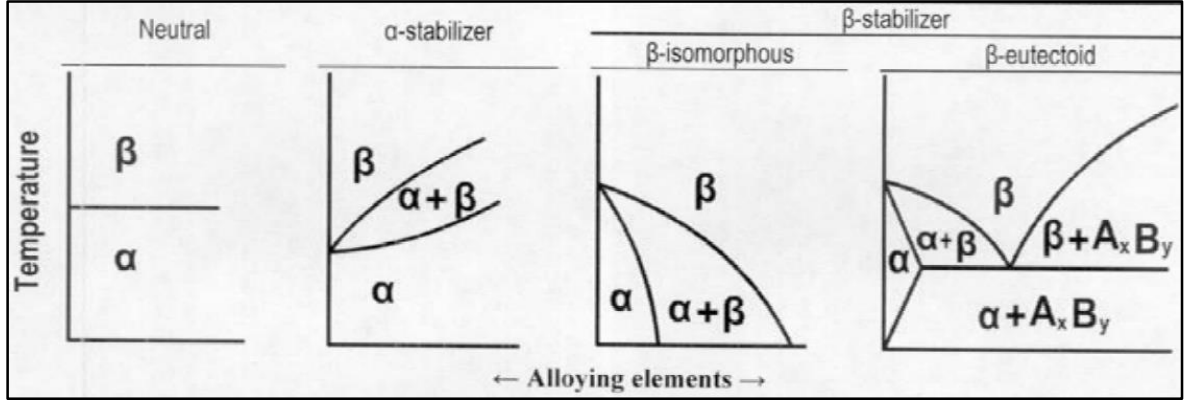
Şekil 2.17. Titanyum birim hücre yapıları

Saf titanyum için β faz değişim sıcaklığı yaklaşık 882°C 'dir ve safsızlıkların miktarına bağlıdır [35]. İki farklı kristal yapının varlığı ve birbirlerine oranları, çok çeşitli titanyum alaşımlarının özelliklerinin temelidir.

Titanyum alaşımları için alaşım elementleri, α veya β fazlarını dengeleme üzerindeki etkisine göre nötr, α -stabilizatörleri veya β -stabilizatörleri olarak sınıflandırılır [33, 35].

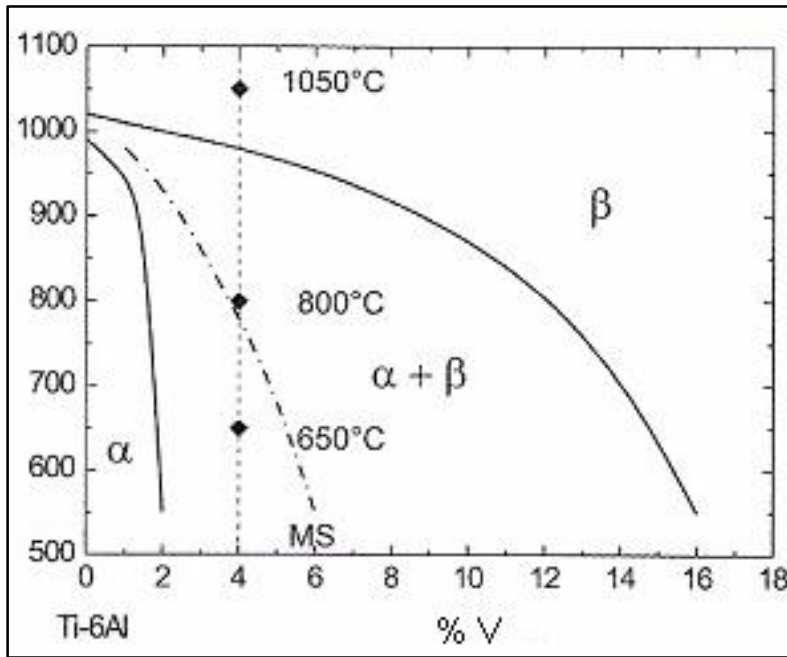
Çizelge 2.1’de çeşitli alaşım elementlerinin kafes yapısında “yer alan atomu” veya “arayer atomu” olarak mı yer aldığı gösterilmiştir. Ayrıca bu elementlerin α ve β fazlarına olan etkileri de verilmiştir.

α stabilizatörleri β faz değişim sıcaklığını yükseltir, β stabilizatörleri ise β faz değişim sıcaklığını düşürür. Alüminyum en önemli α -stabilizatörüdür, molibden ise en önemli β -stabilizatörüdür.



Şekil 2.19. Alaşım elementlerinin α ve β fazlarına etkileri

Şekil 2.20'de Ti-6Al alaşımının Vanadyum miktarı ve sıcaklığa göre α - β faz diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.20. Ti6Al4V faz diyagramı

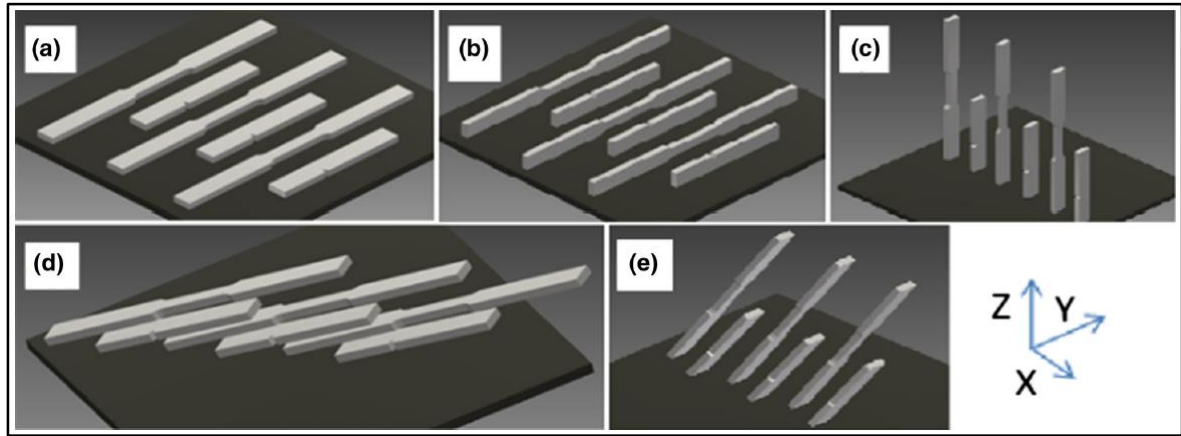
Çizelge 2.2'de Arcam'ın sağladığı Ti6Al4V tozlarının ve ASTM standartlarına göre toz yataklı eklemeli imalat işlemlerinde kullanılır Ti6Al4V ürünlerinin kimyasal kompozisyonları verilmiştir [36].

Çizelge 2.2. Ti6Al4V alaşımının ASTM standardına göre (%) kütlece kimyasal kompozisyonları

	Arcam Ti6Al4V	ASTM F2924-14 [37]. Ti6Al4V
Al	6	5,5-6,75
V	4	3,5-4,5
C	0,03	<0,08
Fe	0,1	<0,3
O	0,15	<0,2
N	0,01	<0,05
H	0,003	<0,015
Ti	Geri kalan	Geri kalan

3. LİTERATÜR

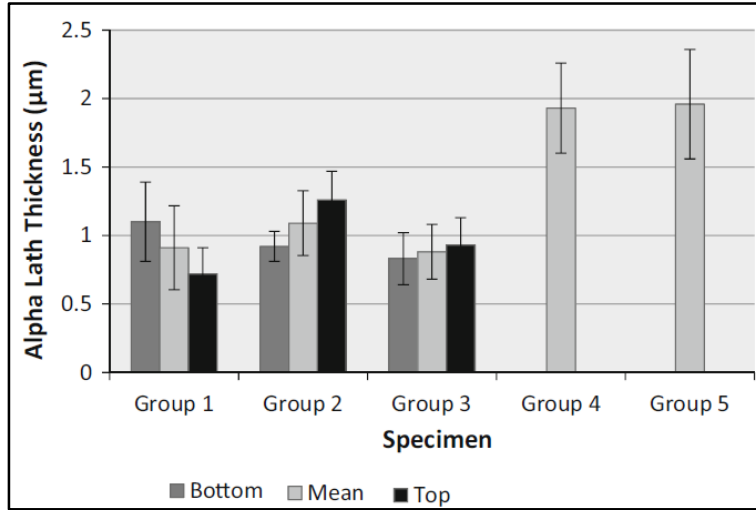
Literatürde Bruno ve arkadaşları EBM yönteminde ve Ti6Al4V malzemesi için üretim oryantasyonlarının mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisini inceleyen bir çalışma yapmıştır [38]. Bruno'nun çalışmasında çekme numuneleri levha tipinde numuneler olduğu için parçanın kendi eksenindeki oryantasyonu da sonuçları etkilemektedir. Ayrıca bu çalışma Arcam EBM S12 makinesiyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada standart dışı çentik darbe numuneleri test edilmiştir. Çentik darbe testinin yapıldığı düzenek 3 mm'den fazla numune kıramayacağı için bu testler standart dışı gerçekleştirilmiştir. Birbirine eş özelliklerde üçer adet numune test edilmiştir. Şekil 3.1'de numune grubu görülmektedir.



(a) XY, (b) ZX, (c) ZY, (d) 30° to XY plane and (e) 60° to XY plane

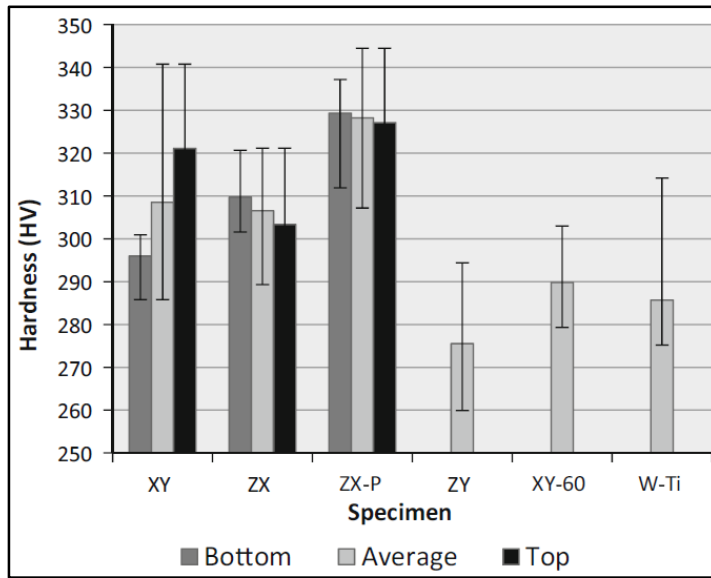
Şekil 3.1. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gurubu

Çalışmada α çita kalınlıkları ile ilgili araştırma da yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.2'de görülmektedir.



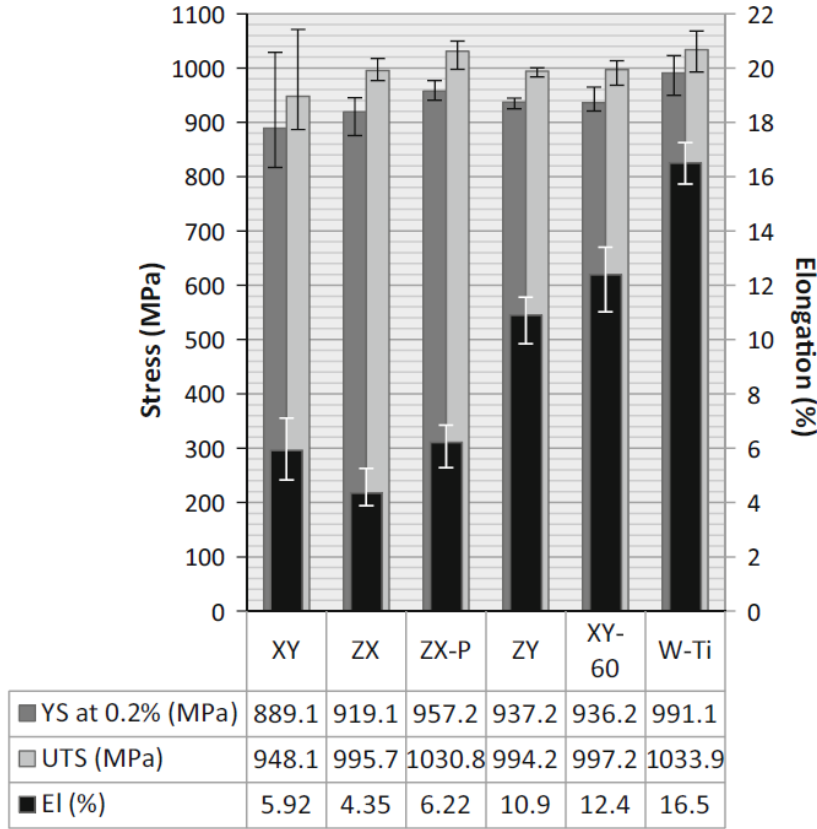
Şekil 3.2. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gruplarında oluşan α çita kalınlıkları

Şekil 3.3'te ölçülen sertlikler görülmektedir. Çalışmanın sonuçları standart sapmaların çok yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.3. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gruplarında ölçülen sertlikler

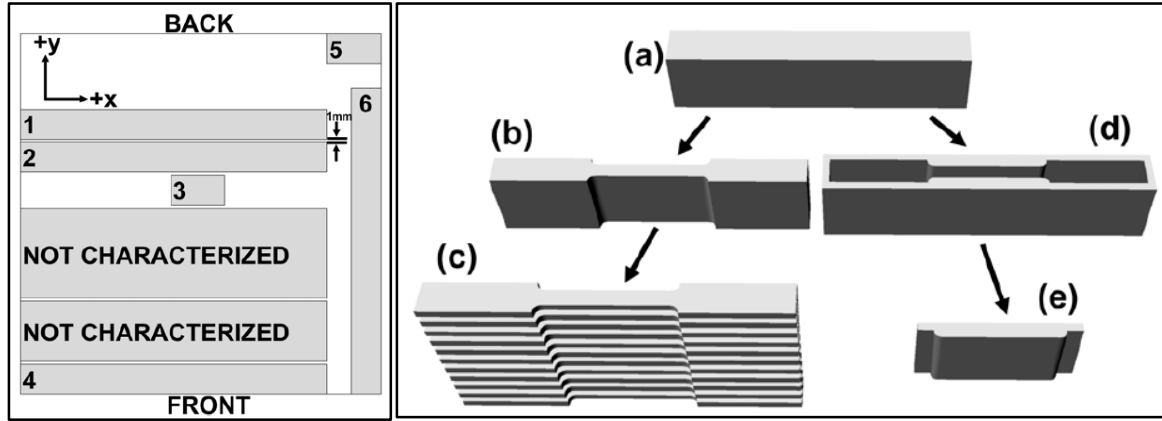
Şekil 3.4'te XY ve ZX gruplarının % uzama miktarları ve çekme dayanımları arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu durum numune gruplarındaki oryantasyon aynı olmasına rağmen numune tipin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.4. Bruno ve arkadaşlarının incelediği numune gruplarında çekme gerilmeleri ve %uzama miktarları

Sonuç olarak Bruno ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada standart dışı çentik darbe numuneleri test edilmiş, yatay oryantasyonda üretilen XY ve ZX numunelerinin çekme sonuçlarındaki farklara bakıldığında numune tipinden kaynaklanan sonuç farklılıkları gözlemlenmiştir. Sertlik testlerinden elde edilen sonuçların standart sapmaları çok yüksek olarak tespit edilmiştir.

Hrabe ve arkadaşlarının EBM yönteminde oryantasyon ve konum mikroyapı ve mekanik özellikler hakkında yaptığı çalışmada [39] Ti6Al4V malzemesi için dikey çekme numunelerinin yatay numunelere göre %30 daha az %uzama özelliği gösterdiği sonucuna varılmıştır. Oryantasyonun yanında etkisi incelenen konum parametresinin etkisi %3'ten daha az olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada da levha tipinde numuneler test edilmiştir. Bu çalışmadaki numune lokasyonları ve numune tipleri Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Hrabe ve arkadaşlarının ürettiği numune grubu lokasyonları

Hrabe ve arkadaşlarının elde ettiği sonuçlar Çizelge 3.1’de görülmektedir.

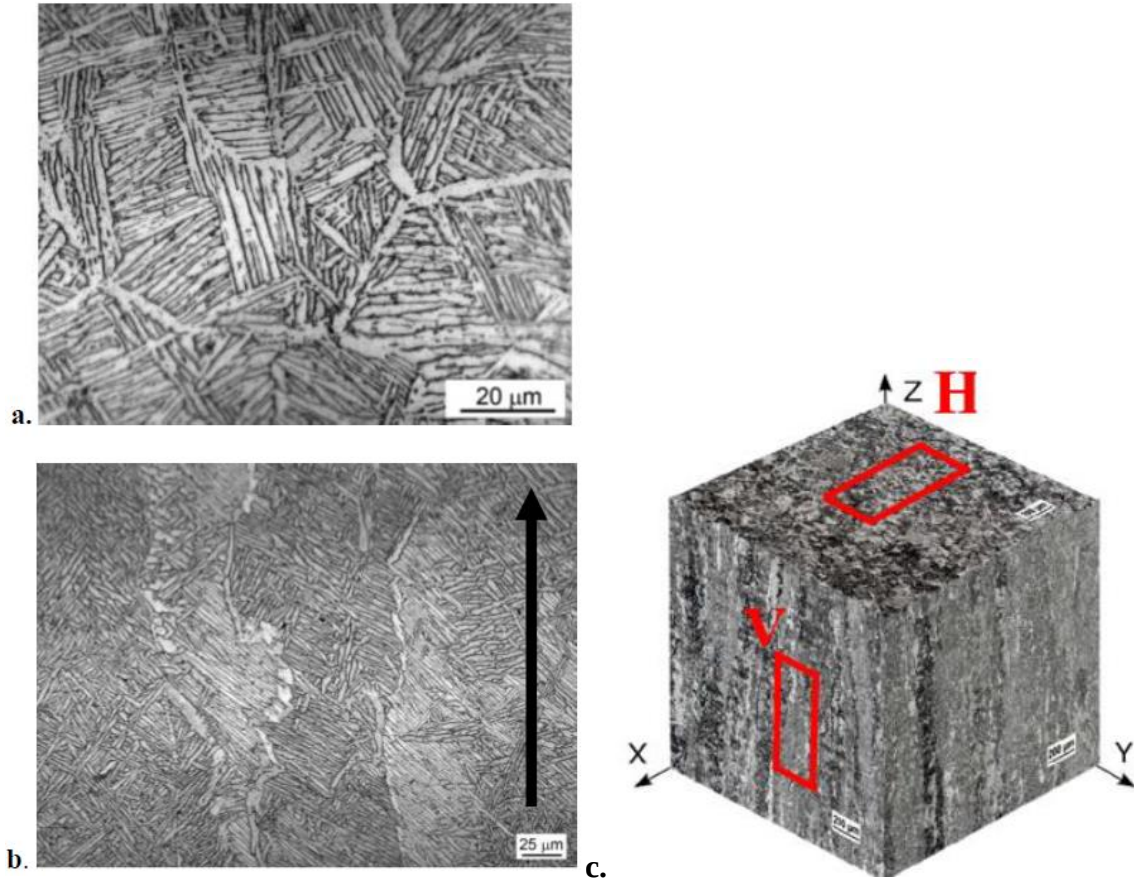
Çizelge 3.1. Hrabe ve arkadaşlarının elde ettiği sonuçlar

part	description	UTS (MPa)	YS (MPa)	% EL	α lath thickness (μm)	microhardness (HV)
2	interior	1029.7 $\pm$ 7.0	982.9 $\pm$ 5.7	12.2 $\pm$ 0.8	0.95 $\pm$ 0.31	372.0 $\pm$ 7.2
4	exterior	1017.4 $\pm$ 4.9	966.5 $\pm$ 5.3	12.2 $\pm$ 2.0	0.91 $\pm$ 0.24	360.1 $\pm$ 8.1
ANOVA	p-value	0.0003	<0.0001	>0.9999	0.02	<0.0001
part	description	UTS (MPa)	YS (MPa)	% EL	α lath thickness (μm)	microhardness (HV)
3	interior	1032.9 $\pm$ 12.9	984.1 $\pm$ 8.5	9.0 $\pm$ 2.9	0.96 $\pm$ 0.26	367.6 $\pm$ 8.3
5	exterior	1008.6 $\pm$ 15.2	961.0 $\pm$ 7.1	7.1 $\pm$ 3.4	0.96 $\pm$ 0.27	368.4 $\pm$ 5.8
ANOVA	p-value	0.0013	<0.0001	0.2	>0.9999	0.69
part	description	UTS (MPa)	YS (MPa)	% EL	α lath thickness (μm)	microhardness (HV)
2	horizontal	1029.7 $\pm$ 7.0	982.9 $\pm$ 5.7	12.2 $\pm$ 0.8	0.95 $\pm$ 0.31	372.0 $\pm$ 7.2
3	vertical	1032.9 $\pm$ 12.9	984.1 $\pm$ 8.5	9.0 $\pm$ 2.9	0.96 $\pm$ 0.26	367.6 $\pm$ 8.3
ANOVA	p-value	0.5	0.72	0.01	0.65	0.02
part	description	UTS (MPa)	YS (MPa)	%EL	α lath thickness (μm)	microhardness (HV)
4	x-oriented	1017.4 $\pm$ 4.9	966.5 $\pm$ 5.3	12.2 $\pm$ 2.0	0.91 $\pm$ 0.24	360.1 $\pm$ 8.1
6	y-oriented	1036.3 $\pm$ 4.8	993.1 $\pm$ 6.5	11.1 $\pm$ 2.2	0.80 $\pm$ 0.24	368.1 $\pm$ 7.0
ANOVA	p-value	<0.0001	<0.0001	0.26	<0.0001	<0.0001

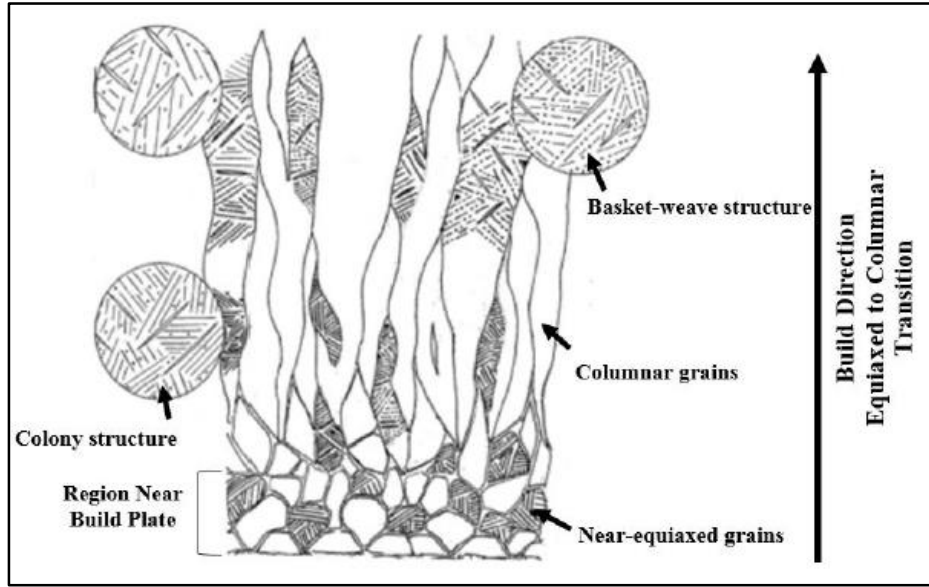
Sonuç olarak Hrabe ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2 oryantasyonda (yatay ve dikey) levha tipi numune ile inceleme yapılmış ve konumun mekanik özelliklerine de bakılmıştır.

Ayrıca çalışmada α çıta kalınlıklarına da bakılmıştır. Bu çalışmada çentik darbe numunelerine dair bir araştırma yürütülmemiştir.

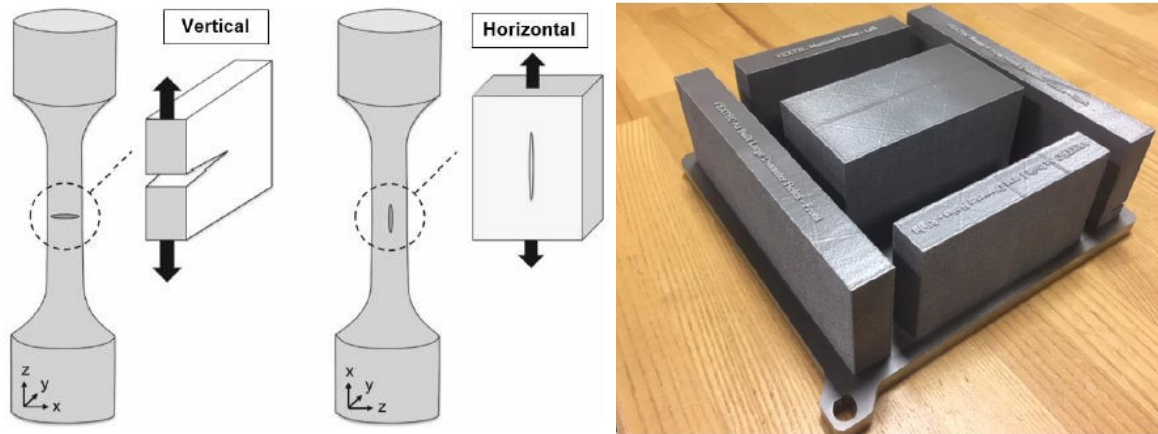
Chern'in yaptığı tez çalışmasında [40] EBM ile ve Ti6Al4V malzemesinden üretilen dikey ve yatay numunelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Ayrıca çalışmada elde edilen mikroyapı görüntülerinden bazıları Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Şekil 3.8'de ise incelenen numuneler görülmektedir. Numuneler son haline talaşlı imalat ile getirilmiş ve yüzey pürüzlülükleri giderilerek testler yapılmıştır. Yorulma dayanımında yüzey pürüzlülüklerinin etkisinin çok yüksek olduğu bilinmektedir. Numuneler Arcam EBM Q10 makinesi ile üretilmiştir.



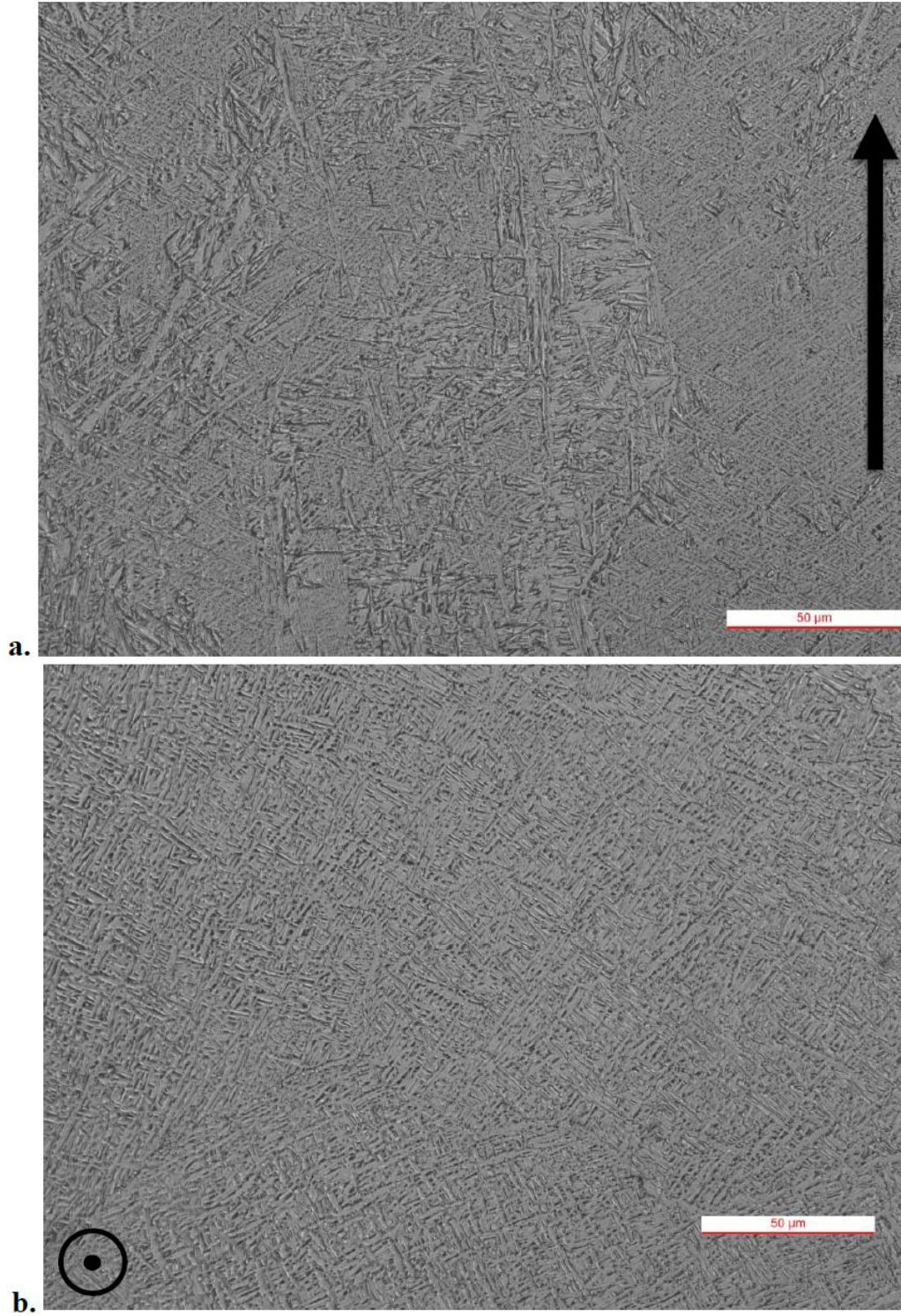
Şekil 3.6. Chern'in elde ettiği mikroyapı görüntüleri a) XY düzleminde b) üretim yönünde c) 3 boyutlu mikroyapı görüntüsü



Şekil 3.7. Üretim yönünde uzamış taneler



Şekil 3.8. Chern'in çalışmasında incelenen numuneler

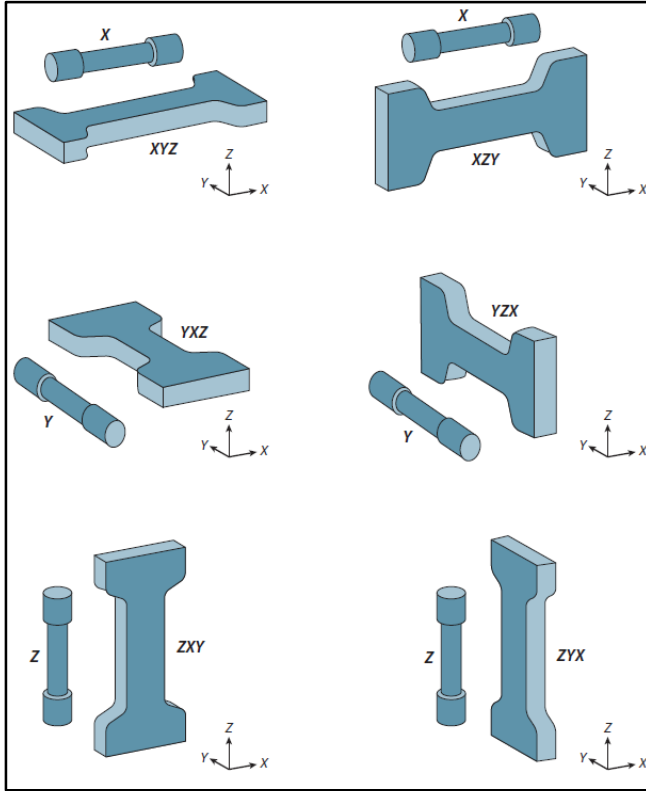


Şekil 3.9. Chern'in çalışmasında ortaya çıkan mikroyapılar

Sonuç olarak testleri yapılan numunelerin üzerinden ciddi miktarda talaş kaldırılarak son şekilleri verilmiş ve üretim sırasında mekanik özelliklere etki eden şekil faktörünün bu çalışmada incelenmesi gerçekleştirilememiştir. Çalışma yorulma üzerine gerçekleştirilmiş ve mikroyapıda oluşan mikro çatlakların yönlerinin parça oryantasyonunda etkileri

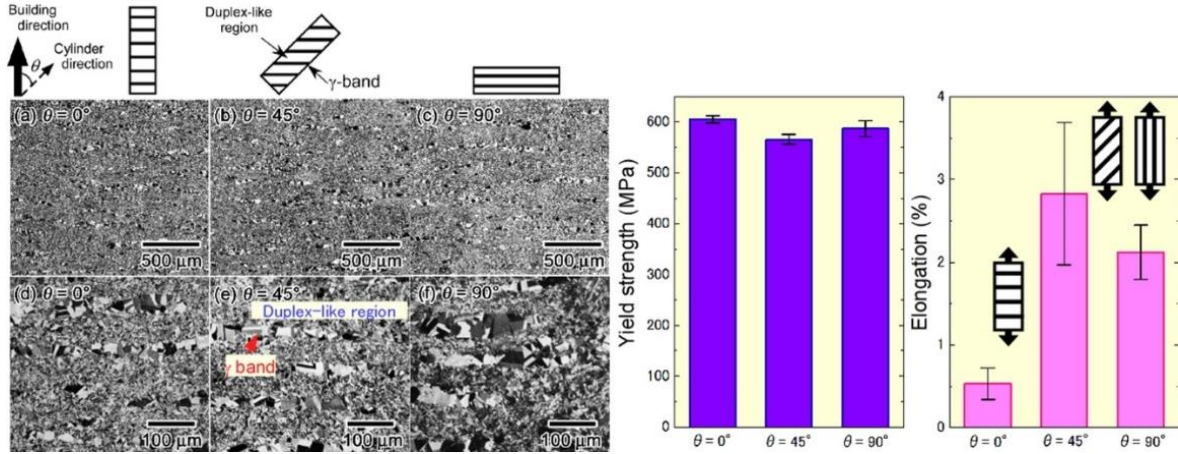
incelenmiştir. Çalışmada üretilen parçaların tamamı büyük hacimde parçalar olduğu için parçalardaki enerji girdileri her katmanda çok yüksek ve soğuma hızları düşük olmuştur ve her bir numunede benzer mikroyapılar görülmüştür. Oluşan aynı tip mikroyapıların kolonlara dik yönde ve kolonlara paralel yönde kuvvete karşı yorulma dayanımları incelenmiştir.

Lewandowski ve Seifi metal eklemeli imalat yöntemlerinin mekanik özelliklerini derleyen bir çalışma yapmışlardır [41]. Bu çalışmada SLM, EBM, DED (*ing. Direct Energy Deposition*), WAAM (*ing. Wire Arc Additive Manufacturing*) vb. birçok yöntem ve çok sayıda alaşım ile ilgili yapılan çalışmaların sonuçları derlenmiştir.



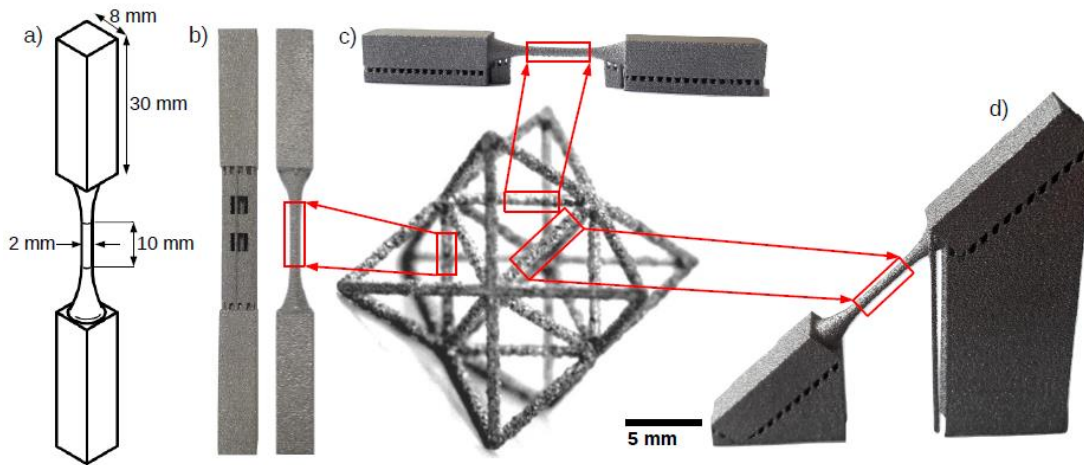
Şekil 3.10. Lewandowski ve Seifi'nin derlediği sonuçlarda incelenen numuneler

Todai ve arkadaşları EBM'de üretim oryantasyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması ile ilgili Ti-48Al-2Cr-2Nb alaşımıyla bir çalışma yürütmüştür [42]. Bu çalışmada üç açıda test edilmiş ve bulunan sonuçlar Şekil 3.11'deki gibi aktarılmıştır.



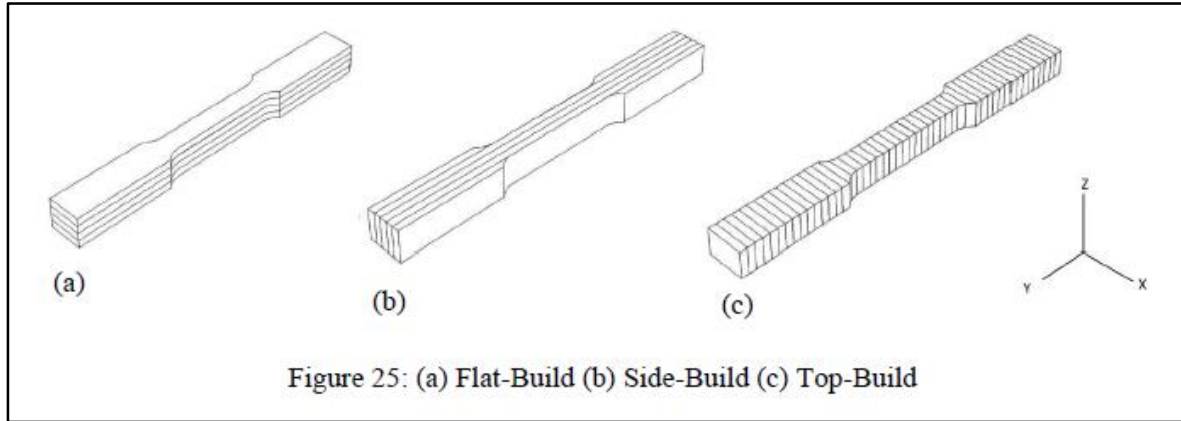
Şekil 3.11. Todai ve arkadaşlarının elde ettiği sonuçlar

Persenot ve arkadaşları EBM yöntemi ile Ti6Al4V malzemesinden üretilen lattice yapıların yorulmalarını araştıran bir çalışma yapmıştır [43]. Çalışma kapsamında incelenen lattice yapıda 3 farklı oryantasyonda kafes elemanları uzanmaktadır. Bu üç kafes elemanını temsilen üretilen ve test edilen geometriler Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



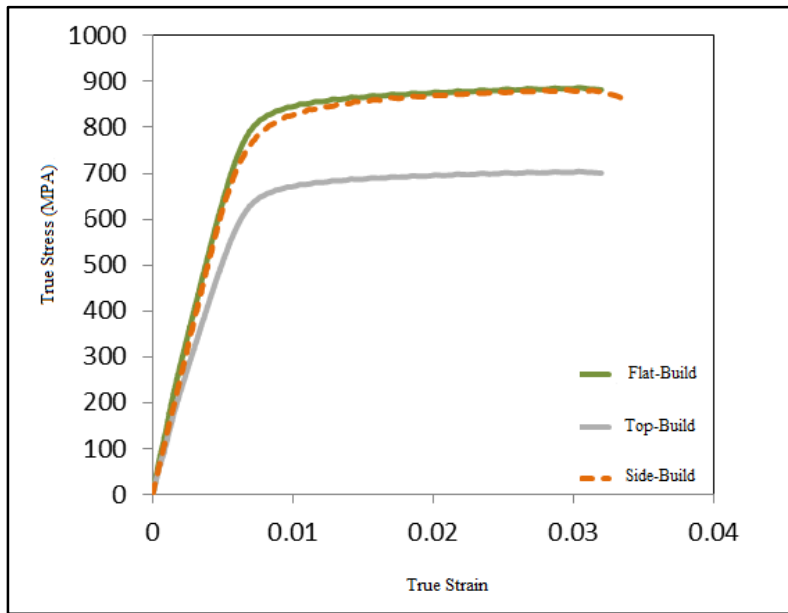
Şekil 3.12. Persenot ve arkadaşlarının incelediği numune grubu

Roy ve arkadaşları EBM yönteminde üretim yönünün çekme dayanımına etkisini ve numunelerin sertliklerini inceleyen bir çalışma yapmıştır [44]. Roy ve arkadaşlarının incelediği numune grubu Şekil 3.13’te görülmektedir.

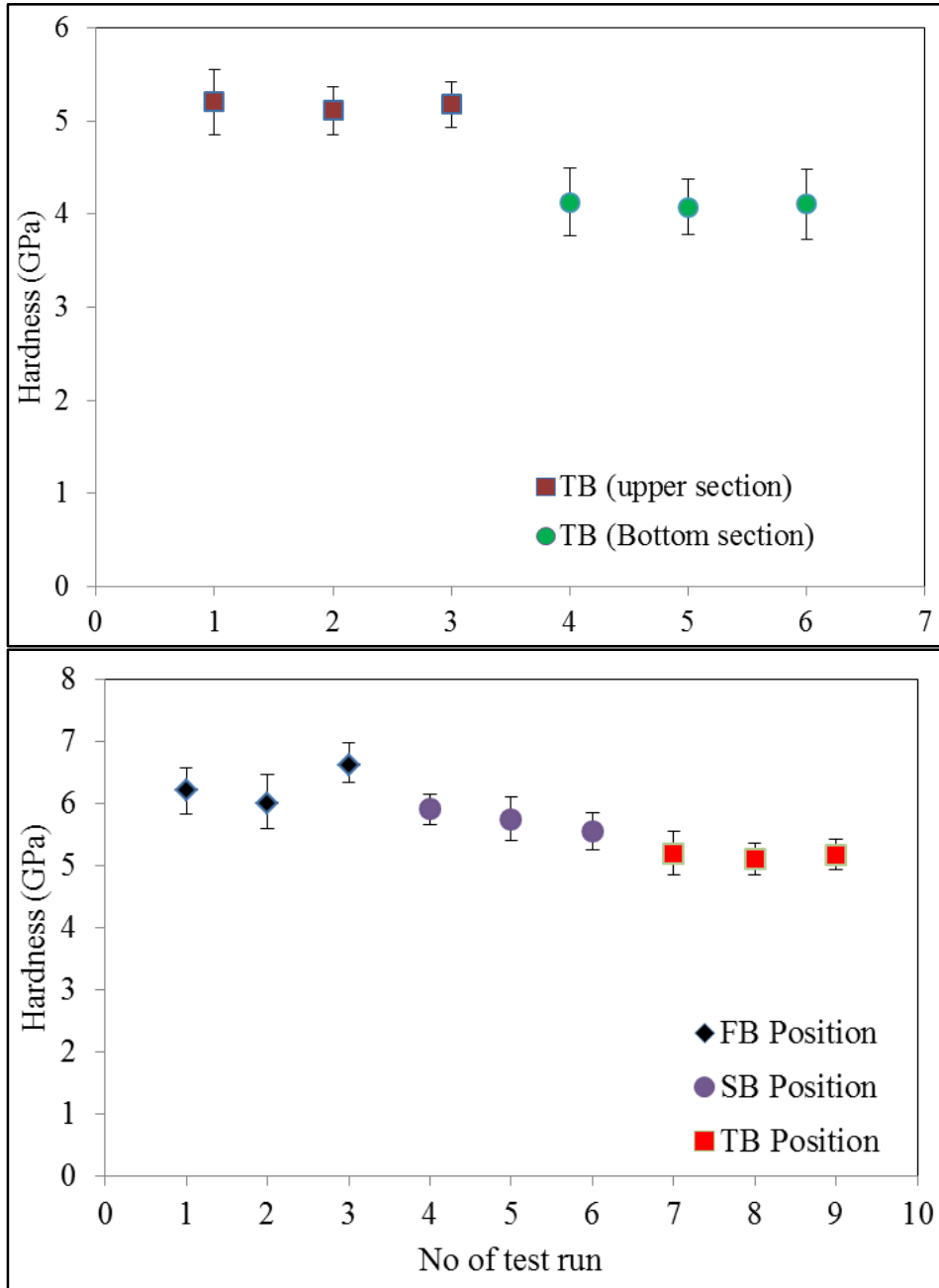


Şekil 3.13. Roy ve arkadaşlarının incelediği numune grubu

Roy ve arkadaşlarının elde ettiği bazı sonuçlar Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir.



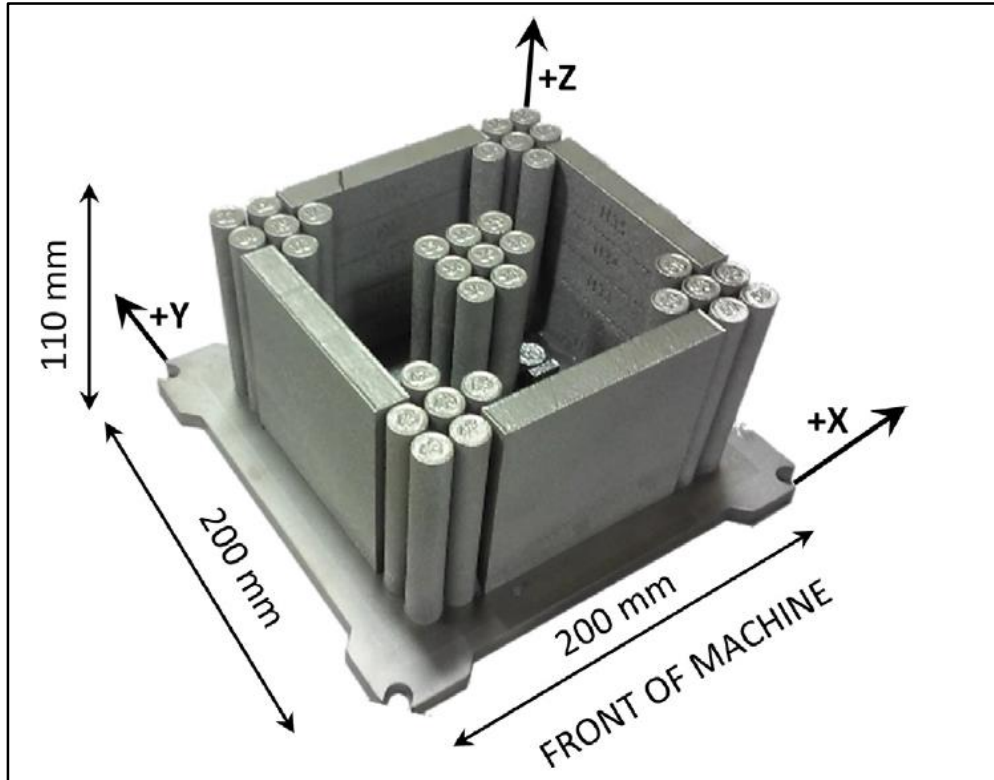
Şekil 3.14. Roy ve arkadaşlarının elde ettiği gerinme - gerilme sonuçları



Şekil 3.15. Roy ve arkadaşlarının elde ettiği sertlik sonuçları

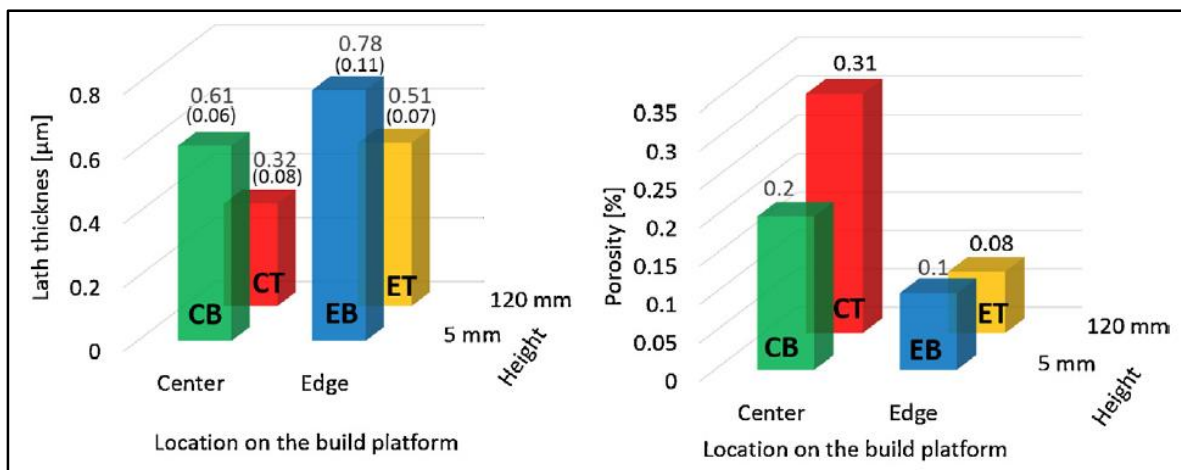
Sonuç olarak bu çalışmada yatay ve dikey oryantasyonlar dışında bir açı incelenmemiş ve incelenen numune grubunun kendi eksenindeki yöneliminin de sonuçlara etki ettiği görülmüştür.

Galarraga ve arkadaşları üretim konumunun mikroyapı ve poroziteye etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır [45]. Çalışmada farklı konumlarda üretilen numunelerin çekme dayanımları da karşılaştırılmıştır. Şekil 3.16’da numunelerin yerleşimleri verilmiştir.

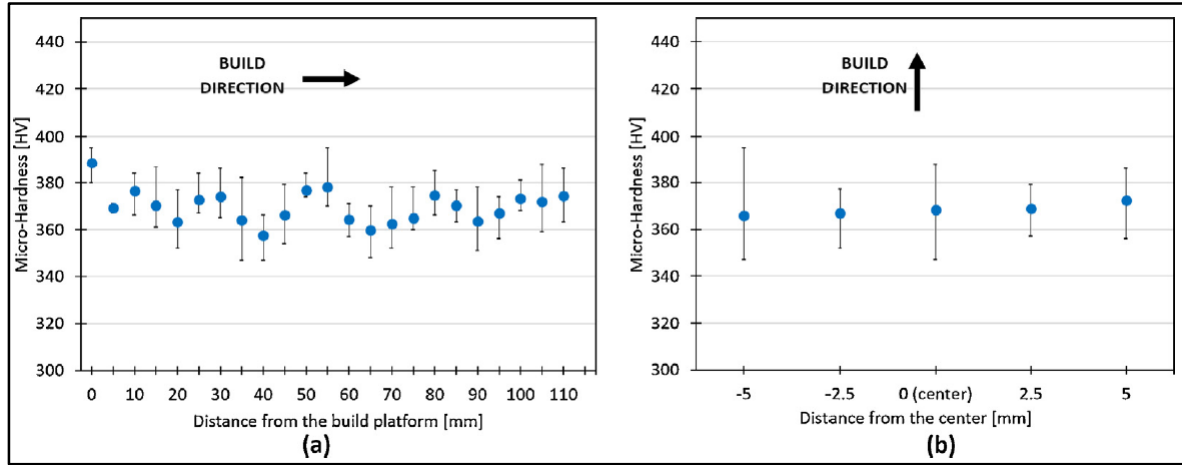


Şekil 3.16. Galarraga ve arkadaşlarının incelediği numune grubu

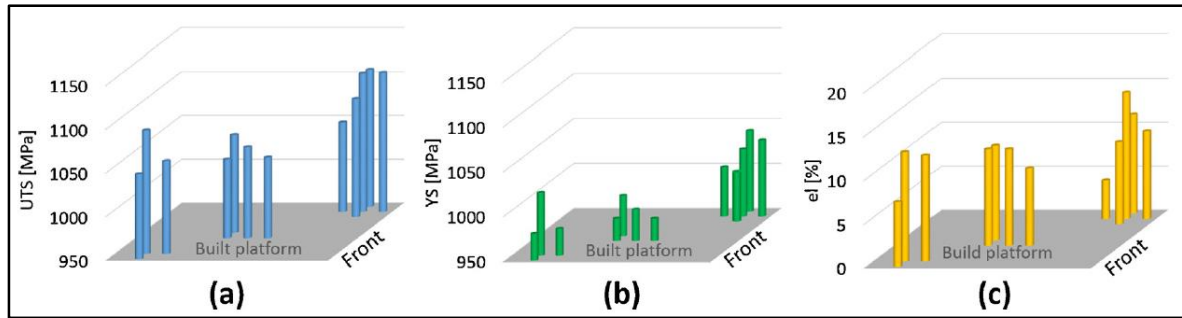
Çalışmada elde edilen mikroyapılar üzerinden ölçülen çıta kalınlıkları sonuçları Şekil 3.17’de verilmiştir. Ayrıca ölçülen sertlik değerlerinin değişimi ve çekme testi sonuçları da Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.17. Galarraga ve arkadaşlarının çalışmasında elde edilen mikroyapı sonuçları



Şekil 3.18. Galarraga ve arkadaşlarının çalışmasında elde edilen sertlik sonuçları



Şekil 3.19. Galarraga ve arkadaşlarının çalışmasında elde edilen çekme dayanımı sonuçları

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez kapsamında incelenen numuneler Arcam A2X EBM makinesinde üretilmiştir. Ayrıca bir parti numune de Arcam Q20 EBM makinesinde üretilmiştir. Makinelerdeki katman kalınlıkları birbirinden farklı olduğu için böylece katman kalınlıklarının yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi de incelenmiştir ve pürüzlülük değerleri daha düşük olduğu için diğer testler A2X makinesinde üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Üretimde kullanılan tozlar Arcam firmasının sağladığı tozlardır. Üretim ilk kez kullanılan tozlar ile gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında test edilen numuneler ASTM E8 ve ASTM E23 standartlarına göre üretilmiş ve test edilmiştir. Kullanılan malzeme Ti6Al4V alaşımıdır. Çentik darbe numuneleri çentikleri ile birlikte üretilmiştir. Tüm numuneler aynı üretim gurubunda üretilmiştir.

Şekil 4.1’de görülen A2X makinasının üretim parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

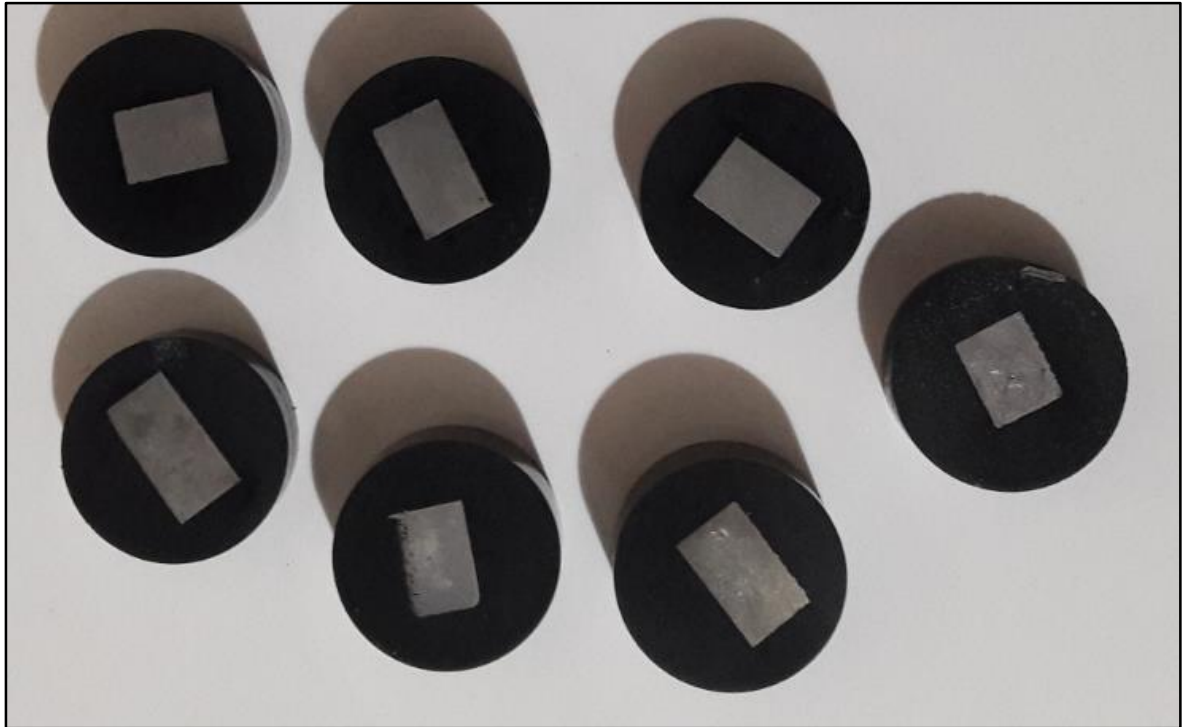


Şekil 4.1. Arcam A2X EBM makinesi

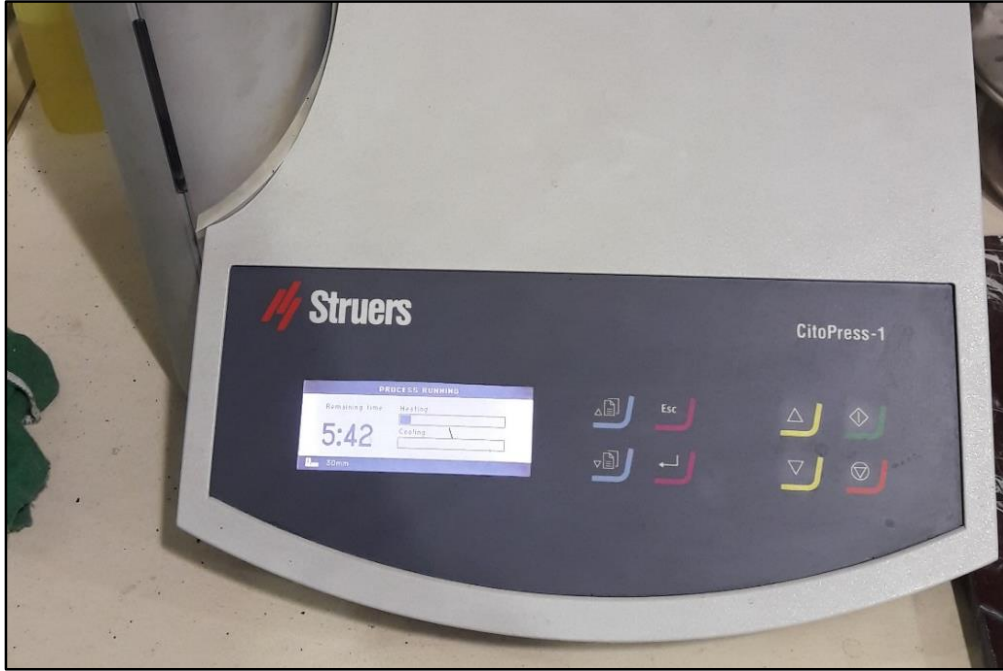
Çizelge 4.1. A2X Üretim parametreleri

A2X Parametreler	Katman kalınlığı (μm)	Akım (mA)	Tarama hızı (mm/s)	Tarama odakları arası uzaklık (μm)	Gerilim (kV)
Ergitme	50	15	4530	200	60
İç kontur	50	10,2	800	-	60
Dış kontur	50	5	440	-	60
Ön ısıtma 1	50	30	10000	1200	60
Ön ısıtma 2	50	38	13000	1200	60

Mikroyapı incelemeleri, çentik darbe numunelerinin yan yüzeylerinden yapılmıştır. Mikroyapı incelemesi yapılan numuneler Şekil 4.2’de görülmektedir. Numuneler YZ düzlemine paralel yüzeylerinden görüntü alabilmek üzere hazırlanarak Şekil 4.3’te görülen Stuers Citopress cihazında bakalite alınmış ve sırasıyla 400, 800, 1200, 2400 numara zımparalarla parlatıldıktan sonra dağlanarak ortaya çıkan yapı görüntülenmiştir. Mikroyapıların incelenmesinde kullanılan dağlayıcı %6 nitrik asit, %2 hidro florik asit %92 saf su içermektedir.



Şekil 4.2. Mikroyapısına bakılan bakalite alınmış çentik darbe numuneleri



Şekil 4.3. Bakalite alma cihazı

Tozların akışkanlıklarının ve görünür yoğunluklarının tespiti için Hall akış testi yapılmıştır. Hall akış testi, Şekil 4.4’te görülen test düzeneğine 50 gram toz yükledikten sonra düzeneğin altında bulunan 2.5 mm çapındaki deliğin açılmasıyla yapılır. Delik açıldıktan sonra tozun akma süresi ölçülür ve alttaki kaba dolan toz ile görünür yoğunluk ölçümü yapılır.



Şekil 4.4. Hall hunisi

Tozların optik mikroskop (Şekil 4.5) ve SEM (ing. *Scanning Electron Microscope*, *taramalı elektron mikroskobu*) (Şekil 4.6) görüntüleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde bulunan altyapı kullanılarak elde edilmiştir. İç gözeneklerin tespiti için tozların bakalite alınıp zımparalanması işleminde de Gazi Üniversitesi Toz Metalurjisi Laboratuvarı kullanılmıştır.

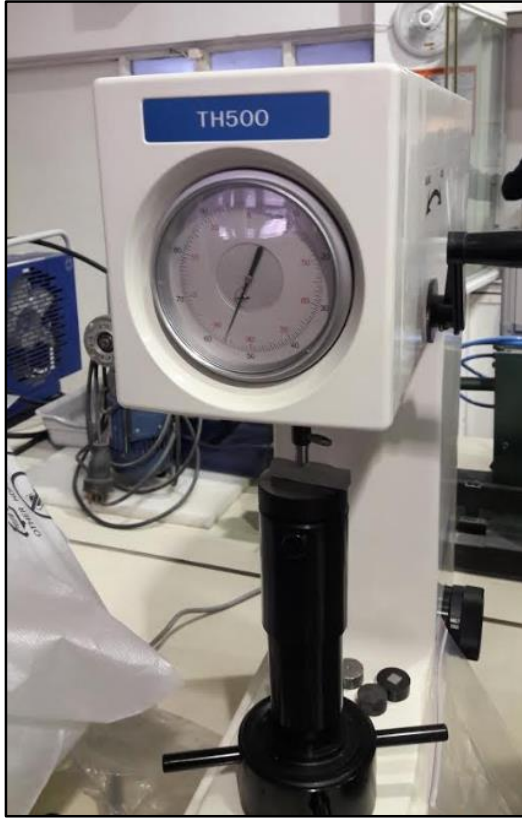


Şekil 4.5. Optik mikroskop



Şekil 4.6. SEM cihazı

Şekil 4.7’de sertlik ölçümlerinin yapıldığı TESKON TH 500 Rockwell sertlik ölçüm cihazı görülmektedir. Çentik darbe numunelerinin yan yüzeyleri parlatılarak sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Rockwell C cinsinden yapılmıştır. Bu sertlik belirli bir kuvvet altında batıcı ucun malzemede ne derinliğe ulaştığı ile ilgili bir ölçüm metodu olduğu için batıcı uç ile kuvvet uygulanan yüzey parlatılmış olmalıdır. Testin uygulanmasında numune yerleştirildikten sonra 150 kg kuvvet uygulanır ve daha sonra bu kuvvet kaldırılır. Batıcı ucun malzemeye ilk dokunduğu nokta ile yükleme kaldırıldıktan sonra ucun en son ulaştığı nokta arasındaki derinlik farkı Rockwell C cinsinden cihazın üzerinde bulunan kadrandan okunur.



Şekil 4.7. Sertlik ölçüm cihazı

Şekil 4.8’de pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan Tesa Rugosurf 20 cihazı görülmektedir. Pürüzlülük ölçümü sırasında cihazın ölçücü ucunda bulunan bir iğne yüzeydeki pürüzlülüklerin içlerine girerek derinliklerini ölçmekte ve yüzey pürüzlülüğünü hesaplamaktadır.



Şekil 4.8. Pürüzlülük ölçüm cihazı

Çentik darbe numunelerinin kırıldıktan sonra toplu halde görüntüleri Şekil 4.9’da ve Çentik darbe test düzeneği Şekil 4.10’da görülmektedir. Çentik darbe numunelerinin kırılmadan önceki bazı fotoğrafları Şekil 4.11’de görülmektedir. Bu test sırasında kırılan numunelerin kırıcı çekiç ne kadar enerji kaybettiği ölçülür. Belirli bir potansiyel enerjiye sahip olan kırıcı çekiç serbest bırakılır ve numune kırıldıktan sonra ulaştığı yükseklikten son potansiyel enerjisi hesaplanarak kırılmaya harcanan enerji bulunmuş olur. Numuneler çentikleriyle beraber üretilmiştir.



Şekil 4.9. Kırılmış çentik darbe numuneleri

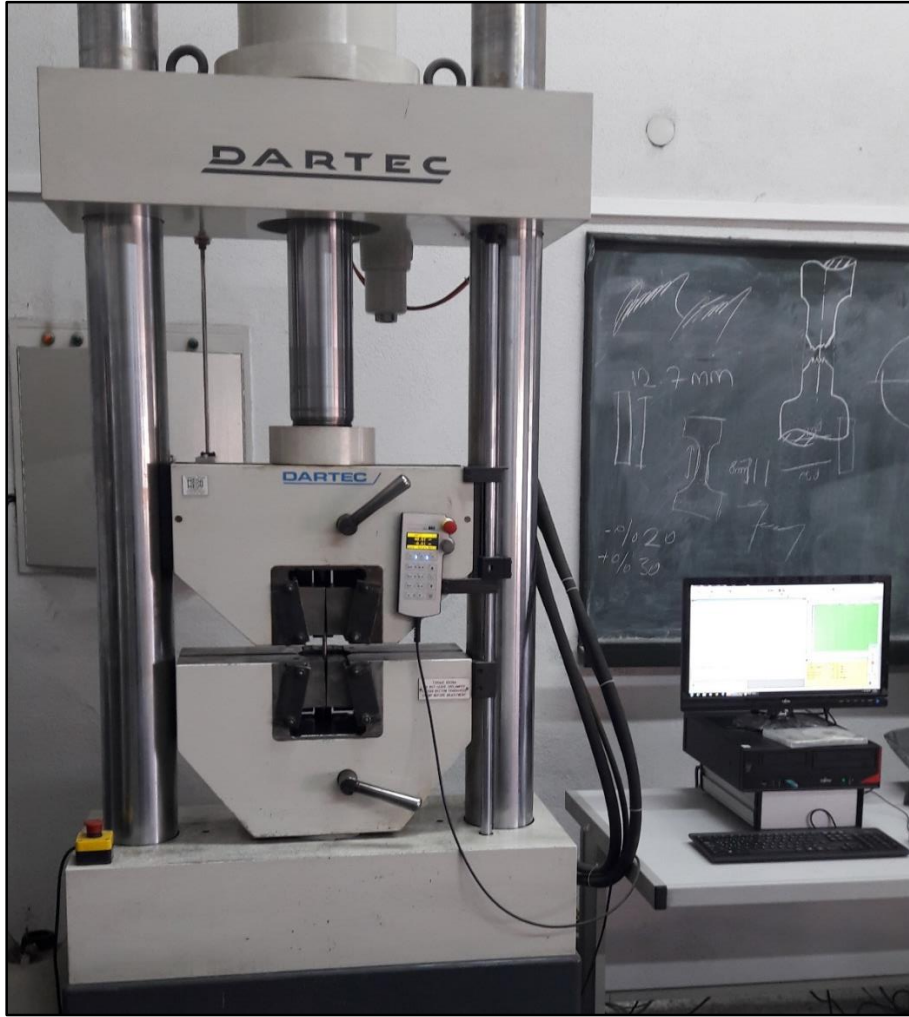


Şekil 4.10. Çentik darbe test düzeneği



Şekil 4.11. Çentik darbe numuneleri

Şekil 4.12’de çekme testlerinin yapıldığı Dartec marka çekme cihazı görülmektedir. Test öncesi ve test sonrası bazı numuneler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te görülmektedir.



Şekil 4.12. Çekme testi cihazı



Şekil 4.13. Test öncesi bazı çekme numuneleri



Şekil 4.14. Test sonrası bazı çekme numuneleri

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Toz Karakterizasyon Sonuçları

5.1.1. Hall akış testi sonuçları

Tozların görünür yoğunluğunun tespit edilmesi ve akışkanlıklarının yorumlanması için tozlara Hall akış testi uygulanmıştır. Hall akış testinde tozların aktığı huni boşluğu 2.5 mm veya 5 mm olabilir. Çizelge 5.1’de sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 5.1. Hall akış testi sonuçları

Test (2,5 mm Hall hunisi)	t/50 gr (50 gr tozun huniden dökülme zamanı)
Test 1	47 sn
Test 2	45 sn
Arcam	25-30 sn

50gr tozun akma süresi, toz boyut dağılımına, tozun sürtünme kuvvetine, küreselliğine, uydu miktarına vb. etmenlere bağlıdır. Toz ne kadar iyi şartlarda muhafaza edilir ve nem kapması önlenirse sürtünme katsayısı o kadar düşük tutulabilir. Test edilecek tozların numune seçme prosedürü ne kadar iyi yapılırsa o ölçüde iyi bir toz boyut dağılımı elde edilebilir ve akıcılığı daha iyi tespit edilebilir. Literatürde elde edilen farklı akma hızı sonuçlarının sebebi bu gibi etmenlerdir. Toz sağlayıcı firmanın akma süreleri 25-30 saniye aralığındadır. Tez kapsamında uygulanan akış testlerinde elde edilen sürelerin 45 saniye civarında olması tozun muhafaza şartlarında nemlenmiş olabileceği ve test edilen tozların numune alımı sırasında homojen bir yapı elde edilememesi olabilir.

Akışı tamamlayan tozların görünür hacmi 19 cm^3 olarak tespit edilmiştir. Buna göre görünür yoğunluk $50\text{gr}/19\text{cm}^3=2,63 \text{ gr}/\text{cm}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Yüksek akışkanlıklı ve küresel tozlarda görünür yoğunluk, teorik yoğunluğun %60’ı kadar olmaktadır. Ti6Al4V alaşımının teorik yoğunluğu $4,42 \text{ gr}/\text{cm}^3$ tür. Burada ise $(2,63/4,42) \times 100=59,50$ olarak bulunmuştur.

Vurgu yoğunluğu görünür yoğunluğu tespit edilen 50 gr numunenin dakikada 270 darbe ile tozların oturması sağlandıktan sonra hacimlerinin ölçülmesiyle hesaplanır. Kullanılan tozlarda bu prosedür uygulandıktan sonra hacmi 18 cm³ olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla vurgu yoğunluğu 50 gr/18 cm³=2,78 gr/cm³ olarak hesaplanmıştır.

Vurgu yoğunluğu ve görünür yoğunluk arasındaki ilişki tozlar hakkında fikir veren bir diğer parametredir. Vurgu yoğunluğu ve görünür yoğunluk değerleri kullanarak hesaplanan Carr İndeks ve Hausner oranı değerleri akışkanlık hakkında fikir verir.

$$\text{Carr İndeks} = \frac{\text{Vurgu yoğunluğu} - \text{Görünür yoğunluk}}{\text{Vurgu yoğunluğu}}$$

$$\text{Hausner Oranı} = \frac{\text{Vurgu yoğunluğu}}{\text{Görünür yoğunluk}}$$

Çizelge 5.2’de Carr indeks ve Hausner oranlarının akışkanlıklar için nasıl değerlendirildiğine dair bir tablo verilmiştir.

Çizelge 5.2. Carr indeks ve Hausner oranına göre akış özellikleri

Carr İndeks	Akabilirlilik	Hausner Oranı	Akış Özellikleri
0,05 – 0,15	Çok iyi	1,00 – 1,11	Mükemmel
0,15 – 0,18	İyi	1,12 – 1,18	İyi
0,18 – 0,22	Zayıf	1,19 – 1,25	Orta
0,22 – 0,35	Kötü	1,26 – 1,34	Vasat
0,35 – 0,40	Çok kötü	1,35 – 1,45	Kötü
> 0,40	Oldukça kötü	1,46 – 1,59	Çok kötü
		> 1,60	Oldukça kötü

Testleri yapılan tozların Carr indeksi ve Hausner oranları hesaplanırsa;

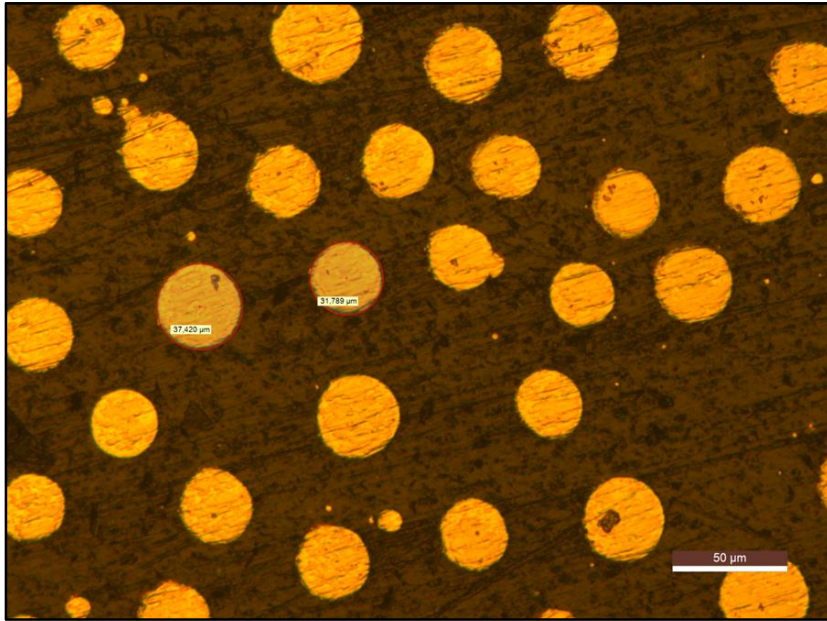
$$\text{Carr indeks} = \frac{2,7778 - 2,6315}{2,7778} = 0,05267$$

$$\text{Hausner oranı} = \frac{2,7778}{2,6315} = 1,0556$$

elde edilecektir. Görüleceği üzere akışkanlık için mükemmel sonuç bulunmuştur [46].

5.1.2. Optik mikroskop incelemesi

Şekil 5.1’de EBM için kullanılan titanyum tozlarının optik mikroskoptan alınmış görüntüsü verilmiştir. Zımparalama işlemi tozları kestiği için iç boşlukları tespit etmek mümkündür. Fakat tozların tam ortadan kesilip kesilmediği bilinmediği için boyut analizi yapmak çok sağlıklı değildir. Tozların küresellikleri ve uydulaşma durumları hakkında ise yorum yapılabilir. Şekil 5.1’de görülen tozların bazılarının içinde az miktarda kapalı gözenek gözlemlenmektedir. Tozların küresellikleri çok iyi denebilir fakar az miktarda uydulaşma görülmektedir.

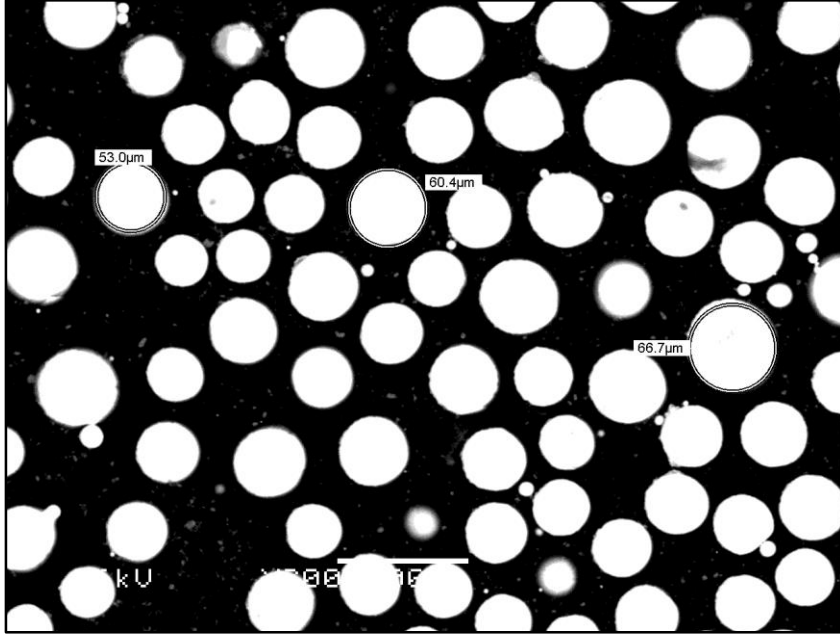


Şekil 5.1. Bakalite alınmış ve zımparalanmış Ti6Al4V tozlarının optik mikroskop görüntüsü

5.1.3. SEM incelemesi

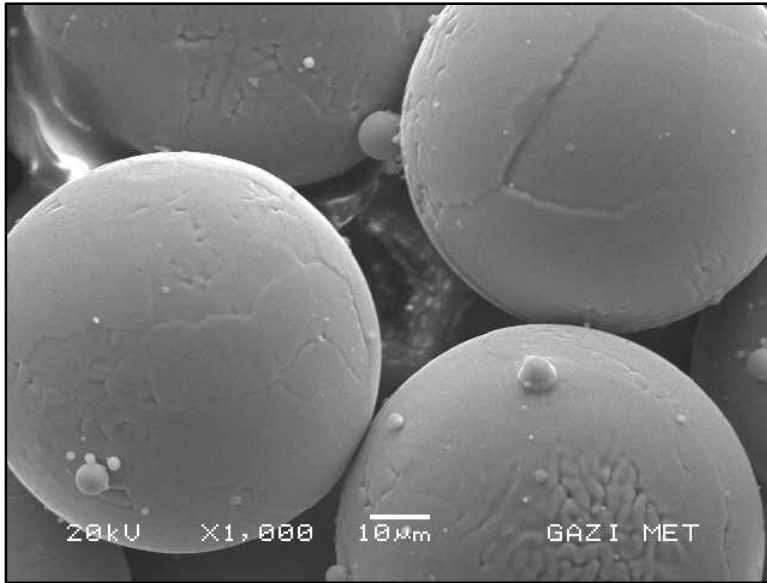
Tozların fiziksel özelliklerini belirlemek üzere yapılan bir diğer çalışma SEM incelemesi olmuştur. Optik mikroskop incelemesinde olduğu gibi burada da tozların küresel bir yapıda

olduğu ve çok az miktarda kapalı gözenek ve uydulaşmalar olduğu görülmektedir. Şekil 5.2’de zımparalanmış tozların SEM görüntüsü görülmektedir.

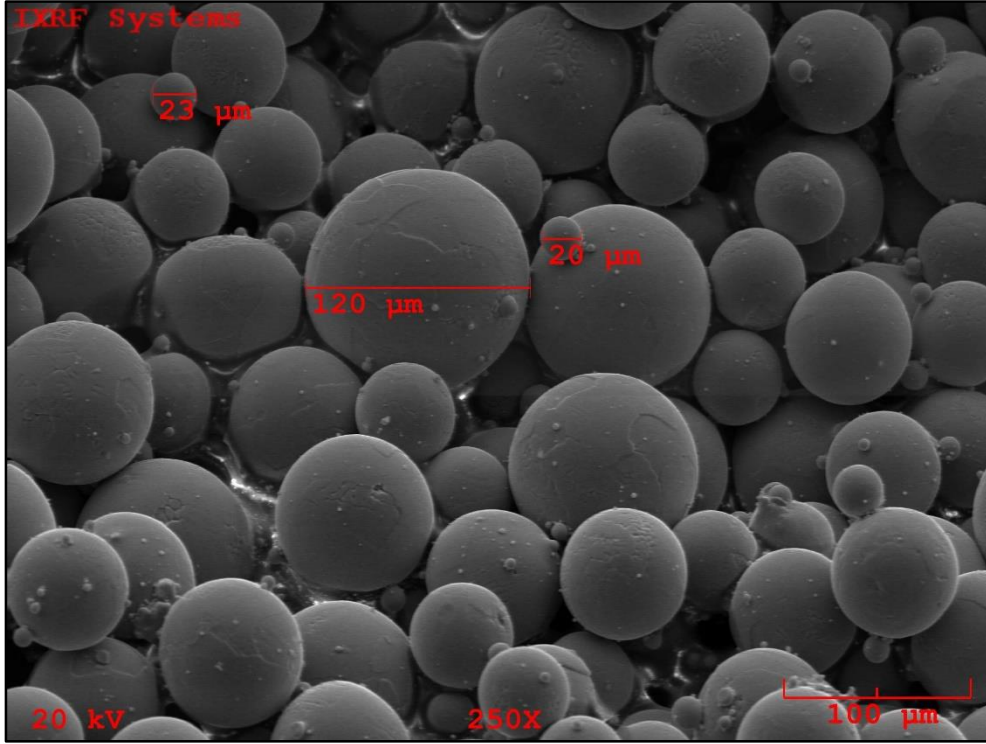


Şekil 5.2. Bakalite alınmış ve zımparalanmış Ti6Al4V tozlarının SEM görüntüsü

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te zımparalanmamış tozların SEM görüntüleri verilmiştir. Tozların küreselliklerinin ve yüzey yapılarının mükemmel olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. Ti6Al4V tozlarının SEM görüntüsü



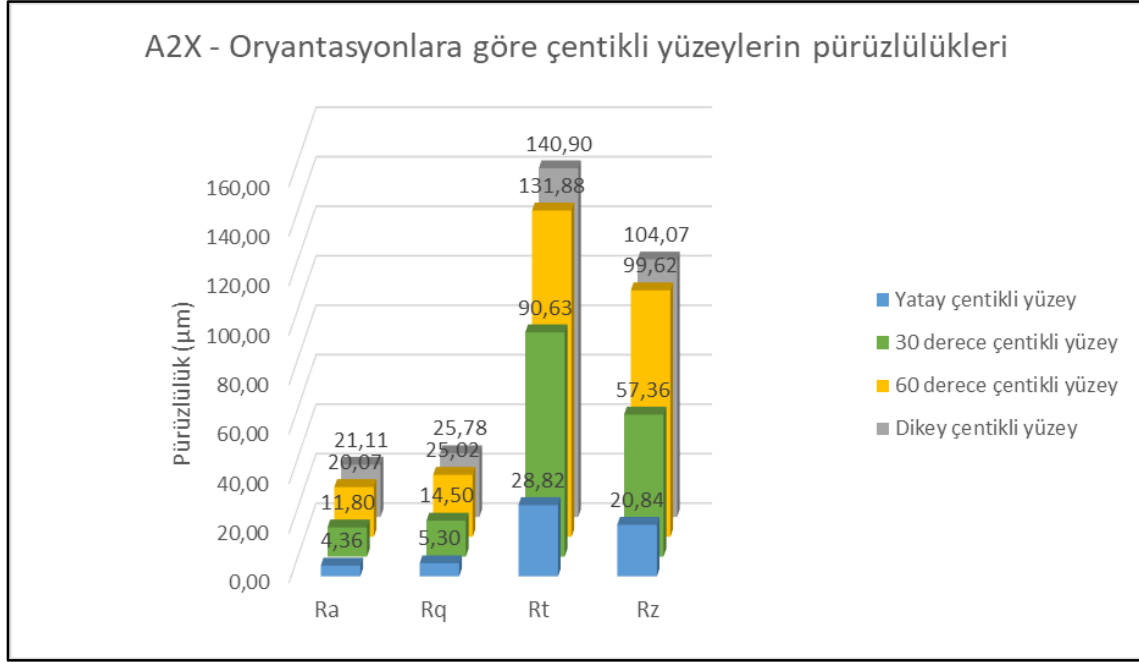
Şekil 5.4. Ti6Al4V tozlarının SEM görüntüsü ve toz boyutları

Zımparalanmamış tozlara bakarak tozların boyut dağılımı hakkında fikir edinmek mümkündür.

5.2. Pürüzlülük Sonuçları

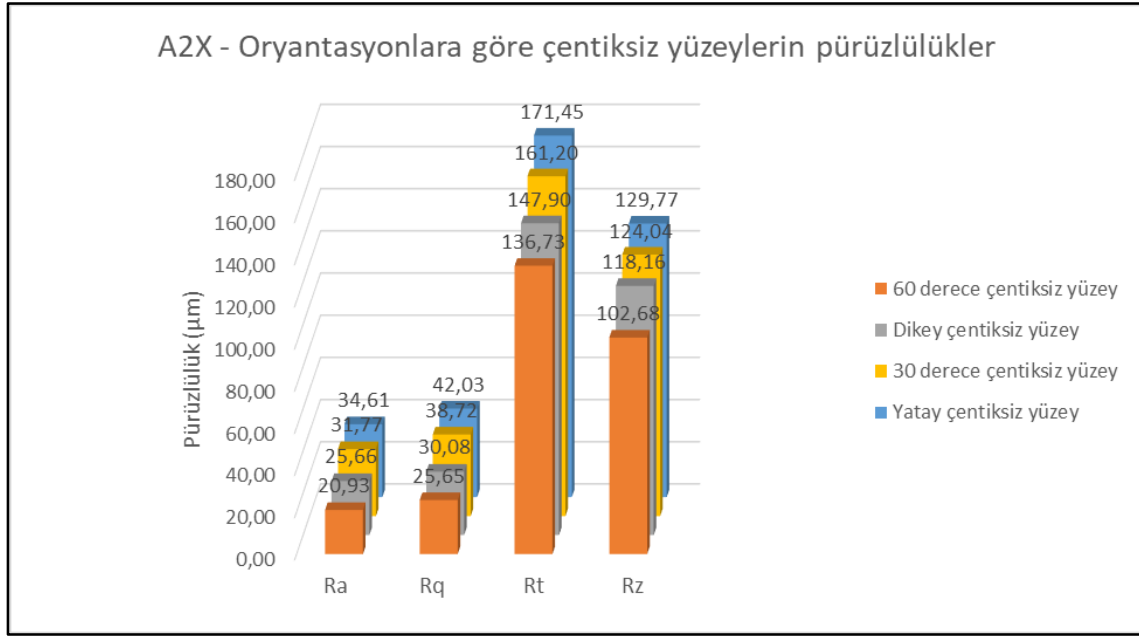
EBM’de yüzey pürüzlülükleri üretim oryantasyonuna göre değişmektedir. Pürüzlülük ölçümleri çentik darbe numuneleri üzerinde yapılmıştır. Numunelerin çentikli tarafları üretildikten sonra üst tarafta kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Pürüzlülük ölçümlerinin hem alt yüzey hem de üst yüzeyden gerçekleştirilebilmesi için ölçüm yapılan numuneler alt yüzeylerinde destek yapılar olmadan üretilmiştir. Q20 makinesi ile üretilen numunelerin katman kalınlıkları 90 µm, A2X makinesi ile üretilen numunelerin katman kalınlıkları 50 µm’dir. Q20 makinesi ile üretilen numunelerin alt yüzeylerinde destek yapılar kullanıldığı için pürüzlülük ölçümleri sadece üst yüzeylerinden yapılmıştır.

Şekil 5.5’te A2X makinesinde elde edilen üst yüzeylerin pürüzlülükleri görülmektedir. Pürüzlülük değerleri yataydan dikeye gittikçe artmaktadır.

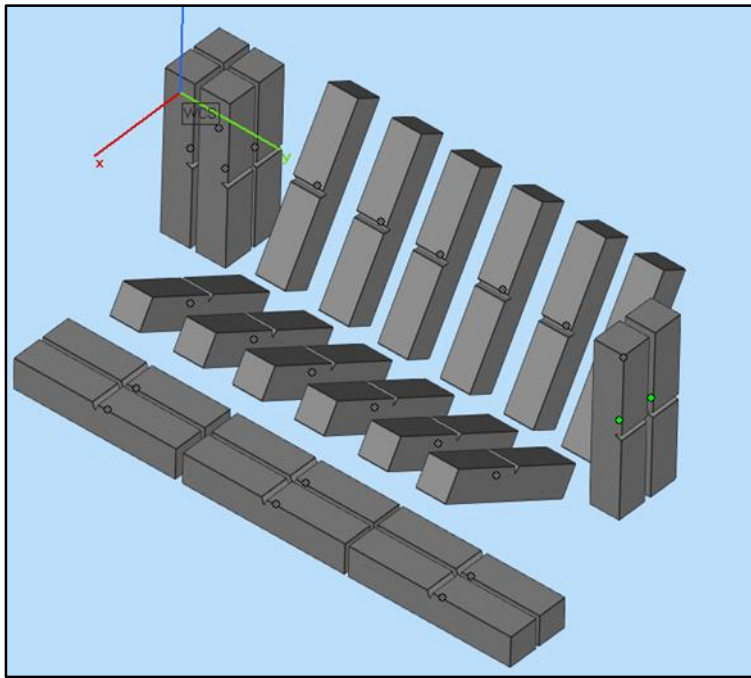


Şekil 5.5. A2X makinesinde üretilen numunelerin çentikli yüzey pürüzlülükleri

Şekil 5.6’da A2X makinesinde elde edilen alt yüzeylerin pürüzlülükleri görülmektedir. 60 derecede üretilen numunenin alt yüzey pürüzlülüğünün dikey numunenin yan yüzeyinden daha az olduğu görülmektedir. En pürüzlü yüzey ise yatay oryantasyonda ortaya çıkmıştır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 incelendiğinde tüm yüzeylerin pürüzlülüklerinin birbirine en yakın olduğu oryantasyon 60 derece olarak görülmektedir. Dikey üretilen numunelerin tüm yan yüzeylerinin birbirine yakın pürüzlülük göstermesi beklenirken bu yüzeyler arasında %20 farklılıklara rastlanmıştır. Bu farklılıkların numunelerin üretim tablasındaki oryantasyonundan değil lokasyonundan kaynaklandığı yorumlanmıştır. İlgili numune grubunun üretim lokasyonları ve oryantasyonları Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6. A2X makinesinde üretilen numunelerin çentiksiz yüzey pürüzlülükleri

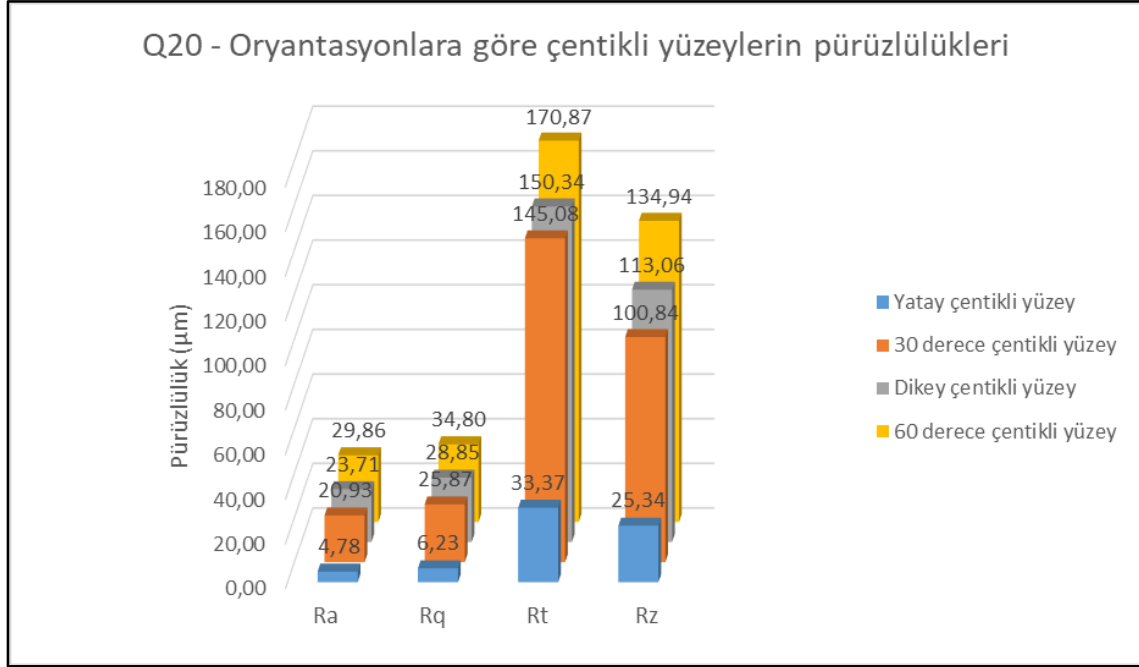


Şekil 5.7. Pürüzlülük ölçümü yapılan A2X numune gurubu

Dikey oryantasyonda üretilen bir numunenin tüm yüzeylerindeki pürüzlülük özelliklerinin ancak tabla merkez konumunda üretilirse oluşabileceği yorumlanmıştır.

Şekil 5.8’de Q20 makinesinde üretilen numunelerin pürüzlülükleri görülmektedir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.8 kıyaslandığında Q20’de A2X’e göre daha pürüzlü yüzeyler oluştuğu

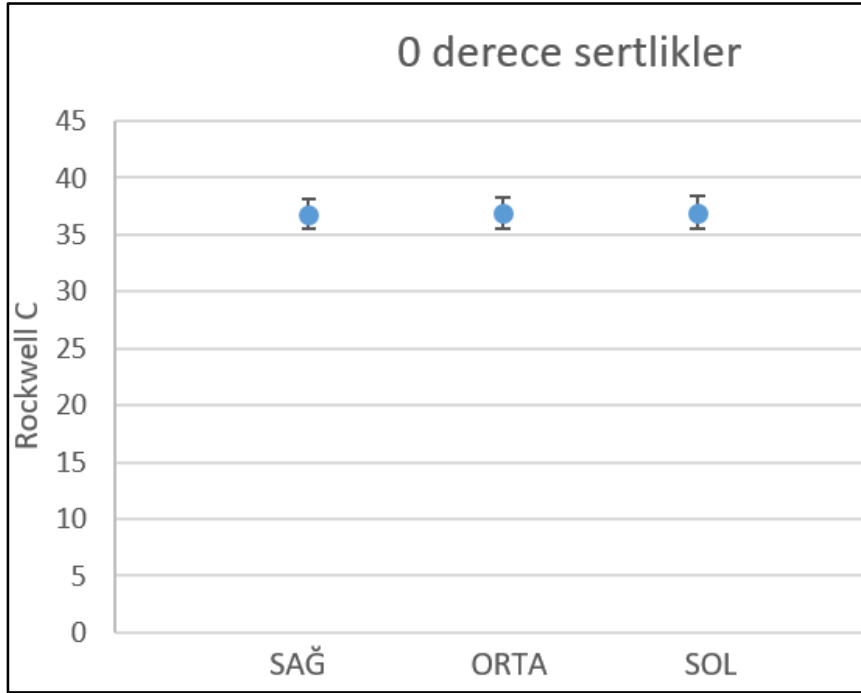
söylenbilir. Bunun başlıca sebebi makinelerin kullandığı katman kalınlıklarının farklı olmasıdır. Yatay oryantasyonda üst yüzeyde tamamen ergimiş bir yüzey oluştuğu için üst yüzeyde birbirine yakın pürüzlülükler elde edilmiştir.



Şekil 5.8. Q20 makinesinde üretilen numunelerin çentikli yüzey pürüzlülükleri

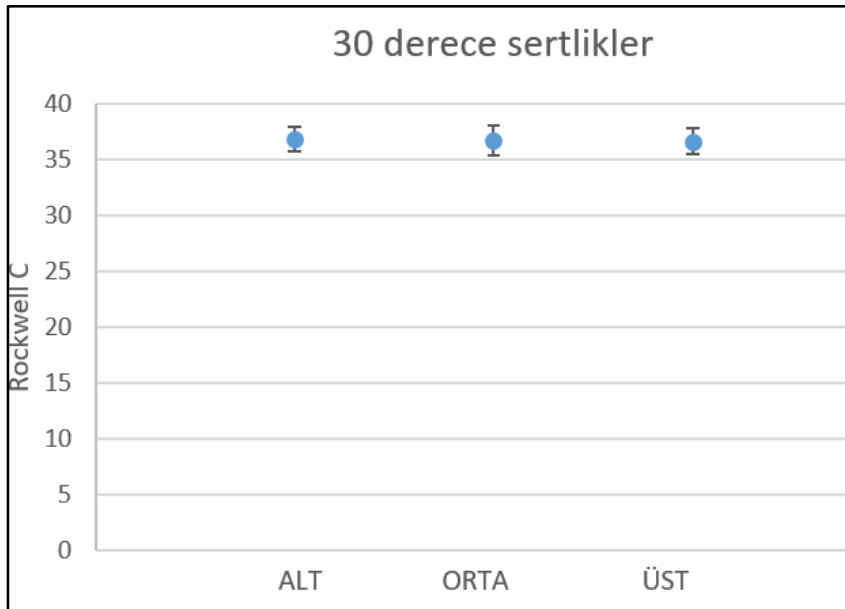
5.3. Sertlik Sonuçları

Sertlik ölçümleri yatay numunelerde sağ, orta ve sol bölgelerde yapılmış ve değerler incelenmiştir. Yatay numunelerin sertlik sonuçları Şekil 5.9’da görülmektedir. Ölçülen değerler her üç bölge için de 35 – 41 Rockwell C aralığındadır. Hata çubukları standart sapmaları ifade etmektedir.



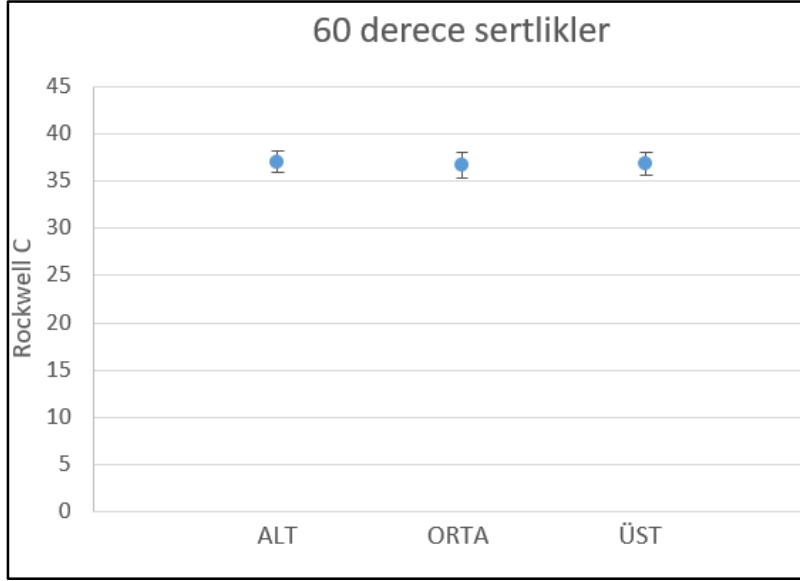
Şekil 5.9. Yatay numune sertlik sonuçları

Şekil 5.10'da 30 derece oryantasyon ile üretilen numunelerde ölçülen sertlikler görülmektedir. Ölçüm alınan bölgeler arasında belirgin bir sertlik farkı tespit edilememiştir.



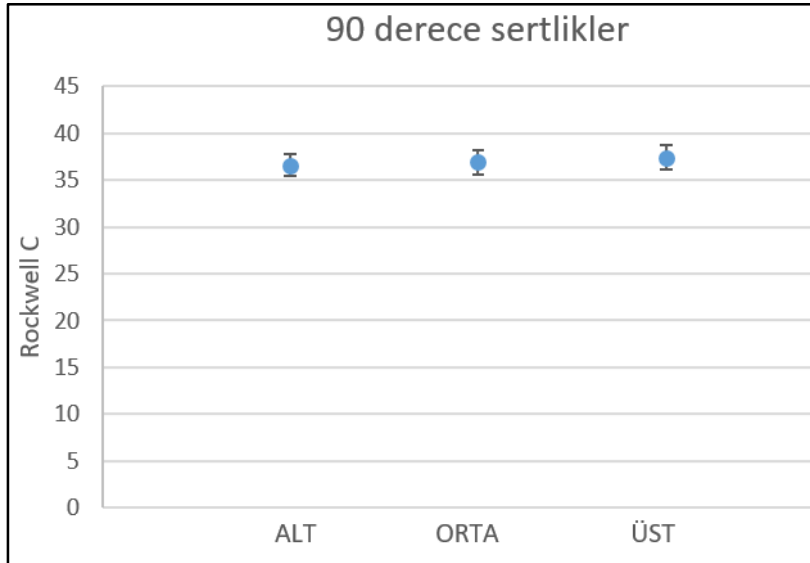
Şekil 5.10. 30 derece numune sertlik sonuçları

Şekil 5.11'de 60 derece oryantasyon ile üretilen numunelerde ölçülen sertlikler görülmektedir. Ölçüm alınan bölgelerde belirgin bir sertlik farkı tespit edilememiştir.



Şekil 5.11. 60 derece numune sertlik sonuçları

Şekil 5.12’de de dikey numunelerin sertlik ölçümleri görülmektedir. Bu ölçüm grubunda sertliklerin az da olsa numunenin üstlerine doğru artış gösterdiği görülmektedir.

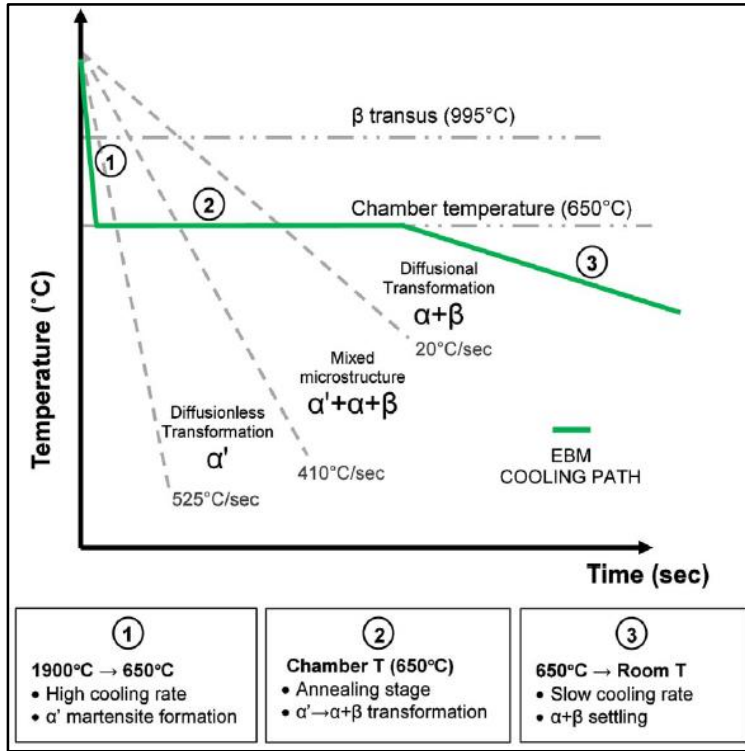


Şekil 5.12. Dikey numune sertlik sonuçları

Sertlik farklılıkları titanyumun mikroyapısından kaynaklanmaktadır. Titanyumun α fazının β fazından daha sert olduğu araştırmacılar tarafından aktarılmıştır [47].

Şekil 5.13’te görüldüğü gibi Ti6Al4V alaşımı β geçiş sıcaklığı 995 °C civarındadır. EBM prosesi sırasında ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 700 °C civarlarında tutulmaktadır. Fakat

katmanlar ilerledikçe alt kısımlardaki soğumalara engel olunamamaktadır. Dolayısıyla üst katmanlardaki soğuma hızı daha yüksek olabilmektedir. Bu yüksek soğuma hızları üst bölgelerde yüksek sertliklerin oluşmasına neden olabilmektedir.

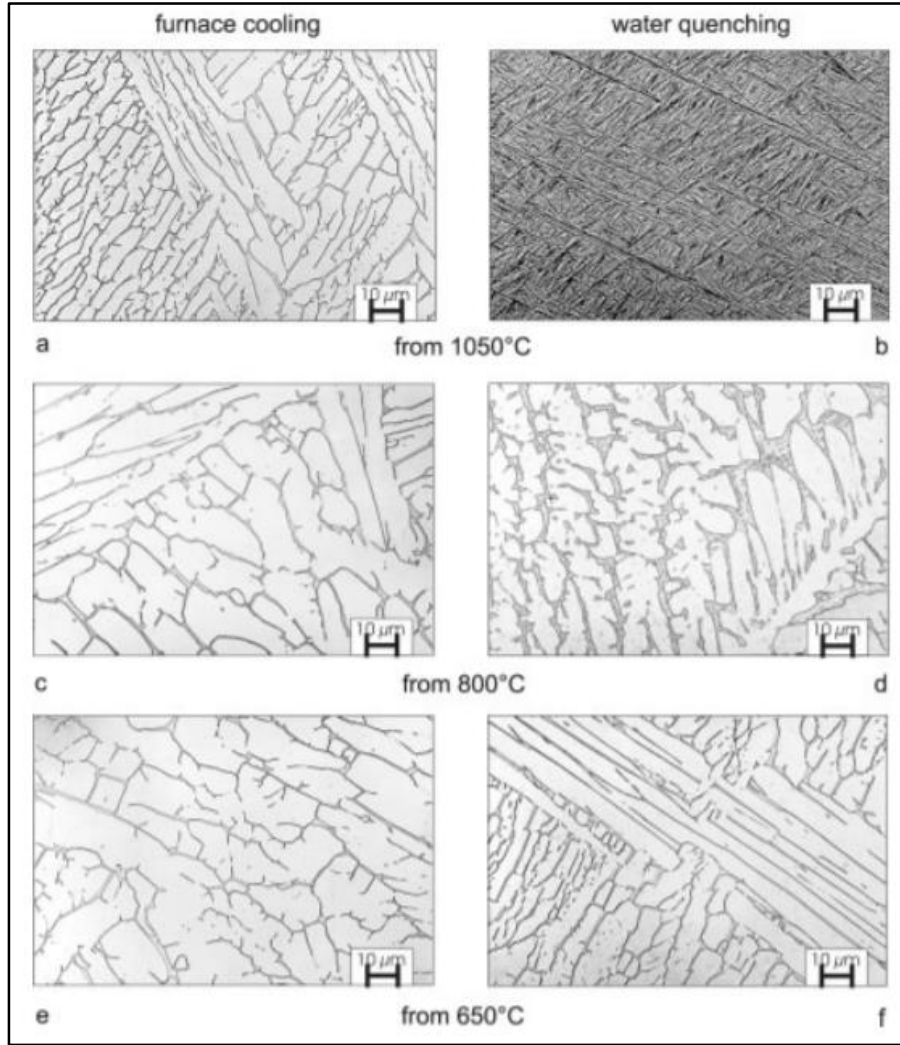


Şekil 5.13. Ti6Al4V alaşımı soğuma hızı faz dönüşümü grafiği

5.4. Mikroyapı İncelemeleri

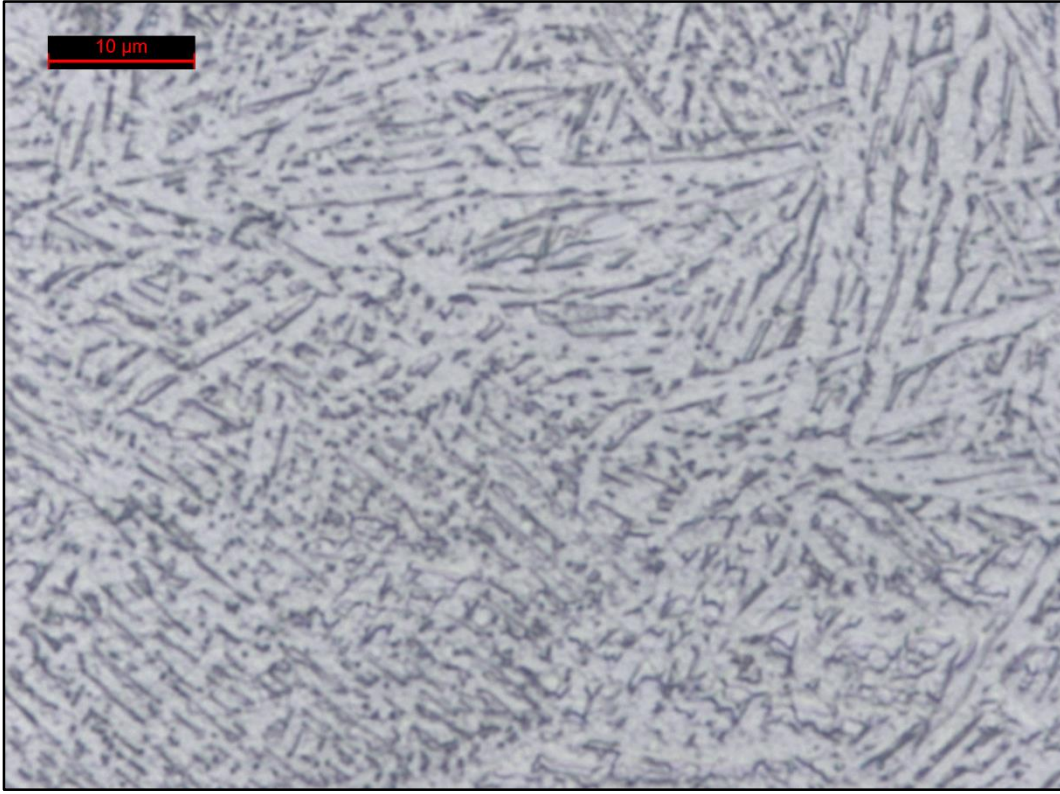
Tez kapsamında incelenen numunelerden elde edilen mikroyapılar bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca Ti6Al4V mikroyapıları hakkında genel bilgiler aktarılmıştır.

Şekil 5.14'te çeşitli sıcaklıklardan hızlı ve yavaş soğumaya göre oluşan mikroyapılar görülmektedir [48].

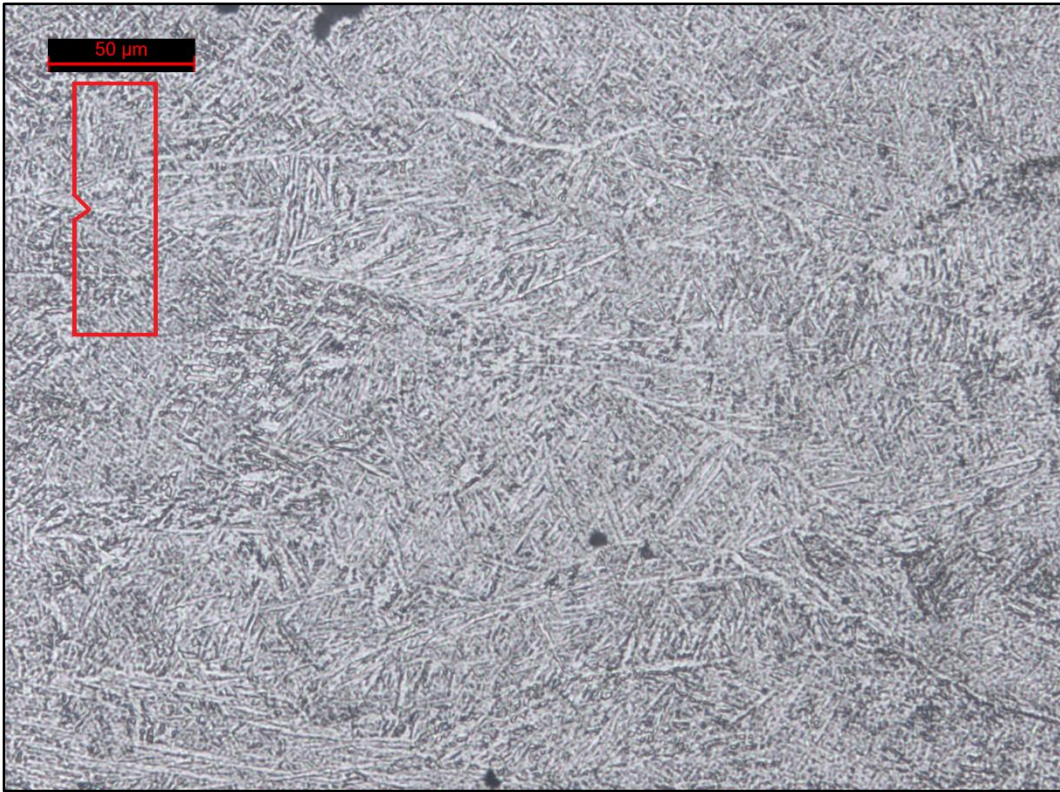


Şekil 5.14. Ti6Al4V soğuma hızına göre mikroyapıları

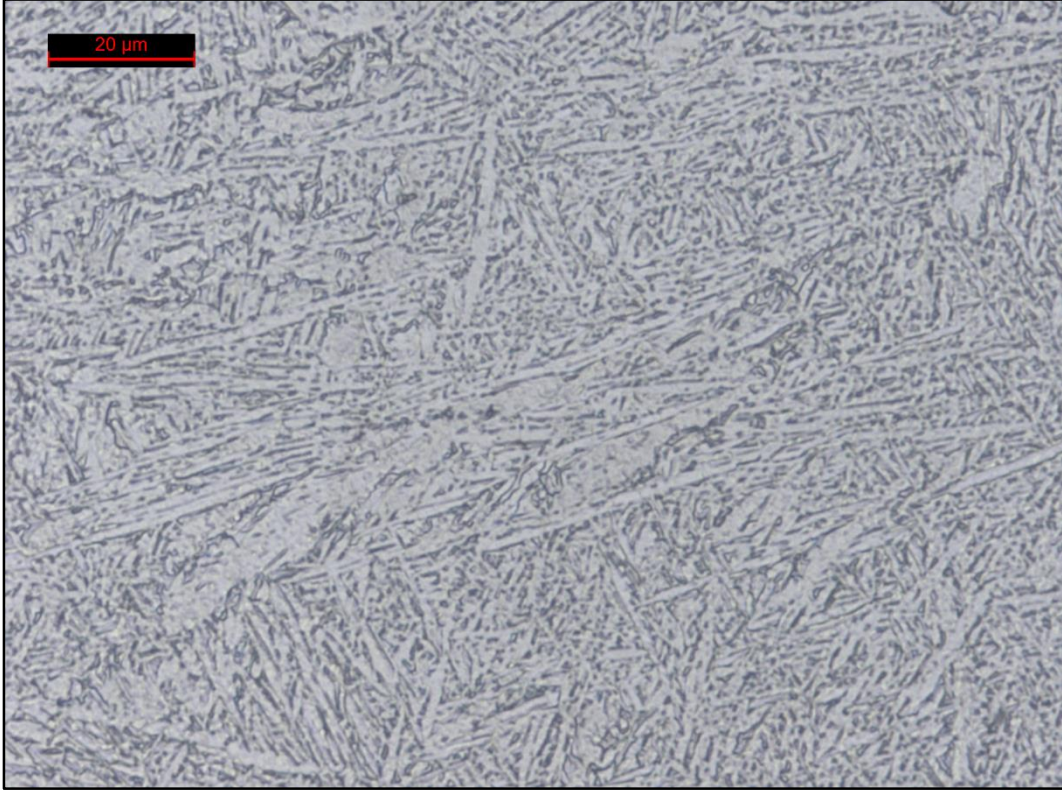
Şekil 5.15’te yatay üretilmiş numunenin mikroyapısı görülmektedir. Şekil 5.15’te görülen mikroyapı Şekil 5.14-a maddesindeki yapıya benzemektedir. Şekil 5.16’da da yatay üretilmiş numunenin tane yapılarının uzanış yönleri görülmektedir. Yavaş soğumadan dolayı kaba lamel yapıları oluşmuştur. Yüksek kalınlıklı çıtalara Şekil 5.17’de görülmektedir.



Şekil 5.15. Yatay oryantasyon mikroyapısı



Şekil 5.16. Yatay oryantasyon tane yönleri (Numune şekli optik inceleme pozisyonunu göstermektedir.)

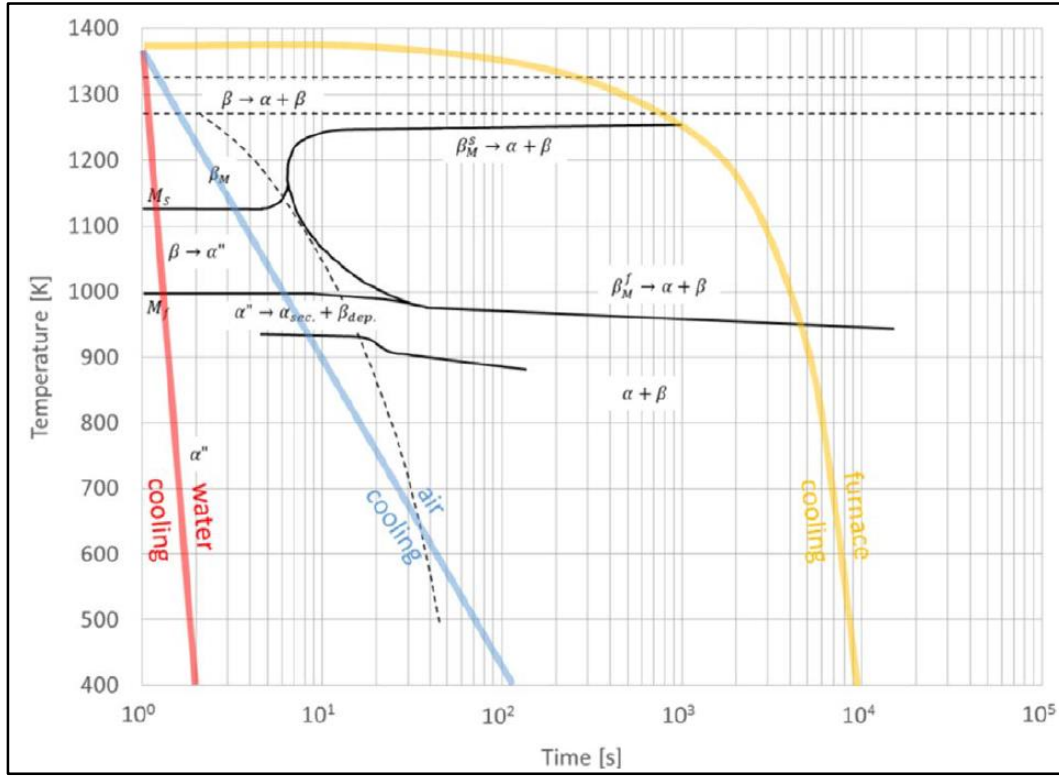


Şekil 5.17. Yatay oryantasyonda oluşan kaba lamel yapıları

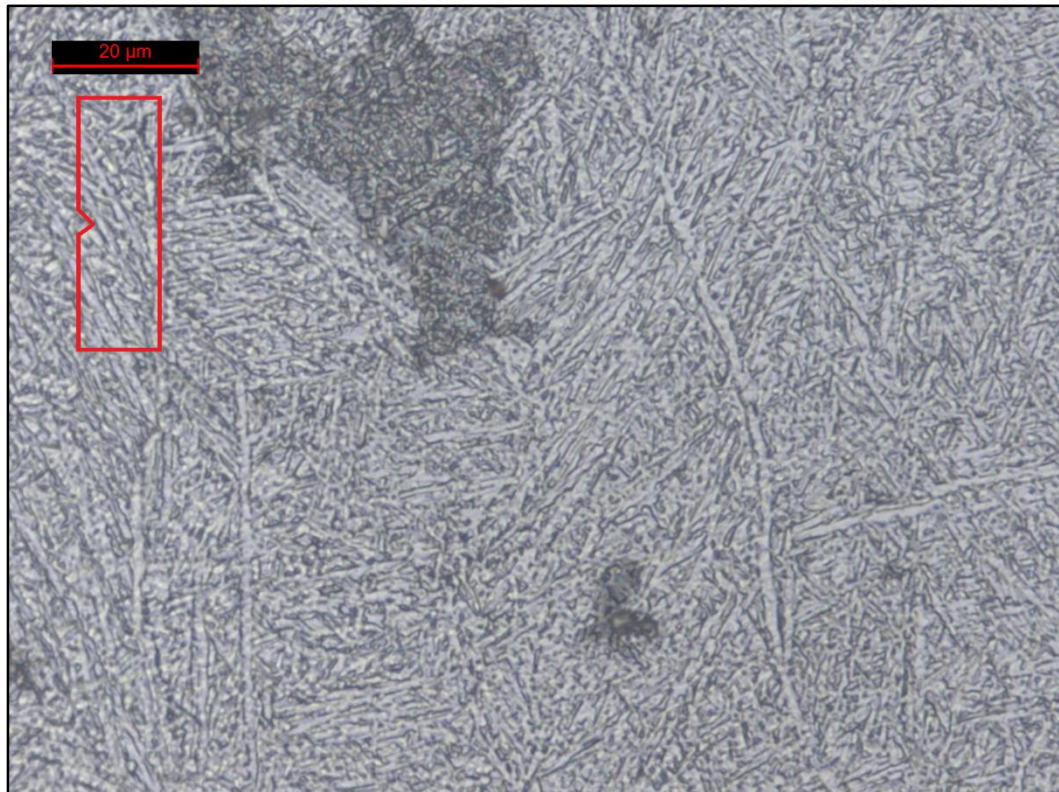
Şekil 5.18’de Ti6Al4V alaşımının sürekli soğuma diyagramı (CCT) verilmiştir. Diyagram incelendiğinde hızlı soğuma sonucu martenzitik yapının oluştuğu ve ayrıca havada soğutma hızlarında $\alpha'' \gg \alpha_2 + \beta$ dönüşümü bölgesi görülmektedir. Bu bölgede α_2 (Ti3Al) oluşumu gözlemlenmektedir.

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de dikey oryantasyon mikroyapısı ve tane yönleri görülmektedir.

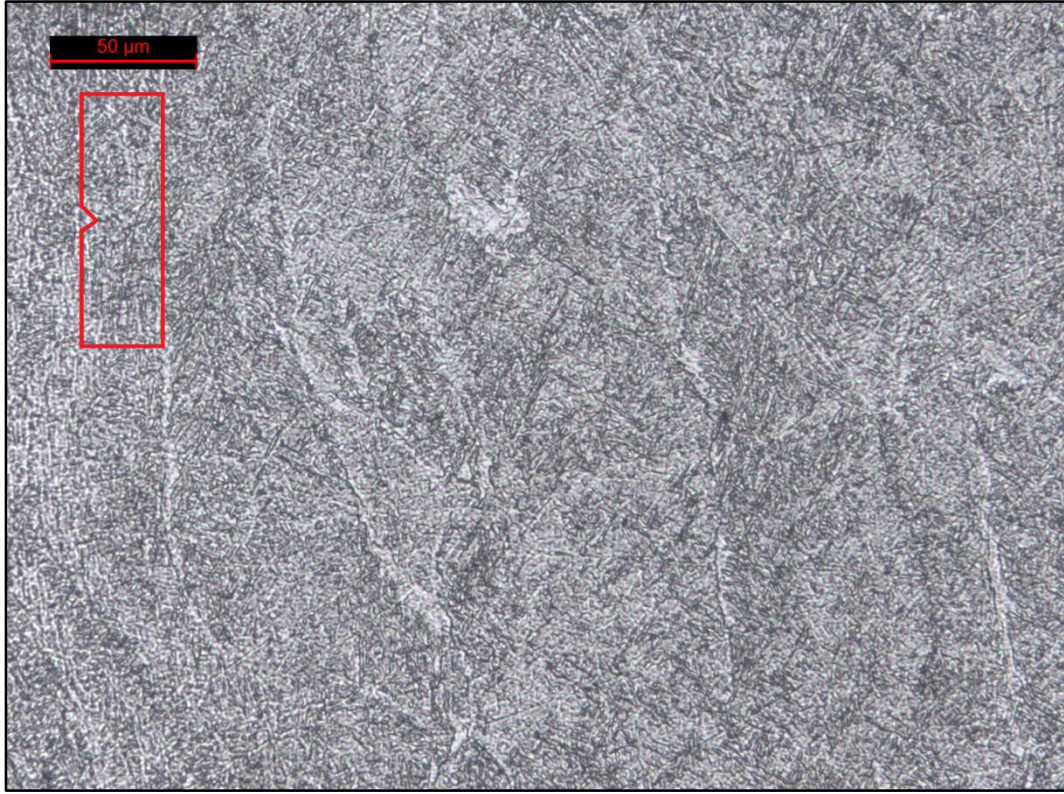
Şekil 5.21’de 60 derece oryantasyon ile üretilmiş numunenin mikroyapısı görülmektedir. Yatay ve dikey numunelerdeki gibi kolon tipi taneler gözlemlenmemektedir.



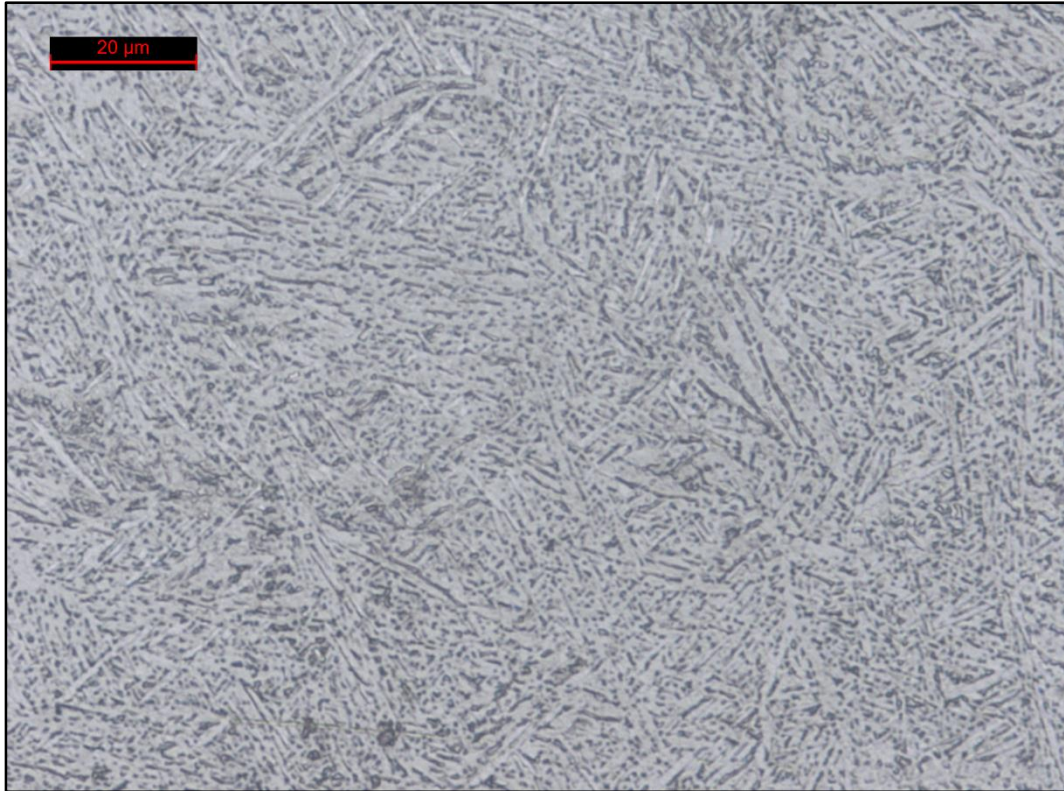
Şekil 5.18. Ti6Al4V sürekli soğuma (CCT) diyagramı



Şekil 5.19. Dikey oryantasyon mikroyapısı



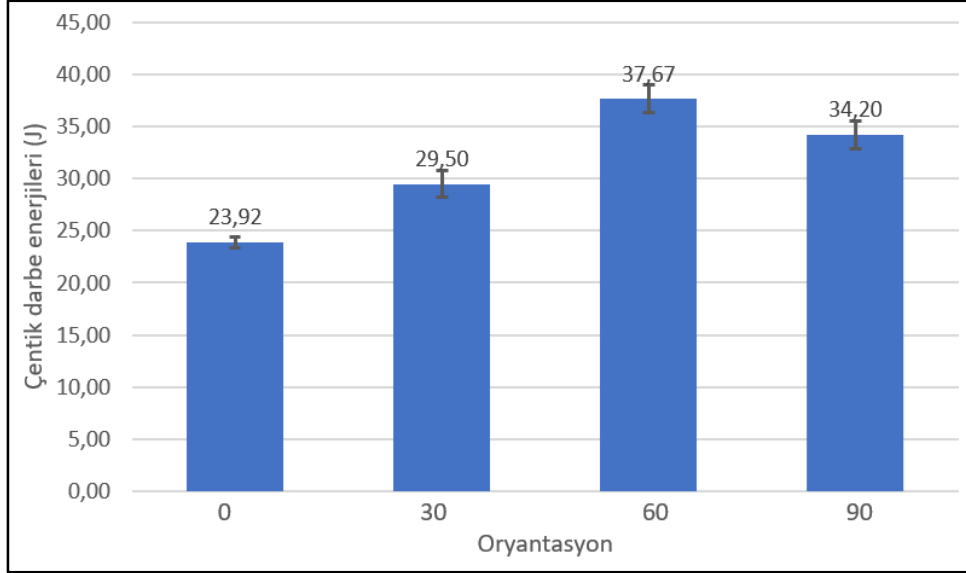
Şekil 5.20. Dikey oryantasyon tane yönleri



Şekil 5.21. 60 derece oryantasyon mikroyapısı

5.5. Çentik Darbe Testi Sonuçları

Çentik darbe dayanımı malzemenin mikroyapısına ve çentiğin pürüzlülüğüne doğrudan bağlıdır. Çentik darbe testleri sonuçları Şekil 5.22’de görülmektedir.



Şekil 5.22. Oryantasyonlara göre çentik darbe enerji

Numuneler çentikleri ile birlikte üretilmiştir. Dolayısıyla çentik bölgesindeki pürüzlülükler üretim oryantasyonuna göre değiştiği için çentiklerin de pürüzlülükleri birbirinden farklıdır. Ayrıca numunelerin üretimi sırasında oryantasyonlarına bağlı olarak katman başına aldıkları enerji miktarları ve soğuma hızları da değişmekte ve bu da mikroyapılarda farklılıklara neden olmaktadır.

En yüksek kırılma enerjisinin 60 derece oryantasyonda olduğu görülmektedir. Bunun ana nedeni mikroyapıda tane yapılarının eş eksenli oluşmaması olarak yorumlanmıştır. Kırılma yönünün sürekli değişmesi darbe tokluğunu arttırmaktadır [47, 48].

Ayrıca martenzit yapısının asiküler α (iğnemsî) veya Widmanstatten α tane yapısına dönüştürülmesi de darbe tokluğunu arttırdığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [49].

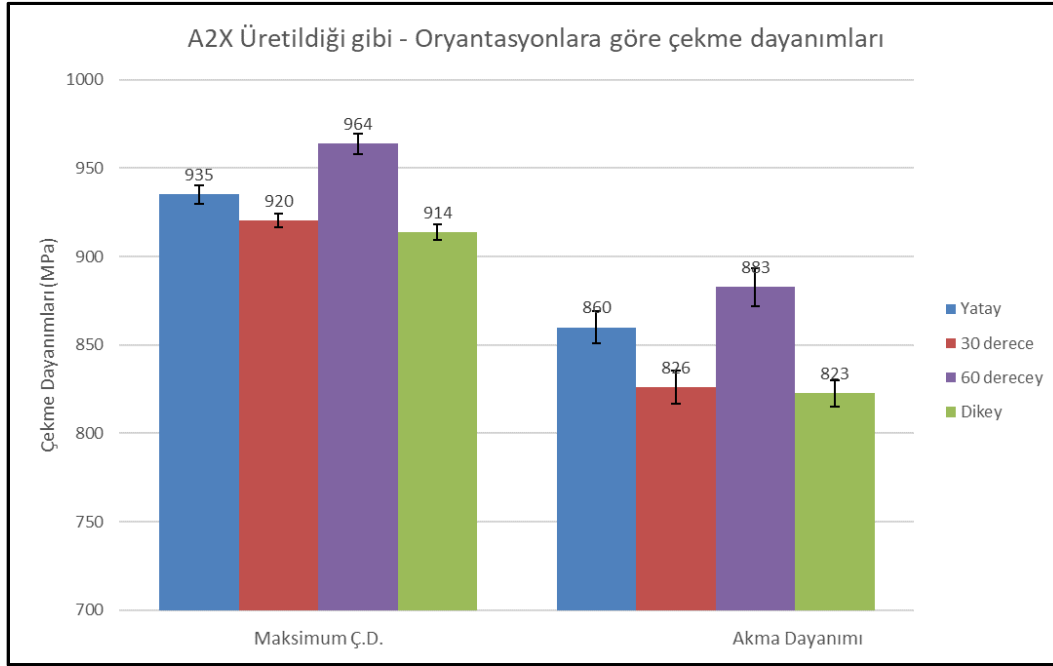
Yatay oryantasyonda tane yapıları ve lameller üretim tablasına doğru oluşmuştur ve lameller kırma kuvvetiyle aynı doğrultudadır. Bu da kırılma tokluğunu düşürmektedir. Dikey

oryantasyonda ise lamellerin ve tanelerin yönelimi kırma kuvvetine dik uzandığı için yatay oryantasyonlardan daha fazla enerji gerektirmiştir.

5.6. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testleri A2X makinesinde üretilen numuneler ile yapılmıştır. Testler numunelerin üretildiği halleri ile yapılmıştır. Üretildiği halleri ile test edilen numuneler 4 farklı oryantasyonda altışar adet üretilmiştir.

Şekil 5.23'te A2X makinesinde üretildiği halleriyle test edilen numunelerin çekme testi sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.23. Üretildiği hali ile test edilen numunelerin oryantasyonlara göre çekme gerilmeleri

30 derece ve dikey oryantasyondaki çekme sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Oryantasyonun bu değerler üzerinde bir etkisi var mı incelemek için p-değerleri hesaplanmıştır. P-değerleri Çizelge 5.3'te görülmektedir. Sonuç, maksimum çekme dayanımları arasında anlamlı bir fark olduğu fakat akma dayanımları arasında anlamlı bir farktan bahsedilemeyebileceği şeklindedir.

Çizelge 5.3. Dikey ve 30 derece dayanımları p-değerleri

Oryantasyon	Maksimum Ç.D.	Akma Dayanımı
Dikey	914	823
30 Derece	920	826
P-Değeri	0,015	0,32

En yüksek dayanım göstermesi belklenen yatay oryantasyon ve 30 derece oryantasyondaki çekme dayanımlarının 60 derece oryantasyondaki dayanımlardan düşük olmasının sebebi 60 derece oryantasyonun altında yüzey pürüzlülüklerinin gittikçe kötüleşmesi ve pürüzlülüklerin çentik etkisi yaratmasıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında yüzey pürüzlülüklerinin oryantasyona göre değiştiği tespit edilmiştir. Literatürde tabladaki konumuna göre de pürüzlülüğün değiştiğini gösteren çalışmalar vardır. Ayrıca farklı model iki makinede üretilen numunelerden elde edilen sonuçlara göre katman kalınlığı farklı üretimlerde pürüzlülük de beklendiği gibi farklılık göstermektedir. EBM’de destek yapı kullanılması yüzey kalitesini bozmaktadır. Makine satıcısı firma tarafından belirtilen destek yapı kullanma limiti 60 derecedir. Bu çalışmanın gösterdiği pürüzlülük sonuçlarına göre bu değer idealdir. 60 dereceden düşük oryantasyonlarda yüzey kalitesi zaten kötü çıkmakta ve mekanik özelliklere etki etmektedir.

Sertlik değerleri incelendiğinde elde edilen tüm ölçümler 35 – 40 Rockwell C aralığındadır. Hızlı soğuma olan bölgelerde sertliğin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Malzeme sertliği bakımından üretim oryantasyonunun dikkate değer bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

Numunelerdeki mikroyapılara etki eden en önemli faktör soğuma hızı ve ısının atılma yönüdür. Numunelerin kesit alanları birbirinden farklı olduğu için katman başına numunelere aktarılan enerjiler de mikroyapılara etki etmektedir. Üretimdeki tüm parçalar da birbirlerine etki etmektedir. Örneğin üretimi tamamlanmış olan yatay numuneler dikey numunelerin üretimi bitene kadar üretim haznesinin içinde sıcak bir ortamda beklemekte yavaş yavaş soğumaktayken son katmanlara doğru yalnız kalan dikey numuneler hazneyi sıcak tutacak kadar enerji alamamakta ve soğuyan hazne içerisinde çok daha hızlı bir şekilde soğumaktadır. Bu farklılıklara rağmen tüm oryantasyonlarda elde edilen mikroyapılar daha önce literatürde karşılaşılan yapılara benzemekte ve EBM yönteminin karakteristik mikroyapısını sergilemektedir.

Çentik darbe testlerinde ve çekme testlerinde mikroyapı özelliklerinin ve pürüzlülük özelliklerinin etkileri net bir şekilde görülmektedir. Kolon tipi mikroyapı görülen yatay ve dikey oryantasyonlarda kırılma enerjisi daha düşük çıkmıştır. 60 derece oryantasyonda tane yapıları tek yönde uzamadığı için kırılma sırasında kırılma yönü sürekli değişmiş ve bu sebeple daha çok enerjiye gerek duymuştur. Kırılma sırasında kırma kuvvetine paralel uzanmış kolon tipi taneler ve lamellerin olduğu oryantasyon yatay oryantasyondur ve

kırılma tokluğu zayıftır. Kolon tipi tane oluşan bir diğer oryantasyon dikey oryantasyondur fakat burada taneler kırma yönüne dik oluşmuştur ve bu da kırılma tokluğunu biraz arttırmıştır. Kolon tipi tane tespit edilemeyen 60 derece oryantasyonda ise kırılma sırasında kırılma yönü tane sınırlarında sürekli değişmek durumunda kaldığı için kırılma tokluğu yüksektir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde rapor edilen sonuç aralıkları içerisinde. Fakat literatürde rapor edilen değerler çok geniş bir aralık belirtmektedir. Bunun sebebi proses değişkenlerinin her çalışmada farklı olması ve bu değişkenlerin de sonuçlara etki etmesidir. Aynı numunenin farklı bir üretim grubu ile üretilmesi bile bu numunenin özelliklerine az da olsa etki etmektedir.

Numuneler üretildiği halleri ile test edilecekleri için destek yapılarını ayırmaya gerekecek olan işlemde kaçınmak amacıyla numuneler desteksiz üretilmiştir. Bunun sonucunda destek kullanılması gereken 30 derece oryantasyon ve yatay oryantasyonda mekanik özellikler beklendiğinden zayıf oluşmuştur. Numunelerin sertlikleri oryantasyona göre hissedilir şekilde değişmemektedir. Sonuç olarak destek yapıları kullanmadan ve üretildiği hali ile kullanılacak parçalar için en ideal üretim oryantasyonunun 60 derece olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak tez kapsamında yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre; 60 derece oryantasyonda alt yüzey ile üst yüzey arasındaki pürüzlülük farkı azdır ve üretim sırasında destek kullanmayı da gerektirmez. Dikey numunelerde de pürüzlülük numune çevresinde fazla değişmemektedir ve destek yapı gerektirmez. Fakat dikey numunelerde çekme dayanımları karakteristik olarak azdır. 30 derece oryantasyonda destek yapıların kullanılması gerekmektedir. 30 derece oryantasyonda destek yapıları kullanılmadığı takdirde üretim sırasında çeşitli çarpılmalar oluşabilmekte ve bu durum mekanik özellikleri etkilemektedir.

Literatürde farklı sonuçlar elde edilmiş çalışmalar dikkate alındığında bu yöntemin tekrar edilebilirliğini sorgulayacak çalışmalar yapılması önerilmektedir. Kırılma yüzeyleri incelemeleri, tomografi yöntemi ile numunelerin içlerinin incelenmesi gelecekte yapılması önerilen çalışmalara örnek olarak verilebilir.

KAYNAKLAR

1. Arcam AB. (2019). *Arcam A2X EBM Level 1 Training Documents*.
2. ISO / ASTM52900-15. (2015). *Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*. West Conshohocken: ASTM International.
3. Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., & arkadaşları. (2011). Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V. *Journal of materials engineering and performance*, 20(2), 203-212.
4. İnternet: ASTM. *additive manufacturing technology standards*. [Çevrimiçi]. URL: <https://www.astm.org/Standards/additive-manufacturing-technology-standards.html>. [Son Erişim Tarihi: 18.02.2020].
5. Wohlers, T., & Gornet, T. (2014). *History of additive manufacturing. Wohlers report*. wohlersassociates.
6. Yalçın, B., & Ergene, B. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-D Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.
7. Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13(2), 89-96.
8. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer.
9. STM. (2016). *Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları Sektör Değerlendirme Raporu*. Ankara.
10. Frazier, W. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Material Engineering and Perform*, 23, 1917–1928.
11. Gorsse, S., Hutchinson, C., Gouné, M., & Banerjee, R. (2017). Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 18(1), 584-610.
12. Karlsson, J. (2015). *Optimization of electron beam melting for production of small components in biocompatible titanium grades*. Doctoral dissertation, Acta Universitatis Upsaliensis.
13. Hiemenz, J. (2007). Electron Beam Melting. *Advanced Materials & Processes*, 45-46.
14. Galati, M., & Iuliano, L. (2018). A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. *Additive Manufacturing*, 19, 1-20.

15. EPMA. (2015). *Introduction to Additive Manufacturing Technology: A guide for Designers and Engineers*.
16. Attar, E. (2011). *Simulation of selective electron beam melting processes*. Doctoral dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
17. İnternet: Arcam AB. *Products*. [Çevrimiçi]. URL: <http://www.arcam.com/technology/products/> [Son Erişim Tarihi: 21.02.2020].
18. Vayssette, B., Saintier, N., Brugger, C., Elmay, M., & Etienne Pessard. (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.
19. Concept Laser. (2019). *Training Documents*.
20. Heinl, P., Rottmair, A., Körner, C., & Singer, R. (2007). Cellular Titanium by Selective Electron Beam Melting. *Advanced Engineering Materials*, 9(5), 360-364.
21. Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., & Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.
22. Zhang, B., Liao, H., & Coddet, C. (2013). Selective laser melting commercially pure Ti under vacuum . *Vacuum*, 95, 25-29.
23. Choi, W., Jourdan, J., Matveichev, A., & arkadaşları. (2016). Kinetics of Evaporation of Alloying Elements under Vacuum: Application to Ti alloys in Electron Beam Melting. *High Temperature Materials and Processes*, 36(8), 815-823.
24. Chang, K., & Gu, D. (2016). Direct metal laser sintering synthesis of carbon nanotube reinforced Ti matrix composites: Densification, distribution characteristics and properties. . *Journal of Materials Research*, 31(2), 281-291.
25. Das, S. (2003). Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals. *Advanced Engineering Materials*, 5(10), 701-711.
26. Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. . *CIRP annals*, 56(2), 730-759.
27. Gusarov, A. V., Yadroitsev, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2007). Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. *Applied Surface Science*, 254(4), 975-979.
28. Childs, T. H., Hauser, C., & Badrossamay, M. (2005). Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: experiments and modelling. . *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219(4), 339-357.

29. Milberg, J., & Sigl, M. (2008). Electron beam sintering of metal powder. *Production Engineering*, 2(2), 117-122.
30. Qi, H., Yan, Y., Lin, F., He, W., & Zhang, R. (2006). Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(11), 1845-1853.
31. Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review. . *International Materials Reviews*, 61(5), 361-377.
32. Markl, M. (2015). *Numerical Modeling and Simulation of Selective Electron Beam Melting Using a Coupled Lattice Boltzmann and Discrete Element Method*. Doctoral dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
33. Veiga, C., Davim, J. P., & Loureiro, A. J. (2012). Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Reviews on advanced materials science.*, 32(2), 133-148.
34. Donachie, M. (2000). *Titanium: A Technical Guide, 2nd Edition*. ASM International.
35. Joshi, V. A. (2006). *Titanium alloys: an atlas of structures and fracture features*. . Crc Press.
36. İnternet: Arcam AB. *Powder specifications*. [Çevrimiçi]. URL: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/materials/> [Son Erişim Tarihi: 21.02.2020].
37. ASTM F2924-14. (2014). *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. West Conshohocken: ASTM International.
38. Bruno, J., Rochman, A., & Cassar, G. (2017). Effect of Build Orientation of Electron Beam Melting on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 692–703.
39. Hrabe, N., Kircher, R., & Quinn, T. (2012). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated using electron beam melting (EBM): orientation and location. *Solid freeform fabrication Symposium*. Austin, TX.
40. Chern, A. H. (2018). *Build orientation, part size geometry, and scan path influence on the microstructure and fatigue life of Ti-6Al-4V fabricated by Electron Beam Melting*. Master's Thesis, University of Tennessee.
41. Lewandowski, J. J., & Seifi, M. (2016). Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. *Annual Review of Materials Research*, 46, 151-186.
42. Todai, M., Nakano, T., Liu, T., Yasuda, H. Y., Hagihara, K., Cho, K., Takeyama, M. (2017). Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-

- 48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 13, 61-70.
43. Persenot, T., Burr, A., Martin, G., Buffiere, J.-Y., Dendievel, R., & Maire, E. (2019). Effect of build orientation on the fatigue properties of as-built Electron Beam Melted Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Fatigue*, 118, 65-76.
 44. Roy, L. (2013). *Variation in mechanical behavior due to different build directions of Ti6Al4V fabricated by electron beam additive manufacturing technology*. Doctoral dissertation, University of Alabama Libraries.
 45. Galarraaga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., & Peeyush Nandwana. (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.
 46. Randall, G. (2005). *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing* . Metal Powder Industries Federation.
 47. Ceyhun, K., & Engin, K. (2019). Nd: YAG lazer kaynağı ile birleştirilen Ti6Al4V alaşıımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine ısıt işlemlerin etkileri. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 232-243.
 48. Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
 49. Barreda, J., Santamaría, F., Azpiroz, X., Irisarri, A., & Varona, J. (2001). Electron beam welded high thickness Ti6Al4V plates using filler metal of similar and different composition to the base plate. *Vacuum*, 62, 143-150.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞEN, Berat
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 02.10.1992, Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (554) 914 07 87
e-mail : berat.sen@outlook.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Ege Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2016
Lise	Kırkkonaklar Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Gazi Üniversitesi EKTAM	Proje Asistanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Şen, B. Usta, Y. (2019). Elektronik Demeti ile Ergitme İşleminde Üretim Oryantasyonunun Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. *1. Ulusal Mühendislik ve Teknoloji Kongresi*. Karaman.

Hobiler

Masa Tenisi, Satranç



GAZİ GELECEKTİR..