
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TOZ YATAKLI METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE DÖNER YAPILARIN TEMASSIZ DESTEKLİ OLARAK ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Melisa ALTINTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Melisa ALTINTAŞ
24/10/2024

TOZ YATAKLI METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE DÖNER YAPILARIN TEMASSIZ DESTEKLI OLARAK ÜRETİLEBİLİRLİĞİNN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Melisa ALTINTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemlerinde konvansiyonel yöntemlerin aksine çok parçalı montaj yapıların tek parça halinde üretilmesi mümkündür. Özellikle bazı karmaşık parçaların elektron demeti ile ergime (EDE) gibi metal Eİ yöntemleri ile üretimleri esnasında oluşan ısının atılması için kullanılan destek yapılarının üretim sonrası temizlenmesi mümkün olamamaktadır. Isı parça üzerinden bertaraf edilemediği taktirde, parçada sarkma ile boşluklarda birleşme gibi yüzey kusurları meydana gelmektedir. Bu çalışmada EDE yöntemi kullanılarak destek yapısı kullanımının mümkün olmadığı bütünleşik döner yapıların radyal üretim yönünde minimum boşluk ile üretilebilmesi araştırılmıştır. Farklı hacimlere sahip bölgelerde iç ile dış parçaların arasındaki mesafe değişiminin, kafes yapısı gibi yapıların kullanımının yüzey bozulmasına, sarkmaya ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Elli adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerde boşluk, sarkma miktarları ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde 400 μm ile 1.000 μm arasındaki boşluk değerlerinde iç parçanın dış parçaya temassız destek yapısı gibi davrandığı gözlenmiştir. Üretilebilir minimum boşluk değerinin sarkma eğilimli malzeme miktarı, temassız destek yapısı kalınlığı ve yüksekliğine bağlı olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen üretimlere göre dönme fonksiyonunu yerine getirebilen (denenmiş) en küçük boşluklu parça 400 μm olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca boşluk miktarı azaldıkça ısı transferinin sağlanabilmesi sayesinde yüzey pürüzlülüğü değerleri 15 Ra değerlerine kadar düşürülebilmiştir. Öte yandan minimum boşluklu parçalarda üretilebilirliğin yanında toz tahliyesinin çok kritik olduğu görülmüştür. Parçalarda birleşme olmamasına rağmen boşlukta yer alan toz tahliye edilemez ise dönme fonksiyonunun yerine getirilemediği gözlemlenmiştir. Hem ısı transferi hem de toz tahliyesi açısından kafes yapılarının pozitif etki yarattığı görülmüştür. Kafes yapısına sahip parçalarda yüzey sarkması önemli oranda azaldığı görülmüştür. Denenen kafes yapılarından en efektif olanın hacim merkezli kübik kafes yapısı olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli imalat, elektron demeti ile ergitme, bütünleşik döner yapılar, temassız destek yapıları, yüzey problemleri, sarkma problemi
Sayfa Adedi	:	75
Danışman	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK
İkinci Danışman	:	Dr. Evren TAN

INVESTIGATION OF THE ROTATIONAL PARTS PRODUCTION WITH CONTACT FREE SUPPORT USING BY METAL POWDER BED ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Melisa ALTINTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

In additive manufacturing (AM) methods, unlike in the conventional methods, the massive production of multi-part assembly is possible. Especially, during production of some complex parts using AM methods such as electron beam melting (EBM), removing supports that are used for dissipation of generated heat, is not possible after production. If generated heat could not be dissipated through parts, parts gaps may be merged with overhang, surface defects could be occurred. In this study, the nonfunctionality of support structure through EBM method and the production of consolidated rotating structures at radial build direction with minimal gap are researched. The effect of the distance between inner and outer parts, using lattice structure on the surface deterioration, overhang behavior and surface roughness were investigated in regions within the different volume of the part. Fifty parts have been produced. The amount of clearance and overhang and surface roughness were measured. As a result of the studies, it was observed that inner part behaves like a contactless support over outer part for consolidated rotational parts that have between 400 μm and 1.000 μm clearance. Producible minimal clearance is related to quantity of material subjected to overhang, thickness of contactless support and its height. The smallest clearance tested that was able to fulfill the rotational function, based on the performed productions, was found to be 400 μm. On the other hand, when clearance decreases, surface roughness could decrease down to 15 Ra. On the other hand, Beside the producible minimal clearance part, powder drain is crucial. Although there is no merge, if powder that occurs on the gap could not drained, rotation could not be functionalized. It has been observed that lattice structures have positive effects both in terms of heat transfer and in powder drainage. It has also been monitored that surface sag has dramatically fallen in the parts with lattice structures. It has been observed that body centered cubic lattice structured parts is the most effective among the tested.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Additive manufacturing, electron beam melting, rotating consolidated parts, contact-free support structures, surface defects, overhang
Page Number	:	75
Supervisor	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK
Co-Supervisor	:	Dr. Evren TAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca çalışmalarımda yol gösteren, yardımını esirgemeyen kıymetli danışmanım Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e, her an yardımıma koşan, ufkumu açan, bir ağabey gibi çalışmalarımda hem yol gösterici hem de destekçi olan Dr. Evren TAN'a, çalışmamda dirsek temasını esirgemeyen, özverili ve yardımsever arkadaşım Sina KAVAK'a ve Yiğit AKKUL'a, hayatımdaki en büyük şansım olan, bugünlere gelmemdeki başrol kahramanlarım kıymetli annem Gülay ALTINTAŞ'a, babam Vural ALTINTAŞ'a ve kardeşim Damla ALTINTAŞ'a, gerek sunduğu imkanlarla gerekse biz çalışanlarına verdiği değer için şirketim ASELSAN'a sonsuz teşekkürlerimi iletmeyi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xv

RESİMLERİN LİSTESİ xvii

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 5

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi 5

2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri 5

2.3. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri 7

2.3.1. Malzeme ekstrüzyonu 8

2.3.2. Doğrudan enerji biriktirme 9

2.3.3. Malzeme püskürtme ve bağlayıcı püskürtme 9

2.3.4. Tabaka laminasyonu 10

2.3.5. Toz yatağında ergitme 10

2.3.6. TYİ yöntemlerinde mikro yapı ve mekanik özellikler 12

2.4. Metal Eklemeli İmalata Yönelik Tasarım 13

2.5. Metal Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Sarkma Problemi 19

3. MATERYAL VE YÖNTEM 23

3.1. Ti6Al4V Ham Malzeme Özellikleri 23

3.2. Kullanılan Tasarım, Üretim ve Ölçüm Altyapıları 23

4. TASARIM VE ÜRETİM YAKLAŞIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ 29

4.1. Bütünleşik Kilitlenebilir Döner Yapı Tasarımı 29

Sayfa

4.2. Bütünleşik Kilitlenebilir Döner Yapıların Üretimi 40

5. ÖLÇÜMLER VE SONUÇLARININ TARTIŞILMASI 47

5.1. Üst ve Alt Bölge Parçaların Test ve Ölçüm Sonuçları 47

5.2. Tam Dairesel Parçaların Test ve Ölçüm Sonuçları 57

5.3. Tozda Isıl İletim Analiz Sonuçları 62

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 67

KAYNAKLAR 71

ÖZGEÇMİŞ 75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması 6
Çizelge 2.2. Eklemeli imalat yöntemleri..... 6
Çizelge 2.3. Toz yatağında metal eklemeli imalat yöntemleri..... 11
Çizelge 3.1. Kullanılan Ti6Al4V tozu özellikleri..... 23
Çizelge 4.1. Parça listesi ve özellikleri 39
Çizelge 4.1. (devam) Parça listesi ve özellikleri..... 40
Çizelge 5.1. CT ölçümü gerçekleştirilen üst bölge parçalar 47
Çizelge 5.2. CT ölçümü gerçekleştirilen alt bölge parçalar..... 49
Çizelge 5.3. CT ölçümü gerçekleştirilen üst bölge parçaların sarkma miktarları..... 51
Çizelge 5.4. CT ölçümü gerçekleştirilen alt bölge parçaların sarkma miktarları 52
Çizelge 5.5. Üst parçalarda W bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü değerleri..... 55
Çizelge 5.6. Alt bölge parçalarda W bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü değerleri 56
Çizelge 5.7. Beşinci sette üretilen parçaların W bölgesi ölçüm sonuçları..... 61
Çizelge 5.8. Ti-6Al-4V Termo-fiziksel özellikler 63

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Eklemeli imalat cihazlarında parça üretim prensibi 5

Şekil 2.2. Kullanım oranına göre metal eklemeli imalat yöntemleri 8

Şekil 2.3. (a) Maksimum malzeme ile tasarım (b) Eklemeli imalat için tasarım kriterlerinden minimum malzeme ile tasarım 14

Şekil 2.4. (a) Yatay ve dikey eksende üretilen parçalar (b) Dikey eksende destek yapısız üretilen parça 14

Şekil 2.5. Parçanın üretim tablası içerisinde farklı açılarda yerleşimi 15

Şekil 2.6. Farklı açılara sahip parçaların destek yapısı kullanılmadan EBM yöntemi ile üretilmesi 16

Şekil 2.7. Temassız destek yapısı kullanılarak üretilen parçanın CAD modeli 21

Şekil 2.8. (a) Temassız destek yapılı uzun parça (b) Temassız destek yapılı kısa parça (c) Temassız destek yapılı dış bükey parça 21

Şekil 2.9. Temassız destek yapısı kullanılan parça tasarımı 22

Şekil 3.1. Arcam A2X cihazı şematiği 24

Şekil 3.2. Go Scan 3D tarama cihazı 25

Şekil 3.3. Metkon Ecopress 100, sıcak kalıba alma 25

Şekil 3.4. Olympus BX52 optik mikroskopu..... 26

Şekil 3.5. Mitutuyo Surftest SV 3100 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı 26

Şekil 3.6. EasyTom XL bilgisayarlı tomografi cihazı 27

Şekil 5.1. Q boşluklu üst ve alt bölge parçaların maksimum sarkma miktarları 53

Şekil 5.2. W boşluklu üst ve alt bölge parçaların maksimum sarkma miktarları 53

Şekil 5.3. Üst bölge parçalarda boşluk miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi..... 55

Şekil 5.4. Alt bölge parçalarda boşluk miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 56

Şekil 5.5. (a) Tahliye edilememiş toz öbeği (b) Parça 41'e PRS uygulaması 58

Şekil 5.6. Eksenel yönde üretilen Parça 42'nin üretim görseli 59

Şekil 5.7. Beşinci set üretimde W bölgesindeki yüzey bozulması 60

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. Üst bölgesi zımpara sonrası numunesi ve W sarkma bölgesi ölçüleri..... 60

Şekil 5.9. 400 µm, 500 µm, 600 µm ve 750 µm kalınlığındaki toz bölgelerinde en alt katmandaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi..... 64

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. SLM yöntemi ile üretilmiş Ti64 bir parçanın çeşitli bölgelerindeki mikro yapıları (a) Üstten görünüm (b) Yandan görünüm (c) Hapsolmuş gaz dolayısıyla oluşmuş gözenek yapısı (d) Yetersiz ergime kaynaklı oluşan gözenek yapısı 13

Resim 2.2. (a) Yüzey tabanlı kafes yapısı (b) Kiriş tabanlı kafes yapısı (c) Düzlemsel tabanlı kafes yapısı 17

Resim 4.1. Döner braket tasarımları (a) Konvansiyonel metot için tasarlanmış (b) Eklemeli imalat için tasarlanmış topoloji optimizasyonu öncesi (c) Eklemeli imalat için tasarlanmış topoloji optimizasyonu sonrası 30

Resim 4.2. Bütünleşik kilitlenebilir döner yapı tasarımı 31

Resim 4.3. Bütünleşik kilitlenebilir döner yapı kilit mekanizması..... 31

Resim 4.4. Bütünleşik kilitlenebilir döner yapı toz tahliyesi boşaltmaları 31

Resim 4.5. Parçalar üzerindeki elmas geometrili sabitleme delikleri 32

Resim 4.6. Bütünleşik döner yapılarda sarkma bölgeleri 33

Resim 4.7. Tam dairesel parça teknik resmi (a) Önden görünüş (b) Soldan görünüş (c) Kesit görünüşü 35

Resim 4.8. Üst parçaların teknik resmi (a) Önden görünüş (b) Soldan görünüş (c) Arkadan görünüş (d) Kesit görünüşü..... 36

Resim 4.9. Alt parçaların teknik resmi (a) Önden görünüş (b) Soldan görünüş (c) Arkadan görünüş (d) Kesit görünüşü..... 37

Resim 4.10. Toz tahliye detayları (a) Eliptik boşaltma (b) Geniş kanal boşaltması (c) Body centered cubic kafes yapısı (d) Truncated cube kafes yapısı..... 39

Resim 4.11. İlk üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi 41

Resim 4.12. İkinci üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi 41

Resim 4.13. Üçüncü üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi 42

Resim 4.14. Dördüncü üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi 42

Resim **Sayfa**

Resim 4.15. Beşinci üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi 43

Resim 4.16. Üst ve alt parçaların destek yapılarının gösterimi 43

Resim 4.17. İlk sette üretilen üst parçaların üretim sonrası görselleri 44

Resim 4.18. İkinci sette üretilen üst ve alt parçaların üretim sonrası görselleri 44

Resim 4.19. Üçüncü sette üretilen tam dairesel parçaların üretim sonrası görselleri 45

Resim 4.20. Dördüncü sette üretilen destek yapıları temizlenmemiş tam dairesel parçaların üretim sonrasındaki görselleri 45

Resim 4.21. Beşinci sette üretilen tam dairesel parçaların üretim sonrası görselleri 45

Resim 5.1. Parça 17'nin tarama modeli görselleri 47

Resim 5.2. Üst parçaların Q bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 8 (b) Parça 15 (c) Parça 14 (d) Parça 13 48

Resim 5.3. Üst parçaların W bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 6 (b) Parça 7 (c) Parça 8 (d) Parça 10 49

Resim 5.4. Alt parçaların Q bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 20 (b) Parça 21 (c) Parça 22 (d) Parça 30 50

Resim 5.5. Alt parçaların W bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 30 (b) Parça 31 (c) Parça 32 51

Resim 5.6. Sarkma genişliği ve sarkma uzunluğu ölçülerinin gösterilmesi 51

Resim 5.7. Üst ve alt parçaların maksimum sarkma eğilimindeki bölgeleri 54

Resim 5.8. Parça 42'nin iç- alt kısmının tarama modeli 59

Resim 5.9. Beşinci set üretimdeki parçaların W bölgesinin Optik mikroskop altında kesit görüntüleri (a) Parça 44 (b) Parça 47 (c) Parça 48 (d) Parça 49 (e) Parça 50 62

Resim 5.10. Toz üzerinde gerçekleştirilen ısıl analiz modeli 63

Resim 5.11. (a) 750 μm (b) 600 μm Ti-6Al-4V sinterlenmiş tozu üzerinde oluşan ergiyik havuzdaki sıcaklık dağılımı 66

Resim 5.12. (a) 500 μm (b) 400 μm Ti-6Al-4V sinterlenmiş tozu üzerinde oluşan ergiyik havuzdaki sıcaklık dağılımı 65

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
N	Newton
Pa	Pascal
Ra	Aritmetik Ortalama Pürüzlülük
Rq	Kare Kök Ortalama Pürüzlülük
Ry	Maksimum Dalgalanma Pürüzlülüğü
Rz	Maksimum Yükseklik Pürüzlülüğü

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AM	Additive Manufacturing
DED	Direct Energy Deposition
DFAM	Design for Additive Manufacturing
DMLM	Direct Metal Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBAM	Electron Beam Additive Mnaufacturing
EBM	Electron Beam Melting
EDE	Elektron Demeti ile Ergitme
Eİ	Eklemeli İmalat
LOM	Laminated Object Manufacturing
PBF	Powder Bed Fusion
SLA	Stereolithography Apparatus
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography
TYE	Toz Yatağında Ergitme

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze bakıldığında üretim yöntemlerinin dönemin getirdiği ihtiyaçlar doğrultusunda evrildiği görülmektedir. Bu evrilmeye genel perspektifte bakıldığında ilk insanlık döneminden gelen dolu malzemelerden çeşitli aletlerle boşaltma yapılması ile başlayan üretim sürecinin, günümüzde boşaltma ile malzeme artırmaksızın minimum miktarda malzemenin kullanımını hedefleyen katman katman üretim gerçekleştiren eklemeli imalat yöntemlerine doğru evrilmeye başladığı görülmektedir.

Eklemeli imalat (Eİ) bilindiği üzere bilgisayar ortamında hazırlanmış katı modelin herhangi kalıp ya da takım kullanılmadan doğrudan katman katman üretilmesini konu alan üretim yöntemlerinin genel adıdır. Eİ yöntemleri sayesinde geleneksel metotlarla üretilmesi zor olan veya mümkün olmayan karmaşık geometriye sahip yapıların, bütünleşik yapıların, kişiselleştirilmiş parçaların üretimi mümkün olmaktadır. Geleneksel metotlarla üretimi imkansız ya da güç olan yapıların Eİ ile kolaylıkla üretilmesinin yanında hızlı ve maliyet etkin çıktıların elde edilmesi eklemeli imalatı geleneksel yöntemlerin önüne geçirmektedir [1].

Eİ yöntemlerinin yadsınamayacak kadar çok faydasının olmasının yanında, dezavantajlarının olduğu ve aynı zamanda hala gelişmekte olması sebebi ile tam anlamda aydınlatılamamış kısımları ve çalışmaları süren konuları mevcuttur. Özellikle metal eklemeli imalat yöntemlerinde en sık karşılaşılan problemler arasında üretilen parçaların yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olması, üretim esnasında meydana gelen yüksek sıcaklık dolayısıyla parçalarda malzeme sarkması, çarpılma, cüruf oluşumu, düşük boşluklarda birleşmemesi gereken yapıların kaynaması gibi yüzey problemlerinin meydana gelmesi, geometrik ve boyutsal sapmaların oluşması gelmektedir [1-5] Bu problemler Eİ'ye yönelik tasarım kurallarının uygulanması, üretim haznesindeki malzemelerin ön ısıtmaya tabi tutulması, fazla ısının atılabilmesi için riskli bölgelere destek yapılarının uygulanması gibi bir takım önleyici faaliyetler ile giderilebilmekte ve daha kabul edilebilir hale getirilebilmektedir [2, 6]. Örneğin metal eklemeli imalat yöntemleri içerisinde elektron demeti ile ergitme (ing. EBM) yönteminde tozlar üzerinde ön ısıtma gerçekleştirilmesi EBM yöntemini seçici lazer ile ergitme (ing. SLM) yönteminden daha avantajlı konuma getirmektedir [2]. Ancak bu iyileştirici faaliyetler her durumda uygulanamamaktadır. Örneğin parça karmaşıklığı ne kadar fazla ise bu faaliyetlerin uygulanması zorlaşmakta hatta

zaman zaman imkansız hale gelmektedir. Özellikle boşluk miktarı az olan karmaşık geometriye sahip bütünleşik döner yapılarda, iç kısımda bulunan parçaya ısı bertarafı için gerekli destek yapılarının uygulanması gerekirken, üretim sonrasında destek yapılarına erişim zorluğu sebebi ile bu yapıların temizlenemediği bilinmektedir. Öte yandan silindirik yapılı parçalarda destek yapısı olmadan minimum boşluğun elde edilebilmesi için üretim yönünün, deformasyonun en düşük olacağı yön olan radyal eksene dik eksende olması avantaj sağlamaktadır. Ancak bazı parametreler dolayısıyla bu üretim yönünden vazgeçmek gerekmektedir. Parçanın üretim tablasına bazı oryantasyonlarda sığamaması, parça üzerinde birden fazla, farklı oryantasyonda üretimi daha avantajlı olan detayların bulunması ya da parça üzerinde çok sayıda farklı konumda silindirik detayların bulunması gibi bazı durumlarda üretimin radyal eksende gerçekleştirilmesi ihtiyacını doğurabilmektedir [3]. Bu durumda da silindirik yapılarda destek yapısız üretimde form bozulmaları meydana gelmektedir. Literatürde silindirik forma sahip geometriler yerine elmas, gözyaşı damlası ya da elips şekillerin tercih edilmesi ile destek yapısı kullanılmadan üretimin mümkün olduğu bahsedilmektedir [7].

Son yıllarda araştırmacıların ilgi odağı haline gelen bir diğer konu ise parçalara teması olmadan ısı atımına yardımcı olan temassız destek yapılarıdır. Bu yöntemde üretilecek parçanın altına yapı ile temas etmeyecek şekilde, genellikle blok olarak, ısı atımı sağlama amacı ile parça eklenmektedir. Bu yapılar literatürde temassız destek yapıları olarak ifade edilmektedir. Üretilecek parça ile temassız destek yapıları arasındaki ısı transferini her iki parça arasında kalan sinterlenmiş metal tozu sağlamaktadır. Burada birkaç kritik unsur söz konusudur. Bunlar parça ile temassız destek yapısı arasındaki boşluk miktarı, parçanın üretim platformu ile yaptığı açı, üretilecek parçanın içbükey, dışbükey oluşu, temassız destek yapısı kalınlığı ve yüksekliğidir [2, 3, 8].

Literatür taraması yapıldığında destek yapısı kullanılmadan ve radyal yönde üretimi gerçekleştirilen, minimum boşluğa sahip bütünleşik döner yapılar ile ilgili detaylı çalışmalara rastlanmamıştır.

Araştırmanın amacı

Tez çalışması kapsamında, 700- 800 º C mertebelerinde yüksek üretim sıcaklığına sahip EBM yöntemi kullanılarak standart destek yapısı uygulamasının mümkün olmadığı radyal

yönde üretimi gerçekleştirilen bütünleşik döner yapılarda, dönme fonksiyonunu yerine getirebilen minimum boşluk miktarı saptanmaya çalışılmıştır. Literatürdeki temassız destek yapılar ile ilgili çalışmalar da referans alınarak, bütünleşik döner parçaların iç ve dış yapılarının kendi içlerinde birbirlerine temassız destek yapısı gibi davranma durumu araştırılmıştır.

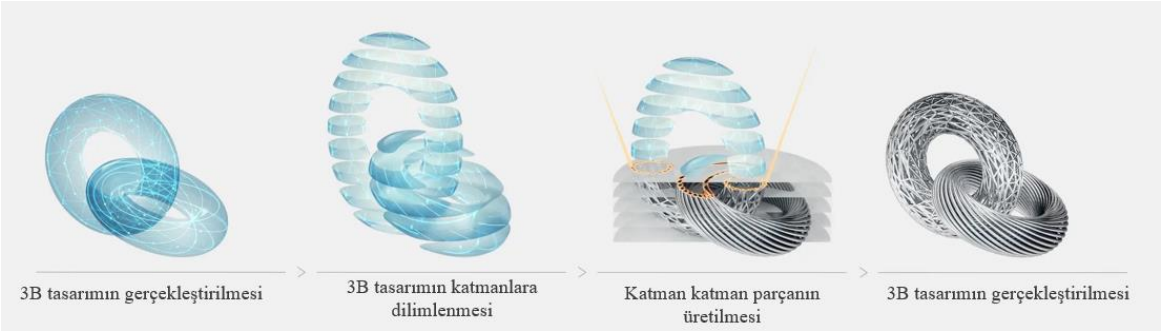
Bu tez çalışması kapsamında yürütülen çalışmalarda geleneksel yöntemlerle üretim için tasarlanan muadil kilitlenebilir döner braket yapısının Eİ yöntemlerinden EBM yöntemi kullanılarak bütünleşik olarak radyal üretim yönünde üretilmesi için konsept tasarımın gerçekleştirilip döner kısım için fonksiyonelliğin bozulmadığı minimum boşluk miktarının saptanması ve bu kapsamda yaklaşımlar gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilecek çalışmalarda iç ve dış parça arasına destek yapısı olmaksızın iç ve dış parçanın birbirine temassız destek yapısı davranışı sergileme durumu, bu esnada meydana gelen üretim kusurları ve üretim sonrası için uygun toz tahliye yöntemleri araştırılmıştır. Döner yapıların, radyal ekseninde Eİ ile minimum boşlukla üretimine dair araştırmaların güncel bir konu olması sebebi ile söz konusu çalışmanın bu alana katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi

Eİ; hızlı prototipleme (HP), üç boyutlu yazma (ing. 3DP) gibi farklı terimlerle tanımlanabilen, üç boyutlu model verilerini kullanarak talaşlı imalatın aksine dolu malzeme boşaltılarak değil katman katman biriktirilerek objeyi oluşturarak üretim yöntemlerine verilen genel isimlendirmedir (Bkz. Şekil 2.1.). Eklemeli imalat yöntemlerinde herhangi kalıp, takım kullanılmadan minimum malzeme ile üretim gerçekleştirmek mümkündür [9, 10].

Eklemeli imalat yöntemleri ile alışılagelmiş üretim yöntemleri kullanılarak üretilmesi mümkün olmayan karmaşık geometrili, bütünleşik veya kişiselleştirilmiş yapıların üretilmesi mümkündür.

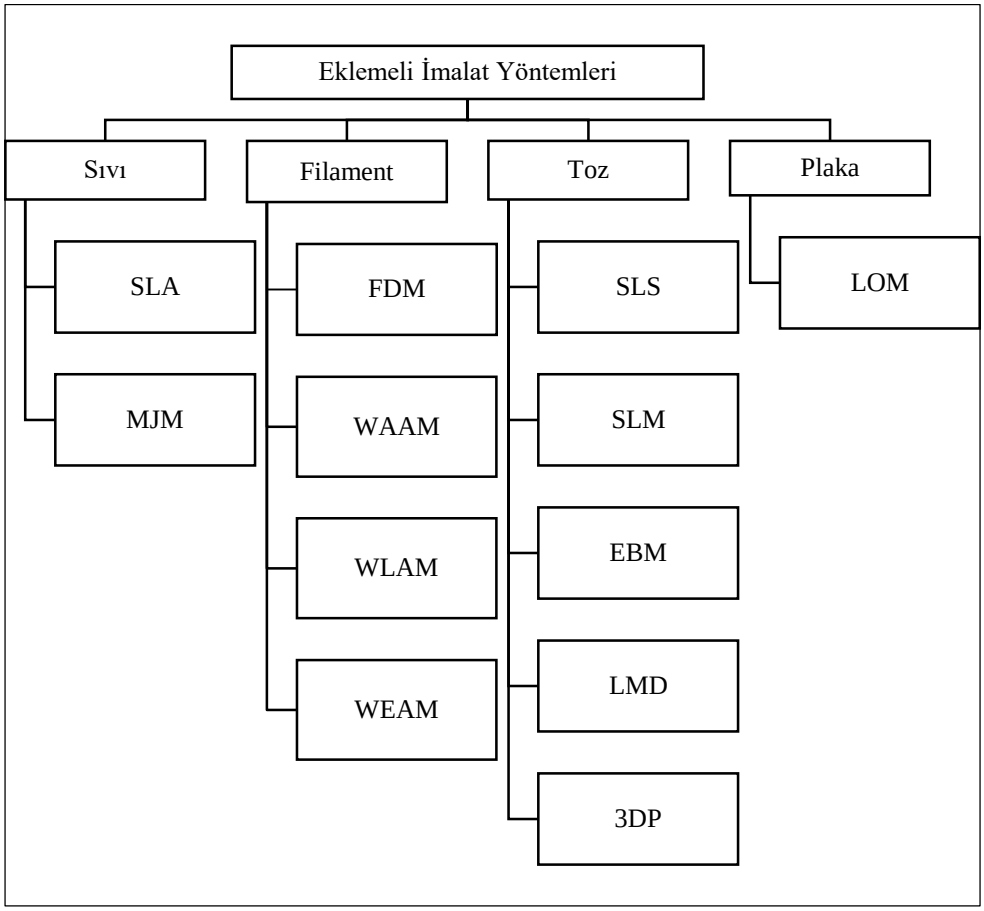


Şekil 2.1. Eklemeli imalat cihazlarında parça üretim prensibi [11]

2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemlerini farklı sınıflandırmalar altında ele almak mümkündür. Kullanılan malzeme türüne göre bakıldığında eklemeli imalat dört ana başlık altında incelenebilir. Bunlar sıvı, filament, toz ve plakadır (Bkz. Çizelge 2.1., Çizelge 2.2.). Öte yandan Uluslararası Standardizasyon Derneği (ing. ISO) / Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ing. ASTM) 52900: 2021 (en) standardında Eİ yöntemlerini yapıştırma ve bağlama yöntemlerine göre yedi ana başlık altında incelemektedir [12]. Bunlar direkt enerji yığma, malzeme ekstrüzyonu, toz yatağında ergitme, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, fotopolimerizasyon ve laminasyondur.

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması [13, 14]



Çizelge 2.2. Eklemeli imalat yöntemleri [14-17]

Malzeme Hali	Yöntem Adı	Malzeme Kullanım Şekli	Katman Oluşturma Yöntemi	Faz Değişimi	Malzeme
Sıvı	SLA	Tank içerisinde Sıvı reçine	Lazer ile tarama / ışık projeksiyonu	Fotopolimerizasyon	UV ile kürlenen reçine ve seramik
	MJM	Jet içerisinde sıvı polimer	Mürekkep jet yazımı	Soğuma ve fotopolimerizasyon	UV ile kürlenebilir akrilik plastik ve mum
Filament	FDM	Nozul içerisinde ergitilmiş filament	Devamlı ekstrüzyon ve biriktirme	Soğuma ile katılaşma	Termoplastik ve mum
	WAAM	Nozul içerisinde tel	Ark yardımı ile eritme	Full erime	Metal
	WLAM	Nozul içerisinde tel	Lazer ışın kaynağı ile eritme	Full erime	Metal
	WEAM	Nozul içerisinde tel	Elektron ışın kaynağı ile eritme	Full erime	Metal

Çizelge 3.2. (devam) Eklemeli imalat yöntemleri [14-17]

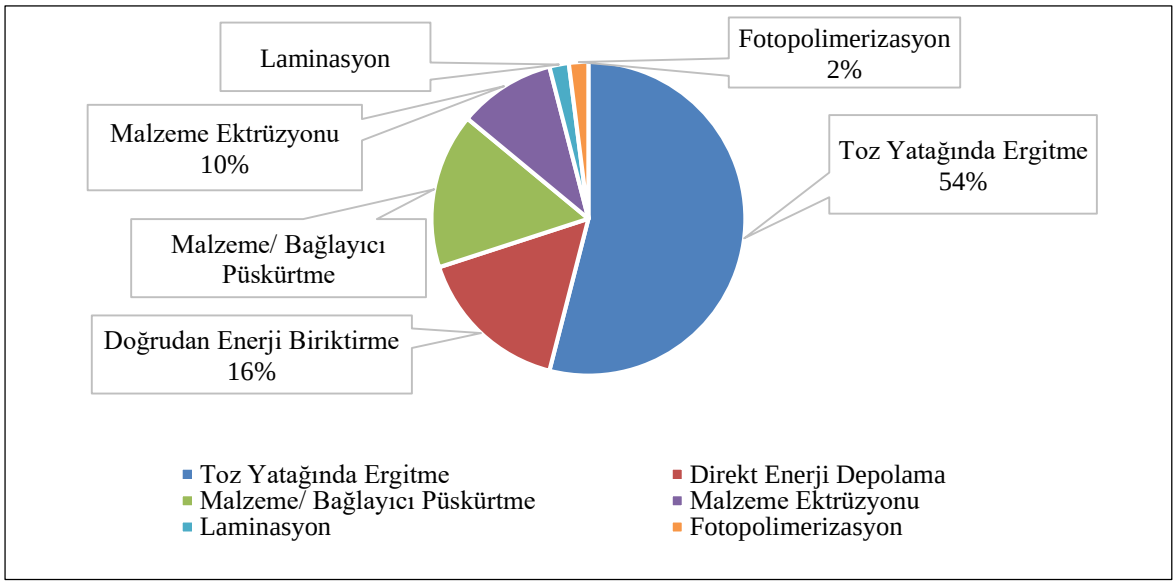
Malzeme Hali	Yöntem Adı	Malzeme Kullanım Şekli	Katman Oluşturma Yöntemi	Faz Değişimi	Malzeme
Sıvı	SLA	Tank içerisinde Sıvı reçine	Lazer ile tarama / ışık projeksiyonu	Fotopolimerizasyon	UV ile kürlenen reçine ve seramik
	MJM	Jet içerisinde sıvı polimer	Mürekkep jet yazımı	Soğuma ve fotopolimerizasyon	UV ile kürlenebilir akrilik plastik ve mum
Filament	FDM	Nozul içerisinde ergitilmiş filament	Devamlı ekstrüzyon ve biriktirme	Soğuma ile katılaşma	Termoplastik ve mum
	WAAM	Nozul içerisinde tel	Ark yardımı ile eritme	Full erime	Metal
	WLAM	Nozul içerisinde tel	Lazer ışın kaynağı ile eritme	Full erime	Metal
	WEAM	Nozul içerisinde tel	Elektron ışın kaynağı ile eritme	Full erime	Metal
Toz	SLS	Hazne içerisinde toz	Lazer ışın kaynağı ile tarama	Bölgesel erime	Termoplastik, mum, metal tozu ve seramik tozu
	SLM	Hazne içerisinde toz	Lazer ışın kaynağı ile tarama	Tam ergime	Metal
	EBM	Hazne içerisinde toz	Elektron ışın kaynağı ile tarama	Tam ergime	Metal
	LMD	Nozul yardımı ile toz enjeksiyonu	İstenildiğinde toz enjeksiyonu ve lazer yardımıyla eritme	Full ergime	Metal
	3DP	Hazne içerisinde toz	İstenildiğinde yapıştırıcı yardımıyla yazma	-	Polimer, metal, seramik ve diğer tozlar
Plaka	LOM	Lazer kesimi	Plakaları besleme ve yapıştırıcılar yardımı ile yapıştırma	-	Kağıt, plastik ve metal

2.3. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri

Karmaşık geometrilerin geleneksel imalat yöntemleri ile üretim zorluğu, günümüz dünyasında hızlı bir şekilde ürüne ihtiyaç duyulması, ürün stoklamayı azaltma, ağırlık azaltma gibi ihtiyaçlar sebebi ile özellikle metal eklemeli imalat yöntemlerinin ortaya çıkması ve gelişmesi zaruri olmuştur. İşin fizyolojisi gereği metal eklemeli imalatın gelişmesi plastik eklemeli imalat yöntemler kadar yüksek ivmeli olamamaktadır. Bunun sebebi hala metal eklemeli imalat yöntemlerinde çözülememiş ve üzerinde çalışılan

belirsizliklerin olmasıdır. Çözümlenemeyen bu açık kapılar özellikle son yıllarda araştırmacıların metal eklemeli imalat konusuna daha fazla odaklanmasına ve ilgi duymasına sebep olmuştur.

Metal eklemeli imalat yöntemleri genel eklemeli imalat yöntemlerinde de olduğu gibi farklı açılardan ele alınarak sınıflandırılabilir. Kullanılan ham malzeme yapısına göre sınıflandırma yapıldığında metal eklemeli imalat yöntemlerini dört başlık altında incelemek mümkündür. Bu ham malzemeler sıvı, filament, toz ve plaka malzemelerdir (Bkz. Çizelge 2.2.). 2020 yıllarında yapılan araştırmalara göre sektörde en çok kullanılan metal eklemeli imalat yöntemleri en çok kullanılandan en az kullanılan yönteme doğru sıralanır ise bunlar toz yatağında ergitme (TYE), doğrudan enerji biriktirme (ing. DED), malzeme/bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, laminasyon (ing. LOM) ve fotopolimerizasyondur [13, 16]. Şekil 2.2.'de kullanım oranına göre metal eklemeli imalat yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Kullanım oranına göre metal eklemeli imalat yöntemleri [16]

2.3.1. Malzeme ekstrüzyonu

3B modeli oluşturulan parçanın, metal katkılı polimer filament yapısına sahip ham malzemenin ergitilerek kullanılması ile gerçekleştirilen üretim yöntemidir.. İşlem sonrasında yıkama ve sinterleme ardıl işlemleri gerçekleştirilerek tam yoğunluğa sahip metal parça üretimi gerçekleştirilir. Ham malzeme olarak ince bakır, alüminyum, paslanmaz çelik gibi toz parçacıkları içeren filamentler kullanılır [13].

Hassasiyetinin düşük olması ve karmaşık yapıya sahip parçaların üretim zorluğu dezavantajlarındandır. Avantajları ise oldukça yavaş bir üretim yöntemi olmasına rağmen kolay bir yöntem oluşu, düşük maliyete sahip olması ve bakım ihtiyacının oldukça az olması sayılabilir [13].

2.3.2. Doğrudan enerji biriktirme

Doğrudan enerji biriktirme, robotik kol vasıtası ile ana parça üzerine tel ya da toz malzemenin ergitilip istenilen formun oluşturulmasını sağlayan üretim yöntemidir. İki farklı enerji kullanımından bahsetmek mümkündür. Bunlar soğuk püskürtme ve termal enerjidir.
Doğrudan enerji biriktirme yöntemleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan enerji termal enerjidir. Bu yöntemde lazer ışını, elektron demeti, ark ya da plazma enerji kaynağı olarak kullanılır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları (ing. EBAM) (Electron Beam Additive Manufacturing), WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) LENS (Laser-Engineered Net Shaping)'dir [14].

Doğrudan enerji biriktirme ile üretim yöntemlerinin avantajlarına bakıldığında soğuk püskürtme metodunda faz değişimi meydana gelmez, yüksek üretim hızı ile oldukça büyük boyutlarda parçaların imal edilmesi mümkündür. Oksidasyon gerçekleşme ihtimali düşüktür. Termal direkt enerji ile yığma yöntemlerine bakıldığında karmaşık parçalar, büyük boyutlu parçaların bu metotla üretilmesi, özellikle tadilat ihtiyacı olan parçalara kolaylıkla tadilat yapılabilmesi bu yöntemler ile mümkündür. Uygulanabilir malzeme yelpazesinin darlığı, ardıl işlem ihtiyacının oluşması dezavantajları arasında sayılabilir [16].

2.3.3. Malzeme püskürtme ve bağlayıcı püskürtme

Malzeme püskürtme yöntemi aynı zamanda nano parçacık püskürtme yöntemi olarak da tanımlanır. Bu yöntemde içerisinde metal nano parçacıklar bulunduran sıvı malzemeler kullanılır. Oluşturulmak istenilen geometri konturu bu sıvı karışımının püskürtülmesi ve UV ışını yardımıyla kürlenmesi ile oluşturulur. Malzeme püskürtme yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü ve hassasiyeti iyi, karmaşık geometrili parçaların üretimi sağlanabilir.
Bağlayıcı püskürtme ise hazne içerisinde bulanan toz malzemelerin üzerine bağlayıcı püskürtülmesi ile gerçekleştirilen yöntemdir. Üç boyutlu model geometrisinden gelen verilere göre her bir katman toz üzerine bağlayıcı püskürtülerek oluşturulur. Bir katman

oluşumu tamamlandıktan sonra hazne içerisindeki üretim platformu aşağıya iner ve hazneye toz serme kolu vasıtası ile yeni toz serilir ve diğer katman için bağlayıcı püskürtülür. Bu işlem son katman oluşturulana kadar devam eder. Sonrasında kürleme ya da sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemde yüksek ısı girdisi olmadığı için çarpılma ve burulma gibi hatalarla pek karşılaşılmaz. Ancak diğer yöntemlerine kıyasla üretilen parçanın mekanik özellikleri zayıftır. Bu yöntemle paslanmaz çelik, Co-Cr alaşımları, bakır gibi malzemeler kullanılabilmektedir [16, 17].

2.3.4. Tabaka laminasyonu

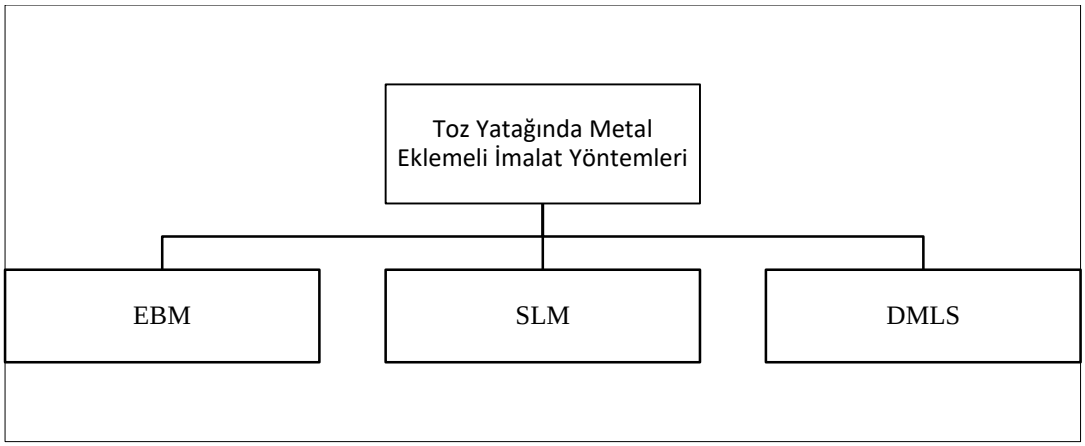
Tabaka laminasyon yöntemi metal sac levhaların ham malzeme olarak kullanıldığı eklemeli imalat yöntemlerine verilen genel addır. Bu yöntemde ham malzeme olan metal sac plakalar üst üste eklenir ve bir enerji kaynağı vasıtası ile katmanların birbirine bağlanması sağlanır. Bu metotta kullanılan enerji kaynakları genellikle ultrasonik dalgalar ve lazer demetleridir. Ultrasonik eklemeli imalat ya da ultrasonik bütünleştirme adı verilen üretim yönteminde oda sıcaklığındaki ortamda üst üste biriktirilmiş önceden istenilen geometrilerde kesilmiş metal plakaların üzerine basınç ve yüksek frekanslı ultrasonik titreşim uygulanarak plakaların birbirine basınç ve sürtünme sonrasında açığa çıkan ısı vasıtası ile bağlanması sağlanır. Bu işlem sonrasında parlatma ya da zımparalama gibi son işlemler uygulanarak parça son haline getirilir [16, 17].

2.3.5. Toz yatağında ergitme

Günümüzde en sık tercih edilen metal eklemeli imalat yöntemlerin başında toz yatağında ergitme yöntemi gelmektedir. Termal enerji kaynağı olarak lazer ışın demeti ve elektron ışın demeti kullanılan yöntemler olarak iki alt başlık altında incelenmektedir. Bir hazne içerisinde bulunan metal toz partiküllerine üç boyutlu model verisindeki konturu oluşturacak şekilde lazer ya da elektron demeti göndererek ışınların geldiği bölgede ergimenin gerçekleştirildiği ve bu işlemin her bir katmanda tekrarlanması ile parçanın elde edilmesinin sağlandığı yöntemlerin genel adıdır. Her bir katman oluşturulduktan sonra üretim tablası aşağı iner, toz serici yardımı ile boş kalan hacim toz ile doldurulur ve önceki katman ergitilir veya sinterlenir. Paslanmaz çelik, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, bronz, süper alaşımlar, metal-seramik kompozit malzemeleri bu yöntemde kullanılır. Destek yapıları sadece ısı atımı için gereklidir. Isı atımı haricinde özellikle lazer ergitmeli yöntemlerde

destek yapısına ihtiyaç duyulmamaktadır. Öte yandan yazıcıdan çıkan parçalarda atılamayan ısı sebebi ile parça geometrisinin bozulması, yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşması, boyutsal olarak üretim alanı yetersizliği bu üretim yöntemlerinin genel dezavantajlarından sayılabilir [16].

Çizelge 2.3. Toz yatağında metal eklemeli imalat yöntemleri [16].



Toz yatağında metal eklemeli imalat yöntemlerinden en sık kullanılanları elektron demeti ile ergitme (ing. EBM), seçici lazer ile ergitme (ing. SLM) ve doğrudan lazer ile metal sinterleme (ing. DMLS)'dir (Bkz. Çizelge 2.3.). Lazer ışını kullanan yöntemlere bakıldığında ergime gerçekleştirilen SLM yöntemi ile üretilen parçalar, sinterleme gerçekleştiren doğrudan lazer ile metal sinterleme DMLS yöntemi ile üretilen parçalara göre neredeyse tam yoğunlukta yapı olup yüzeyleri daha pürüzsüzdür. DMLS yönteminde ısı girdisi ve ergime oranı daha düşük olduğu için boşlukların gözlenme ihtimali daha yüksektir [16].

SLM yönteminde lazer demetinin iletimi ve odaklandırılması için mercekler, aynalar kullanılır. Üretim esnasında oluşan yüksek ısı sebebi ile metal tozlarında oksidasyon oluşmasını engellemek için üretim çemberinde argon, nitrojen gibi inert gazlar kullanılır. İnert gaz olarak üretimde reaktif malzeme kullanılıyorsa argon gazı, reaktif olmayan malzeme kullanılıyorsa nitrojen gazı kullanılır [17].

EBM yüksek hıza sahip elektron demetinin lensler yardımı ile toz üzerine odaklanıp ergitme gerçekleştirmesi ile üretim meydana gelir. EBM'de üretim esnasında tüm toz yapısı önden taranarak ısıtılırken ortam sıcaklığı 700-900 ºC mertebelerine getirilir. Ön ısıtma ile termal

gradyan azaltılırken tozların önden taranması parça üzerinde kalıntı gerilme oluşmasını engeller. Bu sayede ısıl işlem ihtiyacı azalır. EBM yönteminde üretim vakum altında gerçekleştirilir. Vakum ortamı konveksiyonu, termal gradyanı azaltır. Aynı zamanda elektronların yüksek enerjisi dolayısıyla oluşan saçılımı ve oluşabilecek oksidasyonu önler [16-18].

Günümüzde bakıldığında SLM'nin EBM'ye göre daha çok tercih edildiği görülmektedir. Buradaki en büyük etkenler EBM yazıcılarının pahalı olması, EBM'de üretim hacminin SLM'ye göre daha küçük olması ve üretilen parçaların hassasiyetlerinin daha kötü olmasıdır [18].

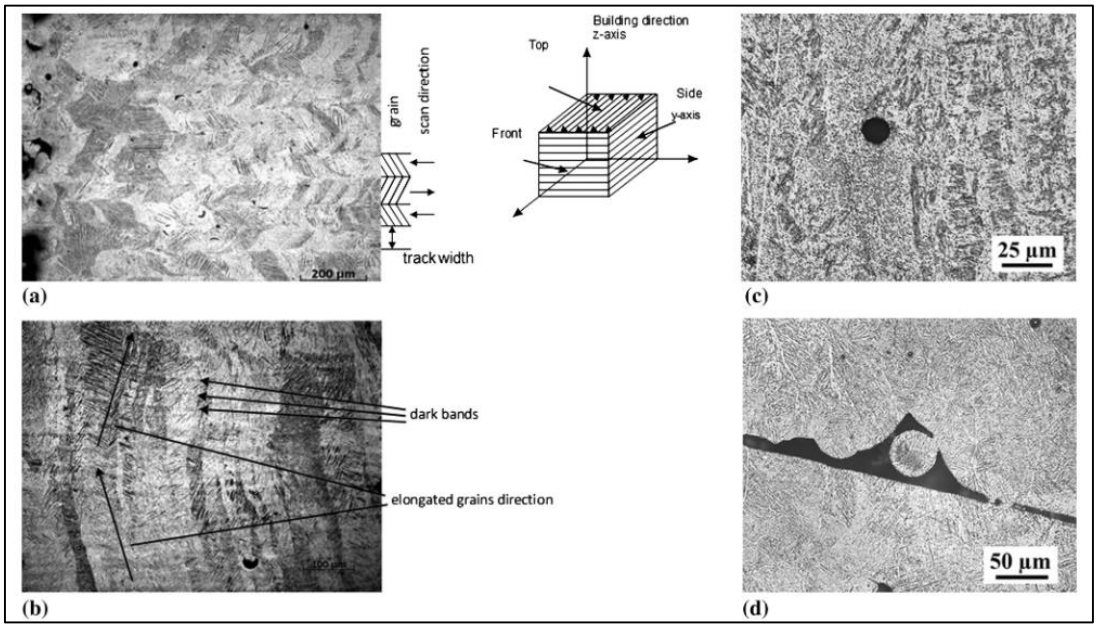
SLM ve EBM'de yüzey pürüzlülüğü, katman kalınlığı ve hassasiyet gibi başlıklar altında kıyaslanacak olursa yaklaşık olarak katman kalınlıkları SLM'de 10-100 μm, EBM'de 50-200 μm'dur. Yüzey pürüzlülükleri ise yaklaşık olarak SLM'de 5-15 μm ve EBM'de 25-35 μm mertebelerindedir. Geometrik toleranslar ise SLM'de ±0.05-0.1 mm, EBM'de ±0.2 mm olmaktadır [19].

2.3.6. TYİ yöntemlerinde mikro yapı ve mekanik özellikler

Toz yatağında gerçekleştirilen eklemeli imalat yöntemlerinde mikro yapıyı etkileyen faktörler sıcaklık gradyanı ve arayüz katılaşma hızıdır. Sıcaklık gradyanı yüksek ve arayüz hızı küçükse sütun tanecik yapısı oluşur. Sıcaklık gradyanı düşük ve arayüz hızı büyükse eş eksenli tanecik yapısı oluşur. Toz yatağında ergitme ile gerçekleştirilen eklemeli imalat yöntemlerinde tarama hızı ve lazer ya da elektron kaynağı gücü de sıcaklık gradyanı ve arayüz hızı parametrelerini etkiler [17].

Eklemeli imalat yöntemlerinde bağlayıcı yapısı mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Eİ yöntemlerinde dört çeşit bağlayıcı mekanizmasından bahsetmek mümkündür. Bunlar katı hal sinterleme, kimyasal yapıştırıcılar, kısmi ergime ve tam ergimedir. TYE yöntemlerinde elastik modülü, akma ve kopma dayanımında anizotropik özellik göstermektedir. Oluşan anizotropik yapının sebebi yetersiz ergimedir. Bu sebeple üretim eksenindeki özellikler tarama yönündeki özelliklerden daha zayıf olmaktadır. Toz yatağında ergitme yöntemlerinde parçaları anizotropik yapan bir diğer unsur boşluk yapılarıdır. Toz yatağında gerçekleştirilen eklemeli imalat yöntemlerinde boşluk yapıları iki şekilde oluşur. İlki toz parçacıkları arasına

sıkışmış gaz sebebiyle, ikincisi ise tam ergime gerçekleşememesi sebebiyle oluşur (Bkz. Resim 2.1.) [17].



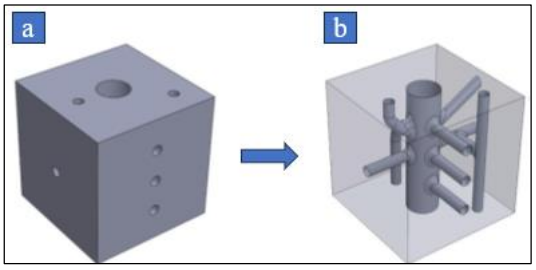
Resim 2.1. SLM yöntemi ile üretilmiş Ti64 bir parçanın çeşitli bölgelerindeki mikro yapıları (a) Üstten görünüm (b) Yandan görünüm (c) Hapsolmuş gaz dolayısıyla oluşmuş gözenek yapısı (d) Yetersiz ergime kaynaklı oluşan gözenek yapısı [17]

2.4. Metal Eklemeli İmalata Yönelik Tasarım

Eklemeli imalat yöntemlerinin hepsi için farklı tasarım yaklaşımları söz konusudur. Bu yaklaşımlar yöntemden yönteme, malzemeden malzemeye farklılık göstermektedir. Eklemeli imalat için tasarım yapılmasında kullanılan kriterler aşağıda listelenmiştir [7]:

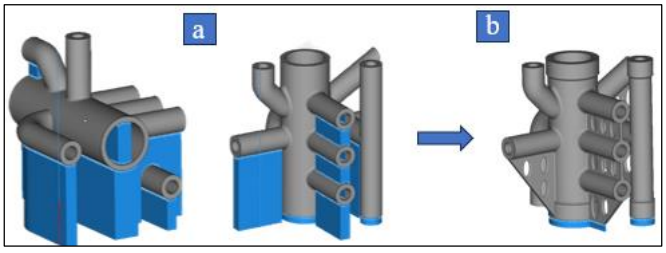
- Tasarımlar fonksiyonelliği bozmadan minimum miktarda parça ve malzeme ile gerçekleştirilmelidir (Bkz. Şekil 2.3.).
- Destek yapılarının sayısının azaltılması ya da hiç kullanılmaması amaçlanmalıdır. Destek yapıların azaltılması kullanılan malzeme maliyetini, üretim süresini, temizlemek için kullanılan işçiliği ve destek yapıları temizlenirken parçada oluşabilecek herhangi bir deformasyonun oluşma riskini azaltacaktır.
- Parçanın mekanik dayanımı, kritik yüzeyleri vb. unsurlarını belirleyip en uygun üretim yönünün belirlenmesi gerekmektedir.
- Özellikle destek yapısı ihtiyacı söz konusu ise yapılabiliyor ise destek yapısı ince bir duvar olacak şekilde parçaya entegre bir yapı olarak tasarlanabilir.

Şekil 2.3.'de tasarım kriterleri olarak pozisyonları ve ölçüleri belli kanallar blok yapı içerisinde olacak şekilde tasarımı gerçekleştirilmiş bir yapı yer almaktadır. Sonrasında yapı eklemeli imalata yönelik tasarım kriterlerine uyumlu hale getirme amaçlı kanalların etrafına kabuk yapı oluşturacak şekilde minimum malzeme kullanılacak hale getirilmiştir [7].



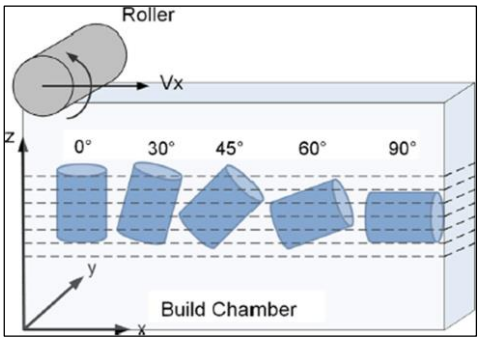
Şekil 2.3. (a) Maksimum malzeme ile tasarım (b) Eklemeli imalat için tasarım kriterlerinden minimum malzeme ile tasarım [7]

Şekil 2.4.'de ise iki farklı üretim konumlandırması görülmektedir. Kritik yapı ortada yer alan büyük borunun içi olduğu için dikey konumlandırmada orta borunun içine destek yapı ihtiyacı olmaması dolayısıyla tercih sebebidir. Üretim için gerekli destek yapıları parça tasarımına ince duvar olarak eklenerek destek yapılarını temizleme işleminin de önüne geçilecek tasarım gerçekleştirilmesi mümkündür.



Şekil 2.4. (a) Yatay ve dikey eksende üretilen parçalar (b) Dikey eksende destek yapısız üretilen parça [7, 20]

Üretim yönü eklemeli imalat yöntemi ile üretilecek parçalar için en kritik faktörlerden biridir. Eklemeli imalat yöntemleri anizotropik olduğundan üretim yönü değiştikçe parçanın mekanik dayanımının yüksek olduğu yerler, daha hassas yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyleri değişmektedir. Şekil 2.5.'da aynı parçanın farklı açılarda üretilmesi gösterilmiştir. Her birinin mekanik açıdan dayanımının yüksek olduğu ya da yüzey pürüzlülüğünün en hassas olduğu yüzey farklıdır [7, 20].



Şekil 2.5. Parçanın üretim tablası içerisinde farklı açılarda yerleşimi [20]

Destek yapıları

Metal eklemeli imalat yöntemlerinde üretim esnasında meydana gelen yüksek ısının atılması için destek yapısı ihtiyacı olmaktadır. Aksi taktirde yüksek ısı dolayısıyla parçalarda yüzey bozulmaları meydana gelebilmektedir. Sadece üretim esnasında kullanılan destek yapıları üretim sonrasında temizlenerek parçadan uzaklaştırılmaktadır [7, 18].

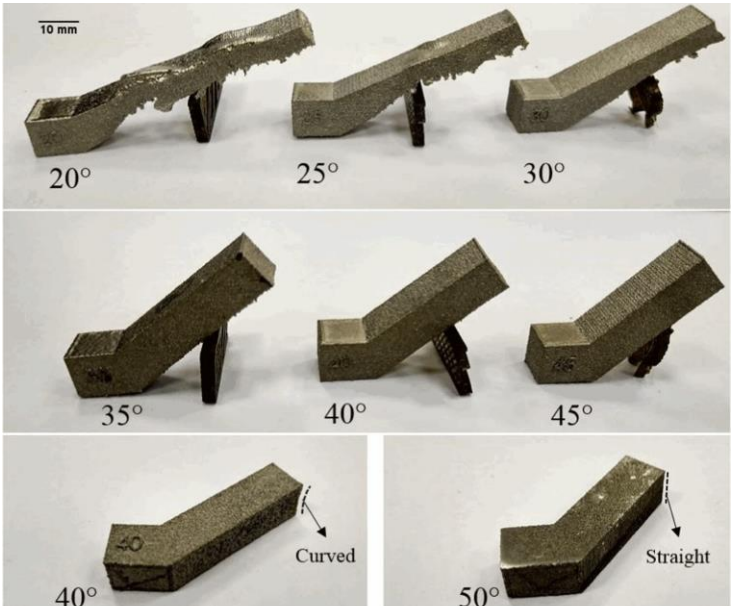
Destek yapılarının parçalara sağladığı faydalar şu şekildedir [7]:

- Üretim platformuna parçayı bağlamaktadır.
- Toz serim esnasında parçanın üretim platformundan ayrılmasını engellemektedir.
- Fazla ısının atılmasını sağlamaktadır.
- Parçada üretim esnasında sarkmayı engellemektedir.
- Burulma gibi üretimde oluşabilecek hataları engellemektedir.
- Ergiyik havuzunun toz yatağının içine akmasını engellemektedir.

Çok çeşitli destek yapısı geometrileri söz konusudur. Bunlardan en çok tercih edilenler katı, duvar, hücre yapısı, blok, nokta, çizgi, konik, ağaç destek yapılarıdır.
Destek yapılarının avantajlarının yanında birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Destek yapıları üretim sonrasında kullanılmamakla birlikte parçaların üretim sürelerini ve üretim esnasında kullanılan malzeme miktarını artırması ve temizleme esnasında parçaya verdiği zarar destek yapılarının dezavantajlarındandır [7, 8].

Genellikle yatay eksene göre 45° altındaki açılarda destek yapısı gibi ısı transferini sağlayan ve parçayı üretim yönünde destekleyen yapılara ihtiyaç duyulmaktadır. Yaklaşık 45° üstü açılarda destek yapısına ihtiyaç duyulmadığı gibi o bölgedeki yüzey pürüzlülüğü de

başarılıdır [7]. Şekil 2.6.'da farklı açılarda EBM yöntemi ile destek yapısız olarak üretilmiş numuneler yer almaktadır. Ameen ve arkadaşları (2019) çalışmalarında açı azaldıkça kusurların arttığını gözlemlemiştir. 50° açı EBM yönteminde desteksiz üretim limiti olarak belirlemişlerdir. Tasarımda 50° den küçük 30°den büyük açılarda üretilen parçanın bozulduğu ve koptuğu, alt yüzeyinde kavis oluştuğunu, 30° ve altındaki açılarda ise cüruf ve kenarlarda stabil olmayan ergime havuzu oluşumunu gözlemlemişlerdir [6].



Şekil 2.6. Farklı açılara sahip parçaların destek yapısı kullanılmadan EBM yöntemi ile üretilmesi [6]

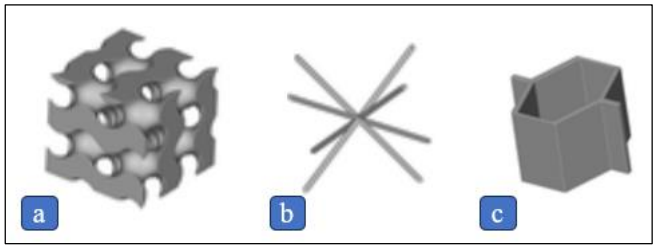
Öte yandan uzun ve yatay yüzeyler katı destek yapısı gibi kuvvetli destek yapılarının kullanımına ihtiyaç duymaktadır.

Delik yapıları ise eklemeli imalata yönelik tasarım için bir diğer önemli unsurdur. Yapılan literatür araştırmalarındaki genel kanı destek yapısı kullanılmadan silindirik delikler üretildiğinde çap ölçüsü arttıkça silindirikliğin bozduğuna yöneliktir. Ayrıca destek yapısız delik üretimlerinde çap değeri arttıkça yüzeyde bozulmalar gözlenmektedir [3]. Ameen ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada 1 mm çap değerinden 30 mm çap değerine kadar 30 farklı çap değerinde deliklerin bulunduğu test plakaları üretilmiştir. Test plakasının kalınlıkları, 5 mm, 10 mm ve 15 mm olacak şekilde 3 farklı ölçüde üretilmiştir. EBM yöntemi ve Ti6Al4V malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde çap değeri 18 mm ve üzerindeki deliklerde sarkma problemini gözlemişlerdir. Parça kalınlığı ve çap değeri arttıkça silindiriklik bozulma eğiliminde olmaktadır. Destek yapısı kullanıldığı taktirde fark

edilir ölçüde sarkma davranışında iyileşmeler meydana gelmektedir. 30 mm çaplı parça üzerinde bölgesel inceleme yapıldığında parça çapının 1/3 oranına tekabül eden 10 mm genişliğe destek yapısı atıldığında en ideal geometrik doğruluk, malzeme kullanımı gibi faktörlerin sağlandığını gözlemlemişler [3].

Kafes yapılar

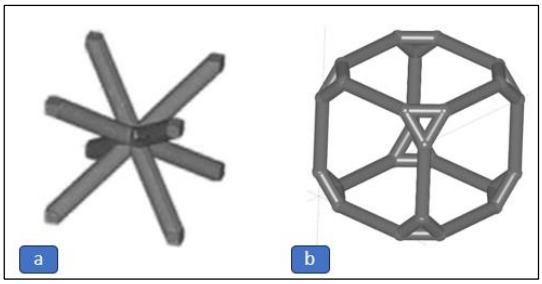
Eİ avantajlarının başında karmaşık geometrili yapıların üretimi gelmektedir. Bu konuda en iyi örneklerden biri kafes yapılardır. Kafes yapılar literatürde hücresel katı yapılar, hücresel metaller, hücresel köpük yapıları, gözenekli yapılar ya da iskele yapılar olarak bilinir [21]. Bu yapıların kullanılması parçalara birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Bunlardan bazıları hafif ama mukavemeti yüksek yapıların elde edilmesi, yüzey alanı fazlalığı sebebi ile ısı transferinde avantaj sağladığından ısı değiştiricilerin tasarımında kullanılması, insan dokusuna uygun formda üretilebilmesi sebebi ile biyomedikal alanda kullanılabilmesi ve benzeridir [21-23]. Kafes yapılar Eİ yöntemlerine kadar bazı konvansiyonel yöntemler ile üretilebilmekteydi. Bunlardan bazıları kıvırma yöntemi [22], hassas döküm yöntemi [24]'dür. Bu yöntemlerin kullanımı bazı dezavantajları içermektedir. Bunlar üretim süresinin uzun olması, fikstür ile üretim ihtiyacı, döküm yöntemi hazırlığının maliyetli olması sayılabilir. Bu noktada Eİ yöntemleri kullanılarak kafes yapıların üretilebilirliği hem maliyet etkin hem de zaman etkin bir çözüm yöntemi olmuştur. Üç temel kafes yapıdan söz etmek mümkündür. Bunlar: yüzey tabanlı, kiriş tabanlı ve düzlemsel tabanlı kafes yapılarıdır (Bkz. Resim 2.2.) [25].



Resim 2.2. (a) Yüzey tabanlı kafes yapısı (b) Kiriş tabanlı kafes yapısı (c) Düzlemsel tabanlı kafes yapısı [26]

Kiriş yapısı çubuğa benzer yapıların periyodik birleşmesinden oluşmaktadır. Düzlem tabanlı kafes sistemleri iki boyutlu yüzeylerin tekrar etmesi ile oluşurken yüzey tabanlı sistemler fonksiyonel tabanlı sistemlerdir. Yüzey tabanlı kafes yapılarında bir ya da daha fazla

parametre değişimi ile kafes yapısının şekli, yoğunluğu gibi parametreleri kontrol altına alınabilmektedir [25]. BCC (ing. Body centered cubic) kafes yapıları bir atomun etrafına 8 kenarın oluşturulmasından meydana gelir ve kiriş yapısı tabanlı bir kafes yapısı çeşididir. Truncated kübik kafes yapısı ise kübik yapıya sahip olan kafes yapılarından biridir. Resim 2.3.'de BCC ve Truncated kübik kafes yapıları gösterilmektedir.



Resim 2.3. (a) BCC kafes yapısı [27] (b) Truncated kübik kafes yapısı [28]

Kafes yapıları farklı yaklaşımlar ile tasarımlara uyarlanabilir. Parçanın tamamı kafes yapısı olarak tasarlanabilir, dış yapısı kabuk olarak kalacak şekilde sadece parçanın iç kısmı kafes yapısı olarak tasarlanabilir, parçanın bir kısmı katı diğer kısmı kafes yapısı olacak şekilde tasarlanabilir ya da değişken kafes yapılarından oluşacak şekilde parçalar tasarlanabilir [7].

Kalıntı gerilimler

Katı malzeme üzerinde gerilim oluşturan unsurun kaldırıldıktan sonra parça üzerinde kalan artık gerilime kalıntı gerilim denir. Eklemeli imalat yöntemlerinde oluşan sıcaklık farkı ve üretim esnasında meydana gelen yüksek ve düşük sıcaklıklar arasındaki geçiş sebebi ile kalıntı gerilimler oluşmaktadır. Kalıntı gerilimlerin giderilebilmesi için üretim cihazı içi ısıtılmalı, üretim tablası ön ısıtmaya tabi tutulmalı, tasarımlarda ani kalınlık ve kesit alanı değişimlerinden kaçınılmalıdır. Tam bu noktada EBM yönteminde üretim tablasında ön ısıtma yapılması ve üretim cihazının üretim öncesi ısıtılması EBM yöntemini SLM yönteminden avantajlı kılmaktadır [7].

Topoloji optimizasyonu

Eklemeli imalat yöntemlerinin en büyük avantajlarından biri hafif parçaların üretilmesidir. Konvansiyonel üretim yöntemlerinde çoğu zaman üzerinde yük akışı olmamasına rağmen

parça üzerindeki bazı bölgeler üretim esnasında parçadan uzaklaştırılamadığından parça birlikte üretilmektedir. Konvansiyonel metotların aksine eklemeli imalat yöntemlerinde karmaşık yapıların üretimi mümkündür. Topoloji optimizasyonu yazılımları ile beraber parça üzerinde yük taşımayan bölgeler parçadan uzaklaştırılarak karmaşık ancak organik yapıya sahip karmaşık geometrilerin üretimi eklemeli imalat ile mümkün olmaktadır [7].

2.5. Metal Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Sarkma Problemi

Eklemeli imalat yöntemlerinde sıklıkla karşılaşılan problemlerin başında sarkma problemi gelmektedir. Bu problemin genel sebebi üretim esnasında oluşan yüksek ısı ve soğuma mekanizmasıdır. Parça üzerinde oluşan yüksek ısı atılamaz ise toz yatağına doğru aşağı yönde cüruf oluşumu, yüzey bozuklukları, bükülme, çarpılma, merdiven etkisi gibi kusurların oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Ayrıca yüksek yüzey pürüzlülüğü meydana gelmektedir [2]. Isının parça üzerinden atılması için bazı yaklaşımlar söz konusudur. Bunların başında destek yapılarının kullanımı gelmektedir. Destek yapıları polimer esaslı malzeme kullanan eklemeli imalat yöntemlerinde olan parça ağırlığını taşıma işlevinin aksine TYE teknolojilerinde parça üzerinde oluşan yüksek ısıyı uzaklaştırmak amacı ile kullanılmaktadır. Destek yapıları sayesinde özellikle yüksek ısı meydana gelen üretim yöntemlerinde parça üzerindeki fazla ısı üretim tablasına doğru atılır ve bu sayede parça üzerinde deformasyona sebebiyet verecek ısıdan kaçınılmış olur [2]. Destek yapılarının bir diğer avantajı üretim esnasında hareketli olan toz sericinin, parçanın yerini değiştirmemesini ve olası tahribatını engellemesidir [29].

Destek yapılarının avantaj sağladığı kadar dezavantaja neden olduğu durumlar da söz konusudur. Destek yapıları sadece üretim esnasında kullanılan sonrasında parçadan ayrılarak atılan yapılardır. Öte yandan destek yapılarının parçadan ayrılması, temizlenmesi hem çaba gerektirmekte ve zaman almakta hem de kullanılmayacak yapıların üretilmesi sebebi ile gereksiz malzeme sarfiyatının gerçekleştirilmesine neden olmaktadır [2, 8, 29]. Hatta bazı karmaşık yapılarda destek yapılarının temizlenmesi imkansız olmaktadır [8].

Destek yapıları, parça üzerinden temizlenirken sıklıkla parçalara zarar verilmektedir ve destek yapıları temizlendikten sonra yüzeyde oluşan deformasyonlar sebebi ile yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. TYE üretim yöntemleri kullanılarak üretilen parçalarda yüksek olan yüzey pürüzlülükleri destek yapılarının temizlenmesi ile destek yapısı kullanılan

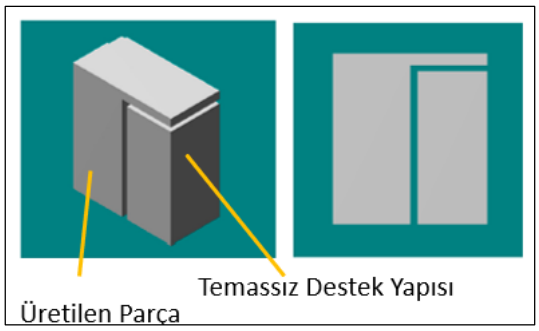
bölgelerde daha da artmaktadır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü parça üzerinde yüksek gerilim konsantrasyon bölgeleri oluşturmaktadır. Bu durum parçanın yorulma ömrünü kısaltmaktadır. Sarkma bölgelerinde yüksek ısınma ve soğuma döngülerinden dolayı meydana gelen çarpılma, merdiven etkisi, cüruf oluşumu gibi problemler de yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Bu durum parçanın yorulma ömrünü de olumsuz yönde etkilemektedir [2].

Öte yandan sarkma, yüzey pürüzlülüğünün artması, çarpılma, merdiven etkisi gibi problemlerin oluşmasındaki diğer sebep tasarım parametreleridir. Parçanın üretim cihazı içerisinde konumlandırılması, üretim tablası ile yaptığı açı, geometrisi gibi faktörler de doğru belirlenmediği taktirde yüzey hataları oluşmaktadır [20, 30]. Sarkma yaşanma ihtimali olan bölgeler üretim oryantasyonunun doğru ayarlanmasıyla ve eklemeli imalat için uygun tasarım yaklaşımlarının gerçekleştirilmesi ile minimum ya da sıfır deformasyonlu olarak üretilebilir [31].

Metal Eİ parçaları için sarkma problemini engelleyen bir diğer yöntem hücre yapılarının parça tasarımı içerisinde kullanılmasıdır. Hücre yapıları ısı transferine yardımcı olduğundan parça tasarımına eklendiğinde parçadaki yüzey bozulmasının azalmasına fayda sağlamaktadır. Yan ve arkadaşları (2012), bu konuda gerçekleştirdikleri bir çalışmada gyroid hücre yapısının SLM metodu ile kendinden destekli olarak üretilebildiğini gözlemişlerdir. Gyroid hücre boyutu 2- 8 mm arasında olduğu taktirde destek yapısı kullanılmadan yüzey hatası olmayan bir üretim gerçekleştirilebildiğini çalışmalarında deneyimlemişlerdir. Burada kritik olan konu hücre yapısı boyutu küçülüp hücre sayısı artırıldıkça toz tahliyesinin zorlaşmasıdır. Öte yandan hücre yapısı sayısı azaltılıp, kirişler daha güçlü ve uzun oldukça sarkma problemi yaşayan parça uzunluğu artmaktadır. Hücre boyutu 9 mm ve üzeri olan yapılarda kıvrılma gibi yüzey problemleri ile karşılaşılmıştır [32].

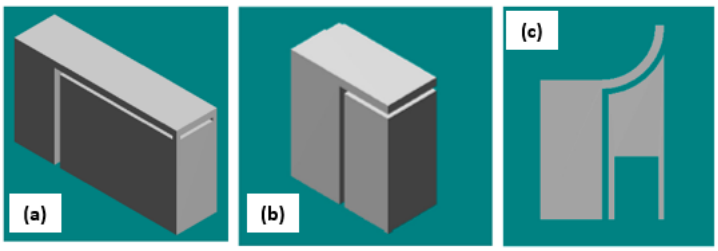
Destek yapılarının parça yüzeyini bozması, üretim süresini artırması, gereksiz malzeme kullanımı dolayısıyla üretim maliyetini artırması, temizleme zorluğu gibi faktörler bu konuda çalışma yapan kişileri yeni bir yöntem arayışına itmiştir. Söz konusu tez çalışmasında da EBM yöntemi ile minimum boşluğa sahip döner yapı üretimi gerçekleştirilmesi amaçlanırken üretim esnasında oluşan ısının uzaklaştırılması için temaslı destek yapısı harici çözümler araştırılmıştır. Bu kapsamda literatürde son yıllarda araştırmacıların ilgisini çeken temassız destek yapıları kavramı ön plana çıkmaktadır.

Temassız destek yapıları metal eklemeli imalat yöntemlerinde üretim sırasında ortaya çıkan ısının parça üzerinden uzaklaştırılması için parçaya temas etmeden ısı transferini sağlayan yapılardır. Bu yapılar üretim esnasında yüksek sıcaklık gradyanı oluşumunu engelleme amacı ile kullanılırlar [2]. Temassız destek yapısı Şekil 2.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Temassız destek yapısı kullanılarak üretilen parçanın CAD modeli [8]

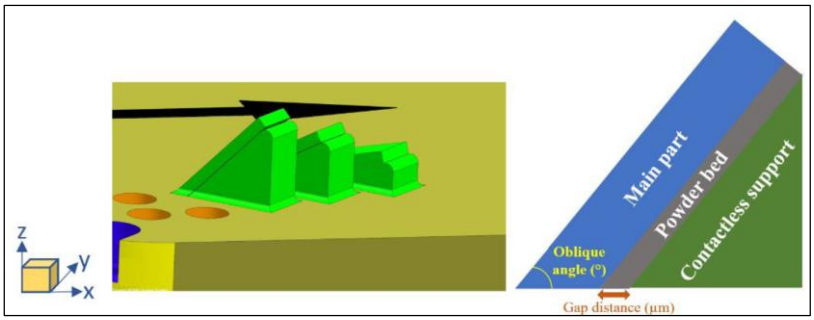
Cooper ve arkadaşları (2017) EBM yöntemi ve Ti6Al4V malzeme kullanarak destek yapısı kullanılmadan, konvansiyonel destek yapısı kullanarak ve temassız destek yapısı kullanılarak numuneler üretip parçalardaki bozulmaları incelemiştir [8]. Çalışmaların gerçekleştirildiği parçaların CAD modelleri Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. (a) Temassız destek yapılı uzun parça (b) Temassız destek yapılı kısa parça (c) Temassız destek yapılı dış bükey parça [8]

Gerçekleştirilen bu çalışmada temassız destek yapısı ile üretilecek parça arasındaki mesafe değişiminin ısı transferi ve yüzey bozulmaları açısından etkisi araştırılmıştır. 0,63 mm boşluk miktarında denedikleri numuneler içerisinde ısı aktarımının en düzgün olduğu, parçada bozulmanın minimum olduğu optimum boşluk değeri olduğu kanısına varılmıştır. Öte yandan çalışmalarında temassız destek yapısı kalınlığının ısı transferine ve parça deformasyonuna etkisi, dış bükey ve iç bükey parçaların temassız destek yapısı ile üretilmesi ve temassız destek yapısı uzunluğunun üretim esnasında oluşan deformasyonlara etkisi araştırılmıştır.

Temassız destek yapılarının üzerine Çelik ve arkadaşları (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada SLM yöntemini ve CoCrMo malzemesini kullanarak parçanın platform ile arasındaki açıyı ve temassız destek yapısı ile parça arasındaki mesafeyi değiştirerek bu parametrelerin değişimlerinin üretilen parça üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmaların gerçekleştirildiği parçaların konsept modeli Şekil 2.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Temassız destek yapısı kullanılan parça tasarımı [2]

Söz konusu çalışmada temassız destek yapısı ile parça arasındaki boşluk miktarı azaldıkça ısı yayılımının arttığı gözlemlenmiştir. Minimum 25° ve 30° açı değerine, 250 µm ve 300 µm boşluk miktarına sahip parçalarda temassız desteğin parçalara yapışmadığı ve yüzeyin çok bozulmadığı gözlemlenmiştir. Açının etkisi detaylı incelendiğinde ise parçanın üretim platformu ile arasındaki açı miktarı azaldıkça yüzeyde bozulmalar meydana gelip yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından desteksiz ve temassız destekli üretimler kıyaslandığında temassız destekli yapılar ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle küçük açı ile üretilen parçalarda temassız destek yapıları üretime dahil edildiğinde desteksiz üretimlere göre yüzey pürüzlülükleri ve yüzey kusurları iyileşmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tasarımları gerçekleştirilen metalik döner yapı parçaları, kullanılan üretim alt yapıları ve ölçüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Ti6Al4V Ham Malzeme Özellikleri

Bu tez çalışmasına konu olan metalik döner yapılar için hem yüksek mukavemet/ ağırlık oranına sahip olması sebebi ile hem de eklemeli imalat alt yapılarında üretimi daha kolay olması sebebi ile Ti6Al4V malzeme tercih edilmiştir. Kullanılan tozlar küresel geometriye sahip olup boyutları 45-105 μm'dir. Ortalama gözeneklilik %0,15, gözenek yoğunluğu 1,6±0,9 mm-2'dir [33].

Çizelge 3.1. Kullanılan Ti6Al4V tozu özellikleri [34]

Üretim Yönü	σ_Y (MPa)	σ_{uts} (MPa)	Süneklik (%)
Boylamasına	890±5	970	12±1,2
Enlemesine	880 ±10	950±5	14±1,2

3.2. Kullanılan Tasarım, Üretim ve Ölçüm Altyapıları

Tasarım, üretim ve analiz programları

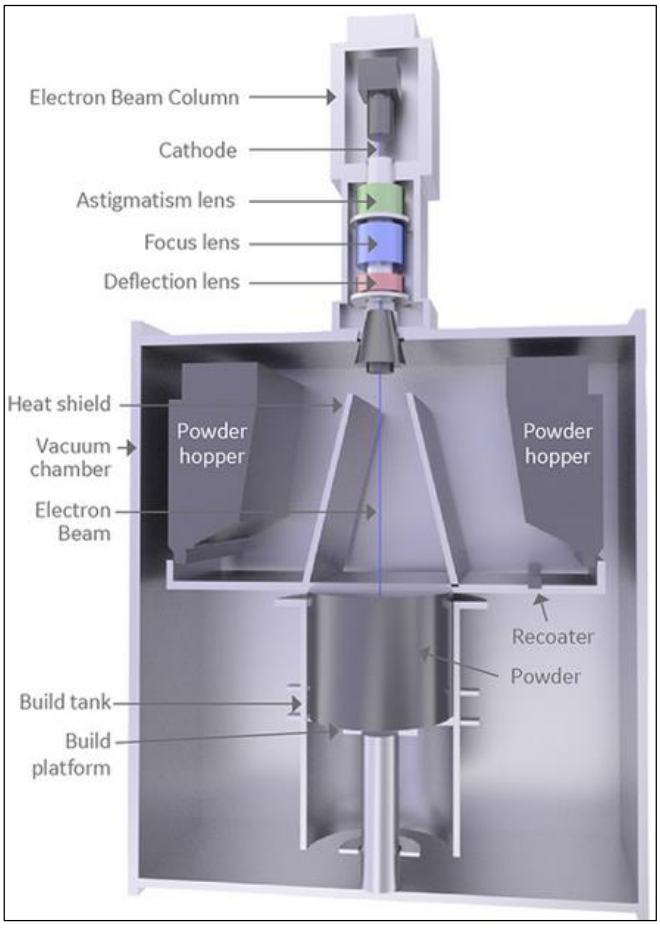
Tasarımlar Siemens NX ve nTop programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonu için ise Altair Inspire programı kullanılmıştır. İlk olarak tasarımı Siemens NX programında gerçekleştirilen döner yapı braket parçasının Altair Inspire programı kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiş, sonrasında bir parça üretiminin kafes yapılı muadilleri nTop programı yardımı ile tasarlanmıştır. BCC (in. Body centered cubic) ve truncated kübik kafes yapıları tozun rahat tahliye edilebileceği formlar olduğu varsayılarak kullanılmıştır.

Parçaların Arcam A2X cihazında üretimin gerçekleştirilmesi için Materialise Magics programı kullanılarak üretim öncesi cihaz içerisinde konumlandırılması, gerekli bölgelere deste yapılarının uygulanması gibi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarımda hedeflenen minimum boşluk miktarlarının üretim esnasındaki ısıl davranışını inceleme amacı ile Ansys Fluent programı kullanılmıştır.

Elektron demeti ile ergitme cihazı

Metalik döner yapı numuneleri ARCAM A2X cihazı kullanılarak Ti6Al4V ham malzemesi ile üretilmiştir. Oksidasyonu ve yüksek güce sahip elektron demetlerinin etrafa yayılımını engelleme amacı ile üretim vakum altında gerçekleştirilmektedir [17]. 1000 ºC' ye kadar üretim sıcaklığına çıkabilen ARCAM A2X cihazında elektronlar enerji taşıyıcı, yüksek enerji penetrasyonu sağlayıcı unsurlar olarak kullanılmaktadır. Cihazın maksimum üretim hacmi 200 mm X 200 mm X 380 mm, minimum ışın çapı 250 μm, maksimum gücü 3 kW, kullandığı katot tipi Tungsten filament, maksimum elektron demeti hızı 8000 m/s, kullanılan güç kaynağı 3 X 400 V, 32 A, 7 kW ve cihaza aktarılan modellerin klasik data formatı Stereolitografi (STL)'dir [35].



Şekil 3.1. Arcam A2X cihazı şematiği [35]

Üretilen numuneler ARCAM A2X cihazından çıkarıldıktan sonra parçaların üzerinde kalan sinterlenmiş toz parçacıkları ARCAM PRS cihazı yardımı ile tahliye edilmektedir.

El tipi tarama cihazı

Metalik numunelerin üç boyutlu renkli taraması için Creaform markasının Go Scan 3D cihazı kullanılmıştır. Beyaz ışık teknolojisi ile ölçüm yapan cihazın ölçüm hassasiyeti 0,050 mm'dir. Ölçüm çözünürlüğü 0,100 mm iken ölçüm hızı saniyede 1.500.000 ölçümdür. Cihazın tarama alanı 390 mm X 390 mm'dir. Tarama gerçekleştirildikten sonra tarama verileri STL dosya formatında temin edilmektedir.



Şekil 3.2. Go Scan 3D tarama cihazı [36]

Sıcak kalıba alma cihazı

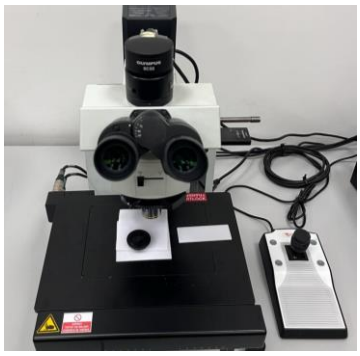
Parçalar elektron mikroskopta ölçülmeden önce Metkon Ecopress 100 cihazında sıcak kalıba alınmıştır. 1250 W ısıtma gücüne sahip olması sebebi ile ısıtma ve soğutma işlemleri çok hızlı gerçekleşmektedir. Numune oluşturma işlemleri hidrolik basınç ile gerçekleşmektedir. Numune oluşturulurken iç ortam maksimum 300 bar basınca kadar çıkabilmektedir. Maksimum 200 °C'ye kadar ısıtma gerçekleştirmektedir.



Şekil 3.3. Metkon Ecopress 100, sıcak kalıba alma [37]

Optik mikroskop

Olympus BX52 optik mikroskopu 25 mm hareket uzunluğuna sahip olup aydınlatıcı kısımda 12 V, 100 W'luk halojen ampuller kullanılmaktadır [38]. 4X'den 10X'e kadar büyütme mercekleri mevcuttur. Teze konu olan çalışmada döner parçadan kesilen numunelerin bir kısmı Olympus BX52M optik mikroskopu altında incelenmiştir.



Şekil 3.4. Olympus BX52 optik mikroskopu

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Üretilen numunelerin yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo'nın Surftest SV 3100 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Cihaz yüksek hassasiyet, seviye analizi ve üç eksende de hareket kabiliyetine sahiptir. X ekseninde 300 mm'ye kadar ölçüm yapabilmektedir. Çözünürlüğü 0,05 µm'dir. Z ekseninde 500 mm yüksekliğe kadar hareket edebilmektedir ve 1 µm çözünürlüğünde ölçüm yapmaktadır. Yaklaşık 0,75 mN kuvvet ile parçaya temas sağlamaktadır. Ölçüm verilerini Ra, Rz, Rq, Ry değerleri olarak vermektedir [39].



Şekil 3.5. Mitutuyo Surftest SV 3100 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı [39]

Bilgisayarlı tomografi cihazı

Numunelerin boşlukları, hataları yüksek çözünürlük ile EasyTom XL cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Cihaz, parça üzerine x-ray ışınları göndererek ölçüm yapmaktadır. Cihaz 350 nm/voksel çözünürlüğe kadar inebilmektedir. En büyük ölçüm hacmi olarak 320 mm çap, 720 mm yüksekliğe sahiptir. X-ray güvenlik regülasyonlarına sahip olan cihaz 230 kV gerilim değerine kadar çıkabilmektedir.



Şekil 3.6. EasyTom XL bilgisayarlı tomografi cihazı [40]

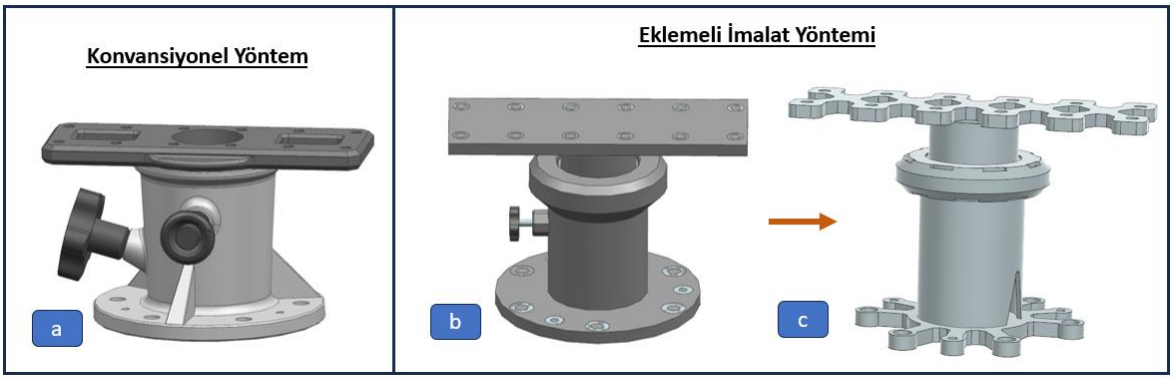
4. TASARIM VE ÜRETİM YAKLAŞIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde kilitlenebilir döner yapı tasarımı ve üretimleri anlatılmıştır.

4.1. Bütünleşik Kilitlenebilir Döner Yapı Tasarımı

Eklemeli imalat yöntemlerinin sayısız avantajlarının başında çok parçalı yapıların tek parça halinde konsolide olarak üretilmesi, konvansiyonel yöntemlerle üretilmesi imkansız karmaşık yapıların üretilmesi gelmektedir [13, 41]. Söz konusu tez çalışmasında da konvansiyonel metoda uygun tasarlanmış kilitleme fonksiyonuna sahip döner braket montaj yapısının eklemeli imalat yöntemlerinin faydalarından yararlanılarak tek parça olarak üretilmesi hedeflenmiştir. Döner braket parçası, üzerindeki faydalı yükü istenilen konuma döndürmek için kullanılmaktadır. Çalışma esnasında faydalı yükün yatay eksende pozisyonunun mümkün olabildiğince bozulmaması istenerek bu parçada yer alan döner yapının minimum boşluğa sahip olması amaçlanıp çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki asıl amaç braketteki kilitlenebilir döner yapının EBM yönteminde radyal eksende üretilebilir minimum boşluk miktarı belirlenmesi ve yaklaşım geliştirilmesidir. Konvansiyonel metotla üretime uygun olarak tasarlanan ve talaşlı imalat yöntemlerinden freze yöntemi ile üretilen 4 parçadan oluşan muadil döner braket yapısı hem dönme fonksiyonuna hem de kilit pimi sayesinde belli açılarda kilitleme özelliğine sahiptir (Bkz. Resim 4.1.). Braket yapısı çevre koşulları dolayısıyla AISI 304 malzemesinden üretilmiştir ve kütlesi 5,10 kg'dır.

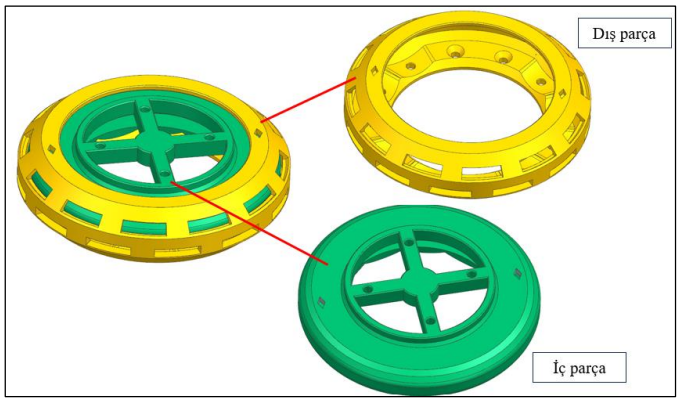
Ti6Al4V malzemesi kullanılarak EBM yöntemine uygun kilitlenebilir döner braket yapısı aynı sınır şartları için tek parça olarak tasarlanmıştır. Eklemeli imalat kullanılarak yapının ağırlığı 5,1 kg'dan 0,8 kg'a, yaklaşık %85 oranında azaltılmıştır. Sanayi kullanım alanı olabilecek bu yapının, sağlıklı bir şekilde üretilebilmesi için desteksiz üretim olgusunun, sarkma miktarı ve en az boşluk miktarı konularının akademik olarak çalışılmasına ihtiyaç duyulmuştur.



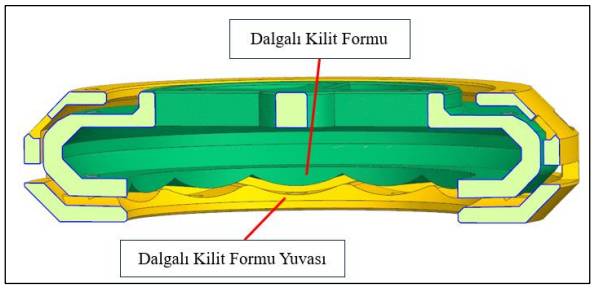
Resim 4.1. Döner braket tasarımları (a) Konvansiyonel metot için tasarlanmış (b) Eklemeli imalat için tasarlanmış topoloji optimizasyonu öncesi (c) Eklemeli imalat için tasarlanmış topoloji optimizasyonu sonrası

Tez çalışmasında kilitlenebilir döner braketin döner yapısının minimum boşluk miktarında üretilebilirliği ana hedefi ile sonraki aşamalarda sadece kilitlenebilir döner yapı tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Teze konu olan bu çalışmada Resim 4.2.'de gösterilen kilitleme fonksiyonuna sahip bütünleşik döner yapının tasarımı, birbirinden ayrılamayan tek parça olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapı fonksiyonunu iç parçanın dış parça içerisinde dönebilmesi sayesinde sağlamaktadır. Kilitleme fonksiyonu ise parçaların dalgalı detayları sayesinde gerçekleştirilmektedir (Bkz. Resim 4.3.). Kilit yapısı detayı iç parçada 30° açıda bir tepe noktasına denk gelecek şekilde üzere toplamda 12 adet tepeye sahip dalgalı yapı, dış parçada da bu dalgalı yapıların yuva karşılığı bulunmaktadır. Döner yapılar her 30° açıda döndürüldükçe döner yapıdaki dalgalı çıkıntılar, karşılığı olan yuvalarına denk gelerek yuva içerisine oturmaktadır. Faydalı yükün ağırlığı sayesinde sistem kendini dönme yönünde kilitlemektedir. Elektron demeti ile ergitme metodunun dezavantajı olarak görülen yüksek yüzey pürüzlülüğü gerçekleştirilen tasarımda avantaj olarak kullanılmıştır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü dalgalı kilitleme yapısında sürtünmenin etkisini pozitif olarak artırmaktadır. Fonksiyonel kullanım esnasında bütünleşik kilitlenebilir döner yapıya sahip brakette yükü taşıyan ve geometrisi sebebi ile kritik olan yüzey dalgalı formdur. Dalgalı formun düzgün üretilebilmesi için üretim yönünü radyal yön olarak seçilmiştir. Öte yandan radyal üretim yönü dönme fonksiyonunu sağlayan iç ve dış parçaların silindirik kısımları için dezavantaj oluşturmaktadır. İç ve dış parçanın silindirik yüzeyleri arasında sarkma beklenmekte olup gerçekleştirilen çalışma ile bu değerin minimum değerlerde elde edilmesi amaçlanmıştır.

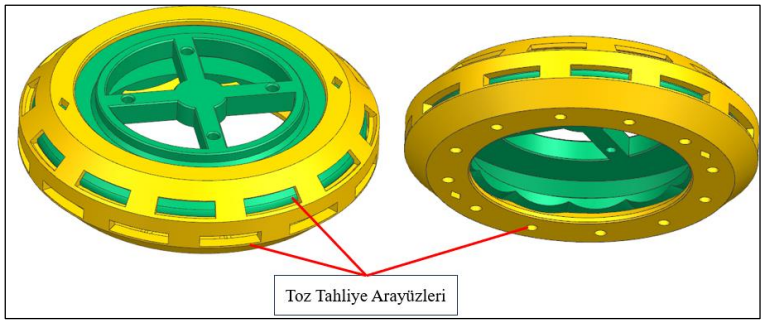


Resim 4.2. Bütünleşik kilitlenebilir döner yapı tasarımı



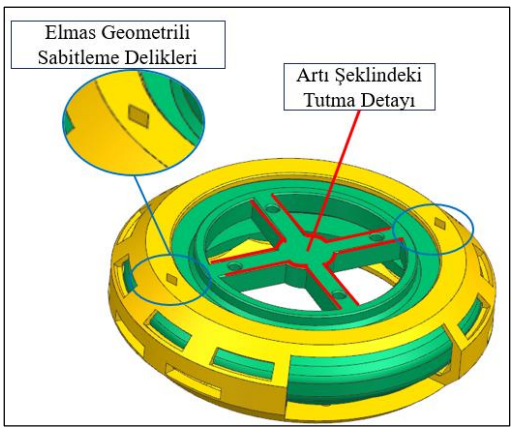
Resim 4.3. Bütünleşik kilitlenebilir döner yapı kilit mekanizması

EBM yöntemi kullanılarak üretilen parçalar için bir diğer önemli konu toz tahliyesidir. Üretim sonrası parça içerisindeki tozların tahliye edilmesi için deliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle küçük boşluk miktarına sahip bölgelerden toz tahliyesi oldukça zor olmaktadır. Bu tez çalışmasında da 400 µm, 500 µm gibi boşluk miktarlarına sahip döner yapılarla çalışılması dolayısıyla tozun tahliye edilmesi zor olmaktadır. Bu sebeple parça üzerinde, özellikle 400 µm, 500 µm boşluk miktarlarına sahip bölgelerde tozun rahat tahliye edilmesi için toz tahliye delikleri açılmıştır (Bkz. Resim 4.4.).



Resim 4.4. Bütünleşik kilitlenebilir döner yapı toz tahliyesi boşaltmaları

Döner yapılar için tasarım ve ölçüm açısından önemli olan bir diğer detay sabitleme delikleridir. Bu delikler, döner yapıların üretim esnasındaki pozisyonlarında radyal boşluklarının ölçülebilmesi için hareketli olan iç ve dış parçanın radyal yönde hareketini engelleme amacı ile açılmıştır. Formunun kolay üretilebilir olması sebebi ile sabitleme delikleri elmas formunda tasarlanmıştır (Bkz. Resim 4.5.) [7]. Ayrıca bu deliklerden iç ve dış parçayı birbirine sabitleme amacı ile elmas formundaki miller tasarlanmıştır. Parçanın dönme fonksiyonunu doğrulayabilmek için tutma arayüzü sağlanması adına iç parça da artı şeklinde detaya sahip olarak tasarlanmıştır.



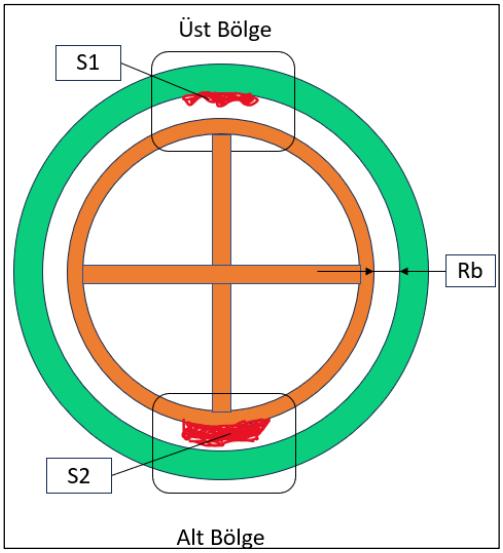
Resim 4.5. Parçalar üzerindeki elmas geometrili sabitleme delikleri

Döner yapılar ve sarkma eğilimi

Silindirik yapılardan, deliklerden kendi kendini destekleyen yapılar olarak bahsetmek mümkündür. Bunun temel sebebi her bir katmanın bir önceki katman sayesinde desteklenmesidir. Bu durum radyal eksenin, inşa eksenine dik olarak konumlandığında geçerli olmaktadır. Silindirik yapıların radyal ekseninin, inşa yönüne paralel olarak üretildiği durumlarda ise en alt ve üst bölgenin kendini desteklememesinden dolayı destek yapısı kullanılması zorunluluğu artmaktadır, kullanılamadığı taktirde bu bölgelerde sarkma, yüzey bozulması gibi problemlerin yaşanması mümkündür. Ameen ve arkadaşlarının (2018) gerçekleştirmiş olduğu çalışmada sarkma problemi gerçekleşme ihtimali olan bu kritik bölgenin yaklaşık olarak silindir çapının 1/3'üne denk geldiği gözlemlenmiştir [3].

Teze de konu olan bütünleşik döner yapılarda dış parça ile iç parça arasındaki boşluğa üretim sonrası erişim zorluğu nedeniyle, parçaların arasında kalan bu bölgede destek yapısı kullanılamamaktadır. Üretim esnasında yüksek miktarda oluşan ısının dışarı

atılamamasından dolayı parçada döner bölgelerde bozulmalar ve sarkma problemi meydana gelmektedir. Bu üretim kusurları sebebi ile yapı dönme fonksiyonunu yerine getirememektedir. Bütünleşik döner yapıda bulunan dış parçanın dış yüzeyine destek atmak mümkündür. Ancak erişim zorluğu nedeni ile iç parçaya destek atmak ve bu desteği temizlemek ne yazık ki günümüzdeki imkanlar ile mümkün olmamaktadır. Bu bilgiler ışığında bakıldığında parçanın üst kısmında sarkma potansiyeli oluşturabilecek bölge dış parçanın iç yüzeyidir. Üst kısımda iç parça, altındaki artı geometrisi sayesinde ısı transferini sağlayabilmesi beklenmektedir. Bu bölgede sarkma potansiyeli olan dış parça-iç parça bölgesi iç bükey parçada sarkma eğilimli bölge olarak adlandırılmıştır (Bkz. Resim 4.6.). Bütünleşik döner yapının alt kısmında ise iç parçanın dış yüzeyinde destek yapısı kullanılamaması sebebi ile burada sarkma potansiyeli oluşmaktadır. Bu bölge sarkma potansiyeli olan iç parçanın dış geometrisi olması sebebi ile dış bükey parçada sarkma eğilimli bölge olarak adlandırılmıştır (Bkz. Resim 4.6.). İç bükey bölgede meydana gelen sarkma S1, dış bükey bölgede meydana gelen sarkma S2 olarak tanımlanmıştır. Dış parça ile iç parça arasındaki radyal boşluk Rb olarak tanımlanmıştır.



Resim 4.6. Bütünleşik döner yapılarda sarkma bölgeleri

Bu çalışmada literatürde örnekleri olan temassız destek yapısı olgusunun kilitlenebilir döner yapı gibi destek yapılarının kullanılamadığı ve destek yapılarının temizlenmesinin imkansız olduğu bütünleşik yapılarda uygulanabilirliğinin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır.
Bu kapsamda parçaların üst ve alt bölgeleri incelemeye alındığında üst bölgede bir mesafeye kadar yapının Rb değeri azaltıldıkça iç parçanın temassız destek yapısı gibi davranarak ısı

transferinin gerçekleşmesi ve yüzey bozulmalarının azalması beklenmektedir. Öte yandan yapışmanın meydana geldiği Rb sınır değeri de saptanarak üst bölge için minimum fonksiyonel Rb boşluğunun araştırılması amaçlanmıştır. Alt bölgeye bakıldığında ise dış parçanın, sarkma potansiyeli olan iç parçaya temassız destek yapısı davranışı sergilemesi beklenmektedir. Üst bölgedeki gibi yapışmanın meydana gelmediği minimum Rb değerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Hem üst hem de alt bölge parçaları için sadece toz olduğunda normal şartlarda ergime ve katılaşma meydana gelip yapışma olabilecek boşluk miktarını temassız destek yapısı kullanımı ile ergime sıcaklığı değerinin altına düşerek yapışmanın engellendiği boşluk değerinin saptanması hedeflenmiştir.

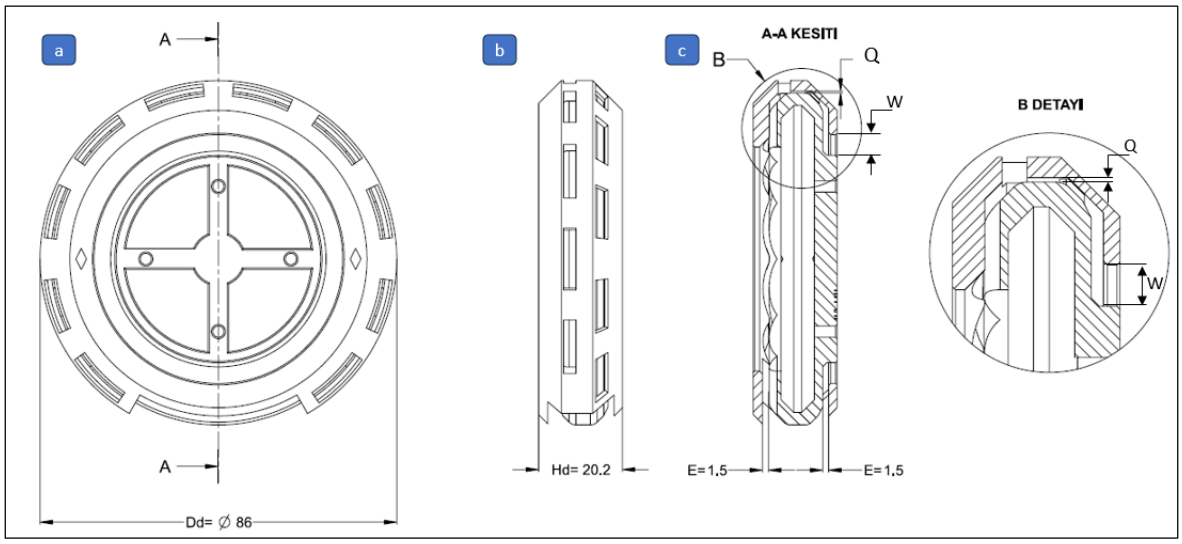
Aşağıda belirtilen kanılardan bahsetmek mümkündür:

- S1 değeri Rb değerinden daha az olduğunda yapışma olmayıp dönme meydana gelecektir.
- S2 değeri Rb değerinden daha az olduğu taktide yapışma oluşmayıp dönme meydana gelecektir.

Parçaların birbirine temassız destek yapısı gibi davranmasının yüzey pürüzlülüğü açısından da fayda sağlayacağı beklenmektedir. Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında parçalar üzerinde biriken üretim ısısını uzaklaştırılması ile yüzey bozulmalarının azaldığı, yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği gözlemlenmektedir [2].

Tez parçalarının tasarımları

Kilitlenebilir döner braket yapısındaki döner yapısının dış ölçüleri sabit tutularak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda dış çap (Dd) 86 mm, dış kalınlık (Hd) 20,2 mm, dış parça ile iç parça arasındaki alt ve üst eksenel boşluk (E) 1,5'er mm değerleri korunarak numuneler tasarlanmıştır. Parçalarda Q ve W olarak belirtilen 2 farklı radyal boşluk bölgesi değişken olarak belirlenmiştir (Bkz. Resim 4.7., Resim 4.8., Resim 4.9.). Q ve W radyal boşluklarının üretimsel açıdan farkı, her iki boşluk üzerinde yer alan sarkma eğilimindeki bölgenin kalınlığının farklı oluşudur. Q bölgesi bulunduğu konum dolayısıyla kolay erişilir ve kolay ölçülür bir bölge olmamakla birlikte W dış yüzeyde olması dolayısıyla daha rahat ölçülür bir bölge olmaktadır.



Resim 4.7. Tam dairesel parça teknik resmi (a) Önden görünüş (b) Soldan görünüş (c) Kesit görünüşü

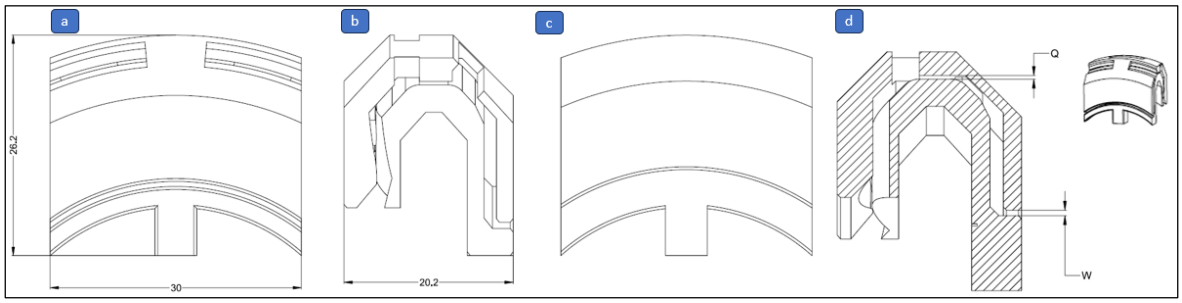
Tez çalışmasında 50 adet parça tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlarda döner yapılardaki dış parça ile iç parça arasındaki küçük boşluk miktarlarının üretilebilirliği, toz tahliye yapılarının minimum boşluklardaki parçalar için uygunluğu, boşluk miktarı değişiminin yüzey pürüzlülüğü açısından etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda bütünleşik kilitlenebilir döner yapılar bütünsellik açısından üç tip parça olarak üretilmiştir. Bunlar parçanın tamamını içeren tam dairesel parça, dış parçanın sarkma durumunun incelenebileceği üst bölge parçası ve iç parçanın sarkma durumunun incelenebileceği alt bölge parçasıdır. Parçalar numune şekli, Q ve W dikey boşluk miktarlarına göre adlandırılmıştır. Örneğin T-Q500-W5000-4 tanımlamasındaki “T” tam dairesel formda olduğunu, “Q500” Q boşluğunun 500 µm olduğunu, “W5000” W boşluğunun 5000 µm olduğunu, “4” ise bu ölçülere sahip dördüncü parça olduğunu ifade etmektedir. Ü-Q350-W5000 Ü parçanın üst bölge parçası olduğunu ifade etmektedir. Parça tanımlamasında “A” ise alt bölge parçası olduğunu göstermektedir.

Üst ve alt bölge parçaları

Döner parçalarda asıl sarkmanın beklendiği bölgeler olması dolayısıyla üst ve alt sarkma bölgelerinin daha detaylı ölçülebilmesi adına küçük parçalar tasarlanmıştır. Bu küçük parçalar tam dairesel parçaların ölçülerine sahiptir. Ameen ve arkadaşlarının (2018) gerçekleştirdiği çalışmada silindirik parçalarda çapın 1/3’ünün deformasyon açısından kritik uzunluk olduğu belirlenmiştir [4]. Bu durum göz önünde bulundurularak küçük parçalar tam

dairesel parçaların kritik bölgelerini içine alacak şekilde tam dairesel parçaların dış çapının en az 1/3'üne tekabül edecek biçimde 30 mm genişliğinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Üst parça ölçüleri Resim 4.8.'de, alt parça ölçüleri Resim 4.9.'da gösterilmektedir.

Çalışmada toplamda 33 adet alt ve üst bölge parçası tasarımı gerçekleştirilmiştir. Boşluk miktarları için özellikle Çelik ve arkadaşlarının çalışması ile Cooper ve arkadaşlarının çalışmalarındaki değerler referans olarak alınmıştır. Çelik ve arkadaşlarının doğrudan lazer ile metal ergitme (ing. DMLM) yöntemini ve Co-Cr-Mo malzemesini kullandıkları çalışmada 15°, 25°, 30°, 45° eğime sahip düz parçalarda temassız destek yapısı ile parça arasında genel olarak 0,300 mm boşlukta yapışma olmadığı gözlemişlerdir [2]. Cooper ve arkadaşları ise EBM yöntemi ve Ti6Al4V malzemesi ile gerçekleştirdikleri çalışmada temassız destek yapısı ile arasında 0,490 mm, 0,630 mm ve 0,770 mm bulunan, tablaya paralel uzanan numuneler ile 0,630 mm boşluğa sahip iç bükey, dış bükey ve 30° açılı numuneleri üretmiştir. Tablaya paralel parçalardan temassız destek yapısına yapışma olmayan ve daha az deformasyona sahip numunenin 0,630 mm boşluklu numune olduğunu belirlemişlerdir [2]. Öte yandan iç bükey ve dış bükey numuneleri sadece 0,630 mm boşluk değerinde üretmiş ve bu değerde temassız destek yapısına yapışma olmadığı, yüzey pürüzlülüğü yüksek olmasına rağmen boşluk değerinin uygun olduğu kanısına varmışlardır [2]. Bu çalışmalar ışığında tam dairesel parçaların üst ve alt parça tasarımları olan Q ve W boşluk bölgelerinde farklı boşluk miktarlarına sahip parçaların tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu parçaların üretim ve test planlamaları gerçekleştirilmiştir.

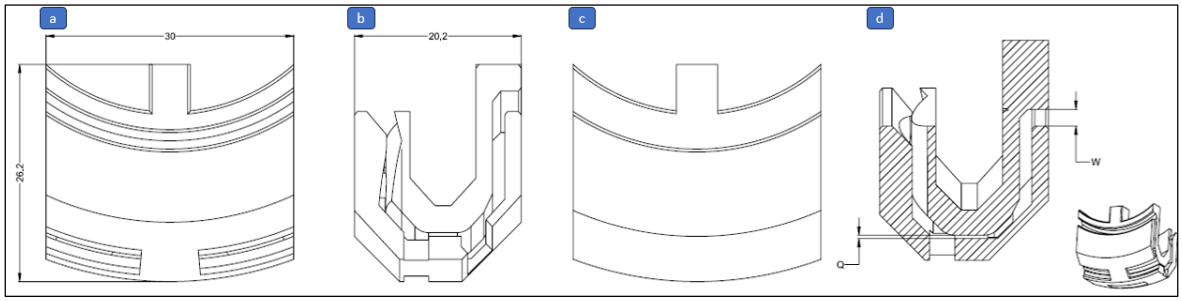


Resim 4.8. Üst bölge parçalarının teknik resmi (a) Önden görünüş (b) Soldan görünüş (c) Arkadan görünüş (d) Kesit görünüşü

Bazı parçalarda Cooper'ın 10 mm yarıçapa sahip küçük numunelerle gerçekleştirdiği çalışmada iç bükey parçalarda denemediği 400 µm boşluk değerindeki üretim başarısının tez çalışmasına konu olan Cooper'ın çalıştığı numunelerden daha büyük, dış yarıçapı 43 mm

muadil döner yapıdaki başarısı ihtimalinin üzerine gidilerek bazı parçalarda Q değeri 400 µm olarak sabit tutulmuştur. W değeri ise 5000 µm, 3000 µm, 2000 µm, 1000 µm, 750 µm, 600 µm, 500 µm, 400 µm olacak şekilde parçalar tasarlanmıştır. Öte yandan Cooper ve arkadaşlarının başarısız olarak adlandırdıkları 490 µm boşluk miktarının üretilebilirliğini ve fonksiyonel dönme durumundaki etkisini gözlemleyebilmek adına 500 µm Q ve W boşluklu parçalar da tasarlanmıştır. Literatürde küçük numunede başarılı olarak adlandırılan 690 µm'den daha küçük boşluklardaki üretim ve dönme başarısını incelemek adına 600 µm boşluğuna sahip parçalar da üretilmek üzere tasarlanmıştır.

Cooper ve arkadaşları ile Çelik ve arkadaşlarının çalışmalar gerçekleştirmediği göreceli olarak büyük 5000 µm, 3000 µm, 2000 µm, 1000 µm gibi değerlerde üretim davranışının gözlemlenmesi de amaçlanmıştır.



Resim 4.9. Alt bölge parçaların teknik resmi (a) Önden görünüş (b) Soldan görünüş (c) Arkadan görünüş (d) Kesit görünüşü

Tam dairesel parça

17 adet tam dairesel parça tasarımı gerçekleştirilmiştir (Bkz. Resim 4.7.). Bu parçaların Q radyal boşluk miktarları 1000 µm, 750 µm, 600 µm, 500 µm, 400 µm, 350 µm ve 300 µm olarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar neticesinde hedeflenen üretimlerde döner yapının dönme fonksiyonunu yerine getirip getiremeyeceğini test etmek amaçlanmıştır. Aynı zamanda döner yapının kendi içinde temassız destek yapısı davranışı gerçekleştirip gerçekleştirmediği araştırılmıştır. Cooper ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışma baz alınarak üretilebilen 750 µm boşluk değeri W boşluğu olarak bazı parçalarda sabit tutularak 400, 500 ve 600 µm boşluk değerlerine sahip Q bölgesi için çalışılabilir en küçük boyut saptanmak istenmiştir. Bu amaçla T-Q600-W750, T-Q500-W750-1, T-Q500-W750-2, T-Q400-W750 parçaları tasarlanmıştır. Sadece T-Q500-W500 parçasında W

değeri Cooper ve arkadaşlarının başarısız olarak değerlendirdiği 500 μm ölçüsüne sahiptir. Bu parça BCC kafes yapısına sahip olarak tasarlanmıştır. Kafes yapısı sayesinde üretilebilirliği araştırılmıştır.

Diğer parçalarda da W ölçüsü 5000 μm tutularak toz tahliyesinde problem yaşamadan sadece Q bölgesinin etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu parçalar T-Q1000-W5000, T-Q750-W5000-1, T-Q750-W5000-2, T-Q500-W5000-1, T-Q500-W5000-2, T-Q500-W5000-3, T-Q500-W5000-4, T-Q500-W5000-5, T-Q450-W5000, T-Q400-W5000, T-Q350-W5000 ve T-Q300-W5000 parçalarının tam dairesel olarak üretilmesi kararlaştırılmıştır. 750 μm Q radyal boşluğuna sahip tasarım haricinde geri kalan tam dairesel parçaların radyal yönde üretimi kararlaştırılmıştır. Eksenel yönde ve radyal yönde üretimleri karşılaştırabilmek adına literatürde çalışır görünen boşluk miktarı olan 750 μm değeri Q boşluğu için sabit tutularak eksenel yönde T-Q750-W5000-1, radyal yönde T-Q750-W5000-2 parçalarının üretimi ve karşılaştırılması planlanmıştır.

Tam dairesel parçalarda üst bölgede sarkma ve sarkma dolayısıyla etkilenebilecek fonksiyonelliğin test edilebilmesi, alt bölgede maksimum sarkmanın saptanabilmesi amacı ile alt kısımdaki sarkma ihtimali olan bölgenin dışındaki dış parçada boşaltma olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Buradaki hedef alt bölgede iç parça ile dış parça arasındaki olası ısıl iletkenliği dış parçanın boşaltılması ile engelleyip alt bölgede sarkma davranışının incelenmesi ve maksimum sarkmanın saptanmasıdır. Bu amaçla T-Q500-W5000-2, T-Q500-W5000-3, T-Q500-W5000-4, T-Q450-W5000, T-Q400-W5000, T-Q350-W5000 ve T-Q300-W5000 parçalarının dış bükey kısmında dış parçası 40 mm genişliğinde boş tasarlanmıştır.

Tam dairesel parça tasarımlarındaki bir diğer amaç minimum boşluklarda tasarlanan döner parçalar için en uygun toz tahliyesi detayının belirlenmesidir. Bu amaç ile parçaların dönmesi ön görülen 500 μm boşluk değeri sabit tutularak farklı toz tahliyesi detayına sahip 6 adet bütün silindirik parça tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu parçalar T-Q500-W5000-1, T-Q500-W5000-2, T-Q500-W5000-3, T-Q500-W5000-4, T-Q500-W5000-5 ve T-Q500-W500'dir. Tüm alternatiflerde parçaların alt yüzeyindeki tahliye delikleri 3 mm çapa sahiptir. Yan yüzey ve üst yüzeydeki boşaltma tipleri değişmektedir. T-Q500-W5000-2 parçasında yan yüzeydeki boşaltmalar dairesel delikler olup çapları 4 mm'dir. Üst yüzeyindeki boşaltmalar 5 mm uzunluğuna ve 4 mm genişliğe sahip eliptik boşaltmalardır.

T-Q500-W5000-1 ve T-Q500-W5000-3 parçalarında ise yan ve üst yüzeyde 13,5 mm uzunluğa, 4 mm genişliğe sahip dikdörtgen kanallar açılmıştır. T-Q500-W5000-4 ve T-Q500-W500 parçalarında yan ve üst yüzeyleri içerecek şekilde dış parçalar body centered cubic (ing. BCC) formuna sahip kafes yapısı kullanılarak tasarlanmıştır. T-Q500-W5000-5 parçasında da yan ve üst yüzeyi içerecek şekilde dış parça truncated cube formunda kafes yapısı kullanılarak tasarlanmıştır. Parçaların boşaltmaları Resim 4.10.'da gösterilmektedir.



Resim 4.10. Toz tahliye detayları (a) Eliptik boşaltma (b) Geniş kanal boşaltması (c) Body centered cubic kafes yapısı (d) Truncated cube kafes yapısı

Tez çalışması için tasarlanan ve üretilen parçalar Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Parça listesi ve özellikleri

Parça Numarası	Q Değeri (µm)	W Değeri (µm)	Numune Tipi	Parça Tanımı
1	400	5000	Üst Bölge	Ü-Q400-W5000-1
2				Ü-Q400-W5000-2
3	400	3000		Ü-Q400-W3000
4		2000		Ü-Q400-W2000
5		1000		Ü-Q400-W1000
6		750		Ü-Q400-W750
7		600		Ü-Q400-W600
8		500		Ü-Q400-W500-1
9				Ü-Q400-W500-2
10		400		Ü-Q400-W400-1
11				Ü-Q400-W400-2
12	1000	5000		Ü-Q1000-W5000
13	750			Ü-Q750-W5000
14	600			Ü-Q600-W5000
15	500			Ü-Q500-W5000

Çizelge 4.1. (devam) Parça listesi ve özellikleri

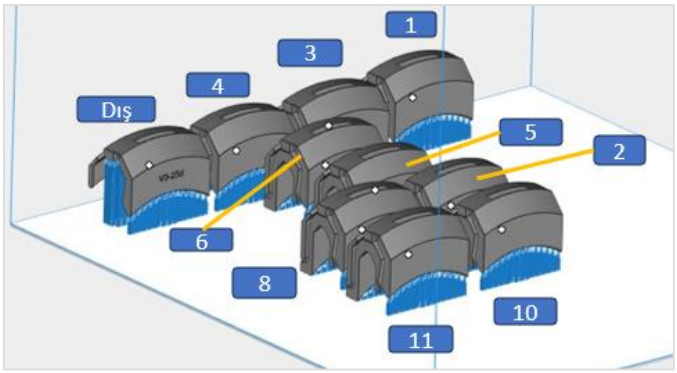
Parça Numarası	Q Değeri	W Değeri	Numune Tipi	Parça Tanımı
16	450	5000	Üst Bölge	Ü-Q450-W5000
17	350			Ü-Q350-W5000
18	300			Ü-Q300-W5000
19	1000		Alt Bölge	A-Q1000-W5000
20	750			A-Q750-W5000
21	600			A-Q600-W5000
22	500			A-Q500-W5000
23	450			A-Q450-W5000
24	400			A-Q400-W5000
25	350			A-Q350-W5000
26	300			A-Q300-W5000
27	400	3000		A-Q400-W3000
28		2000		A-Q400-W2000
29		1000		A-Q400-W1000
30		750		A-Q400-W750
31		600		A-Q400-W600
32		500		A-Q400-W500
33		400		A-Q400-W400
34	600	750	Tam Dairesel	T-Q600-W750
35	500			T-Q500-W750-1
36				T-Q500-W750-2
37	400			T-Q400-W750
38	500	5000		T-Q500-W5000-1
39		500		T-Q500-W500
40	1000	5000		T-Q1000-W5000
41	750			T-Q750-W5000-1
42				T-Q750-W5000-2
43	500			T-Q500-W5000-2
44				T-Q500-W5000-3
45				T-Q500-W5000-4
46				T-Q500-W5000-5
47	450			T-Q450-W5000
48	400			T-Q400-W5000
49	350			T-Q350-W5000
50	300			T-Q300-W5000

4.2. Bütünleşik Kilitlenebilir Döner Yapıların Üretimi

Bu çalışmada konvansiyonel muadili olan, EBM yöntemi ve Ti6Al4V malzemesi kullanarak radyal üretim yönünde üretilen konsolide döner yapıların iç ve dış parça arasında olası en

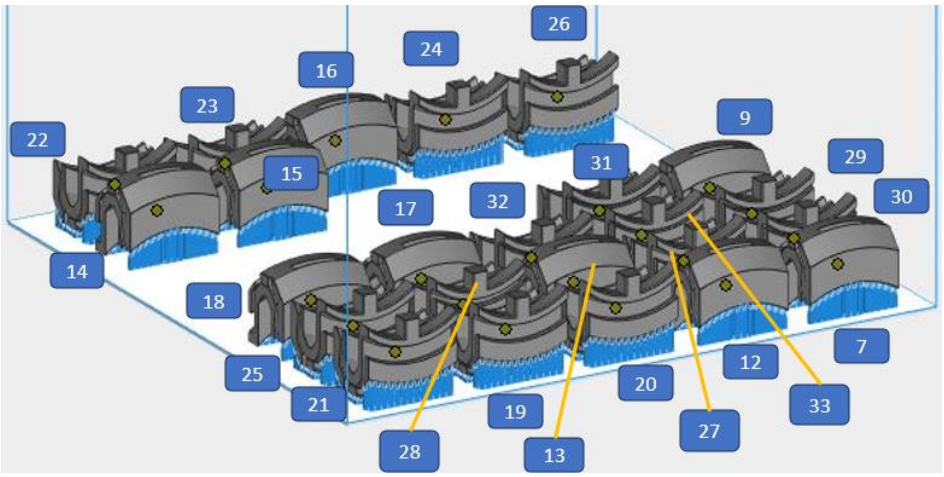
küçük boşluk değerinin belirlenmesine yönelik yaklaşımlar gerçekleştirilmesi, parçalar arasındaki boşluk miktarı değişiminin yüzey pürüzlülüğü, üretim kusurları vb. durumlar açısından etkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda küçük alt bölge ve üst bölge parçalar ile tam dairesel parçalar üretilmiştir. Bir adet tam dairesel parça dışında tüm parçalar radyal eksen üretim yönünde cihaz içerisinde konumlandırılarak üretilmiştir. Beş farklı üretim seti içerisinde toplam elli adet parça üretilmiştir.

İlk üretim setinde üst parça 1-6,8, 10,11 ve desteksiz dış parça olmak üzere on adet parça üretilmiştir (Bkz. Resim 4.11.).



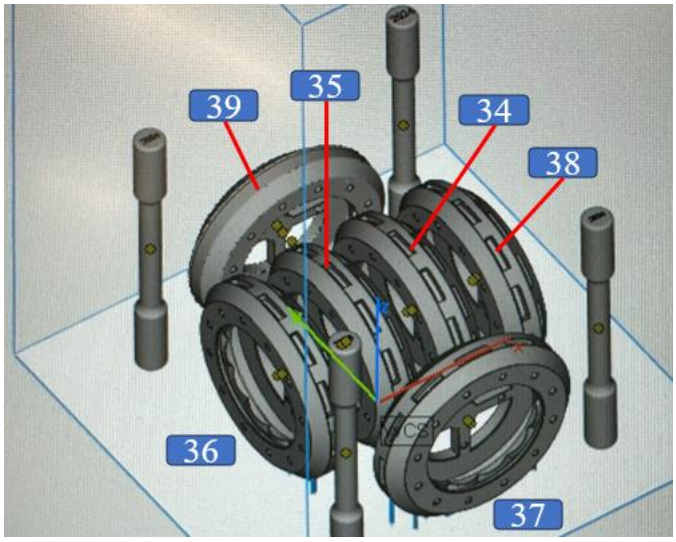
Resim 4.11. İlk üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi

İkinci üretim setinde ise yirmidört tane parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlar Parça 7, 9, 12- 33'tür (Bkz. Resim 4.12.).



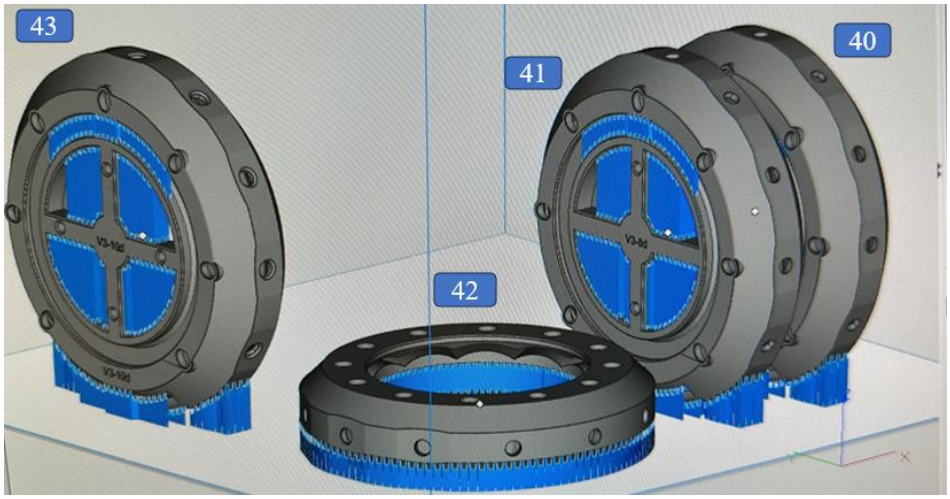
Resim 4.12. İkinci üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi

Üçüncü üretim setinde altı adet tam dairesel parçanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlar Parça 34-39'dır (Bkz. Resim 4.13.).



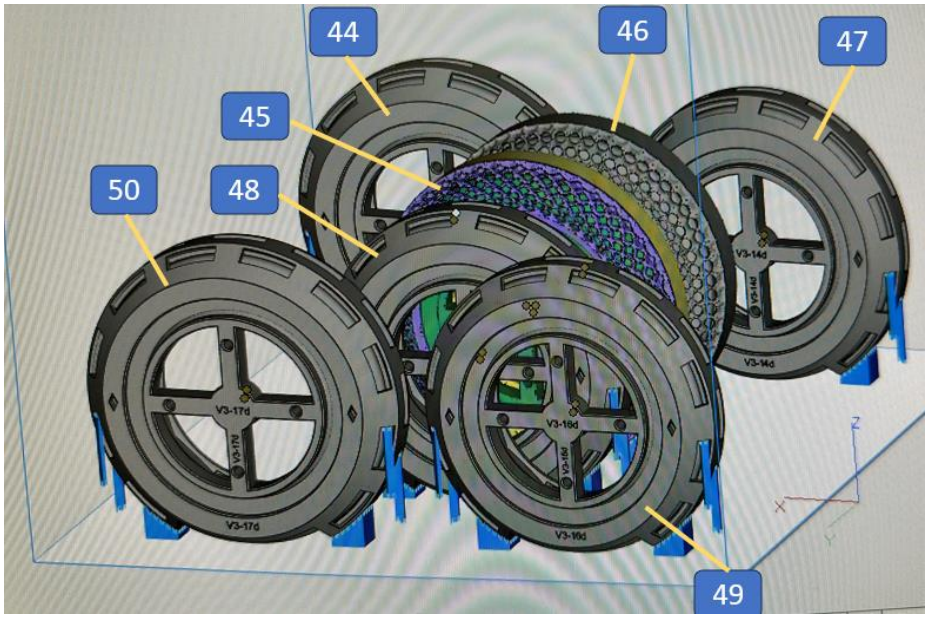
Resim 4.13. Üçüncü üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi

Dördüncü üretim setinde dört adet tam dairesel parçanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlar Parça 40-43'tür (Bkz. Resim 4.14.).



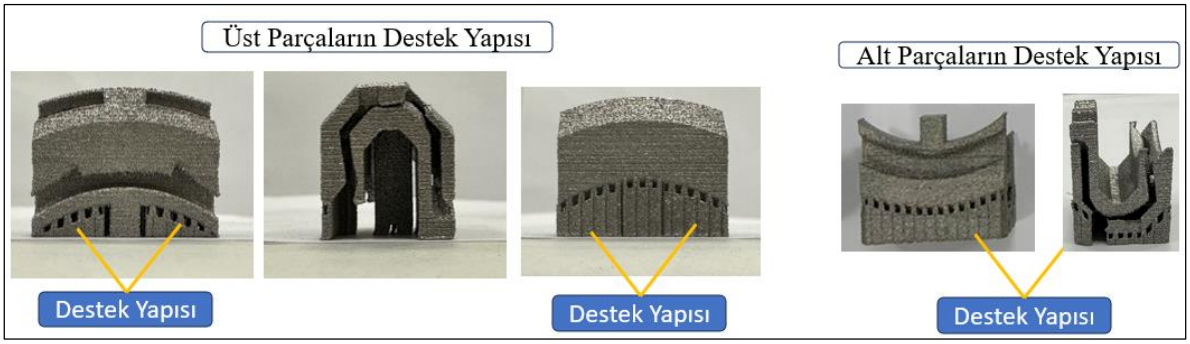
Resim 4.14. Dördüncü üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi

Beşinci üretim setinde ise yedi parça olmak üzere Parça 44-50'nin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Magics programında parçaların cihaz için konumlandırması ve destek yapı uygulaması Resim 4.15.'de gösterilmektedir.



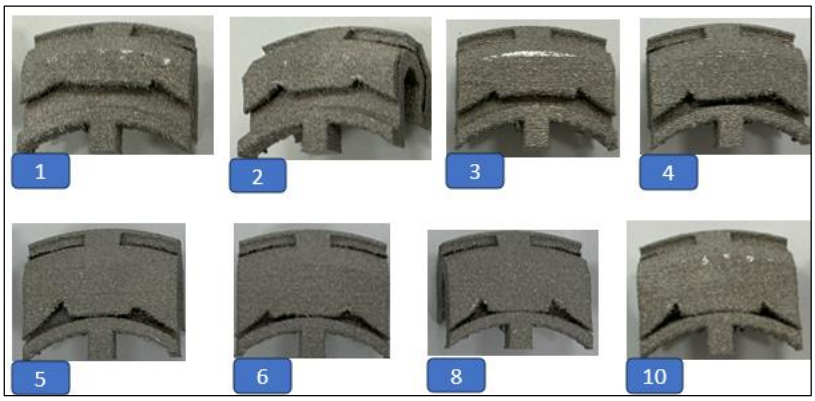
Resim 4.15. Beşinci üretim setinin Magics programında cihaz içi yerleşimi ve destek yapıları ile gösterimi

İlk ve ikinci üretim setinde üretilen üst ve alt parçaların destek yapıları Resim 4.16.'da gösterilmiştir.



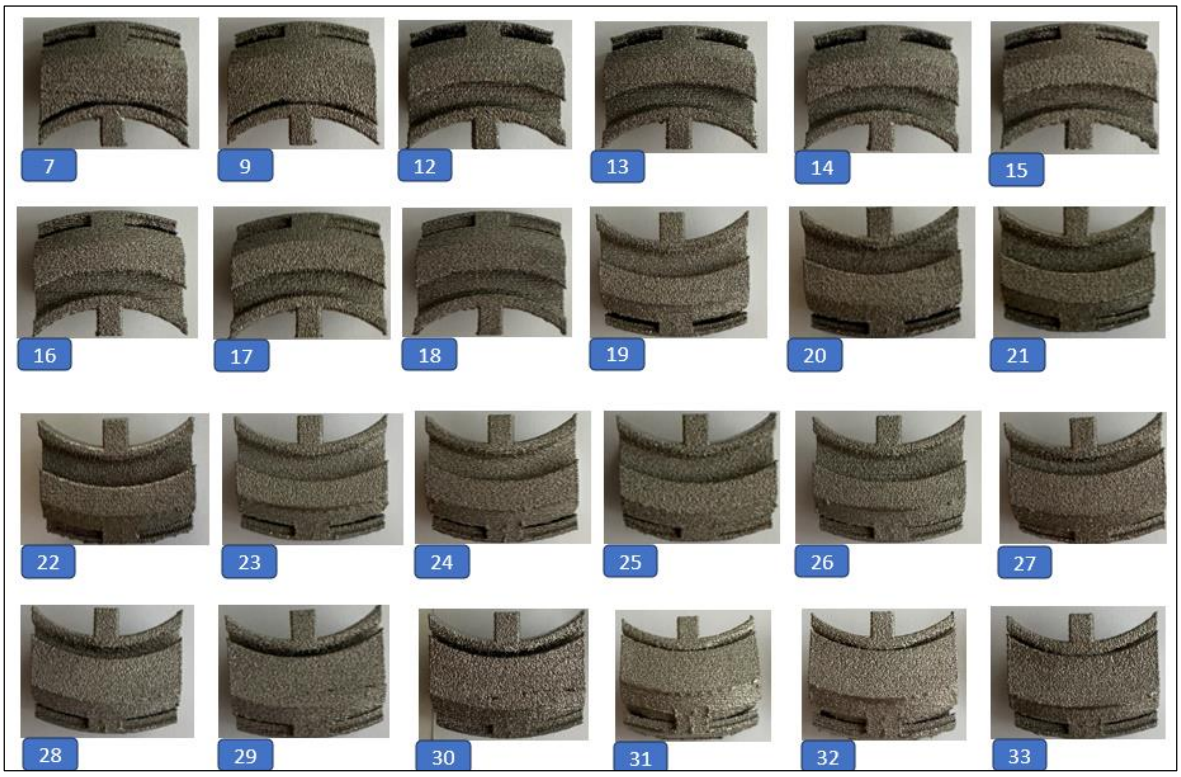
Resim 4.16. Üst ve alt parçaların destek yapılarının gösterimi

İlk sette üretilmiş üst parçalar Resim 4.17.'de gösterilmiştir.



Resim 4.17. İlk sette üretilen üst parçaların üretim sonrası görselleri

İkinci sette üretilmiş üst ve alt parçalar Resim 4.18.'de gösterilmiştir.

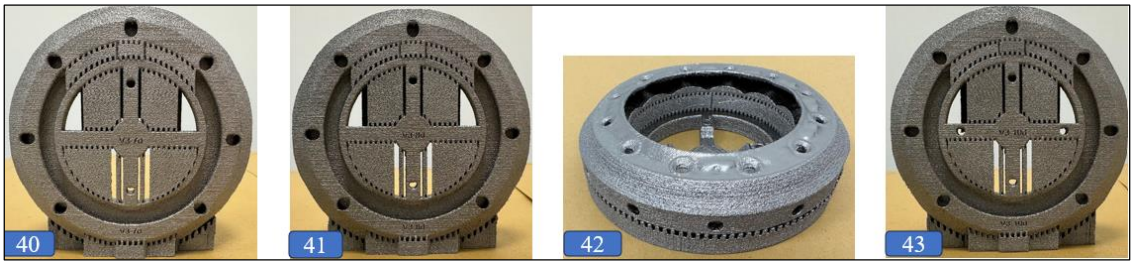


Resim 4.18. İkinci sette üretilen üst ve alt parçaların üretim sonrası görselleri

Üretilen üçüncü setin üretim sonrasında temizlenmiş görseli Resim 4.19'da, dördüncü setin Resim 4.20.'de gösterilmektedir.

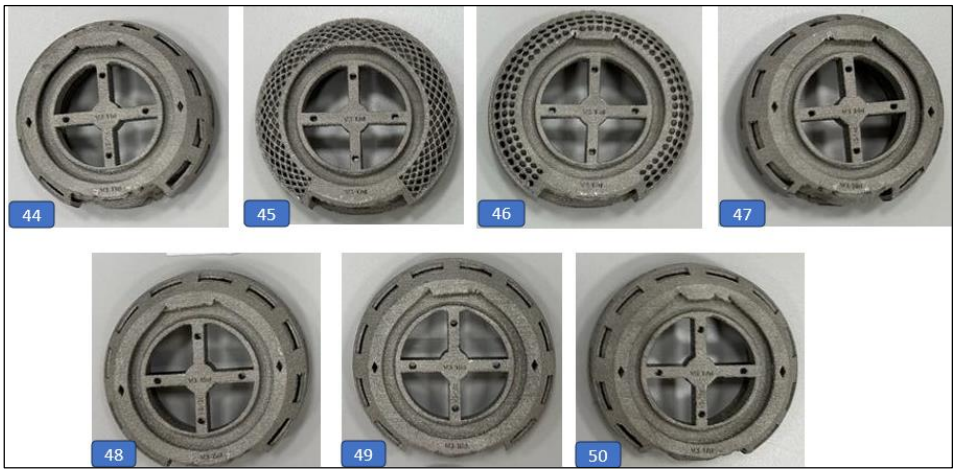


Resim 4.19. Üçüncü sette üretilen tam dairesel parçaların üretim sonrası görselleri



Resim 4.20. Dördüncü sette üretilen destek yapıları temizlenmemiş tam dairesel parçaların üretim sonrasındaki görselleri

Beşinci sette üretilmiş tam dairesel parçaların üretim sonrası görselleri destek yapılarının temizlenmiş hali ile Resim 4.21.'de gösterilmektedir.



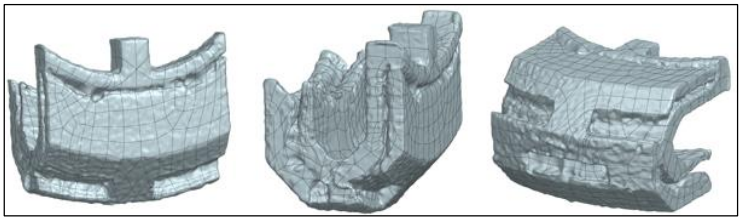
Resim 4.21. Beşinci sette üretilen tam dairesel parçaların üretim sonrası görselleri

5. ÖLÇÜMLER VE SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

Bu bölümde üretilen parçaların ölçüm sonuçları ve fonksiyonel durumları paylaşılmıştır. Ayrıca literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

5.1. Üst ve Alt Bölge Parçaların Test ve Ölçüm Sonuçları

Küçük üst ve alt bölge parçaların boşluk miktarlarının çok düşük mertebelerde olması dolayısıyla tarama cihazı ile sağlıklı ölçümler alınamamıştır (Bkz. Resim 5.1). Küçük parçalar için tarama cihazı kullanıldığında 750 μm boşluklara sahip parçalarda bile boşlukları algılamayıp yapışık modelleme gerçekleştirdiği için tarama yöntemi yerine CT yöntemi tercih edilmiştir.



Resim 5.1. Parça 17'nin tarama modeli görselleri

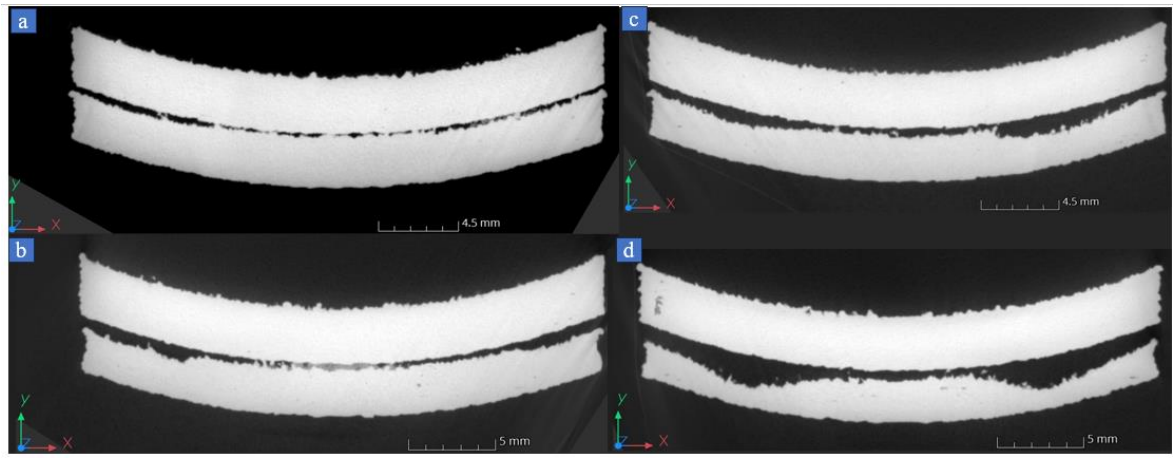
Toplam 15 tane küçük parçanın CT ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu parçalar Ü-Q400-W750, Ü-Q400-W600, Ü-Q400-W500-1, Ü-Q400-W500-2, Ü-Q400-W400-1, Ü-Q400-W400-2, Ü-Q750-W5000, Ü-Q600-W5000, Ü-Q500-W5000, A-Q750-W5000, A-Q600-W5000, A-Q500-W5000, A-Q400-W750, A-Q400-W600 ve A-Q400-W500 parçalarıdır.

Çizelge 5.1. CT ölçümü gerçekleştirilen üst bölge parçalar

Parça No	Parça Tanımı	Q (μm)	W (μm)
6	Ü-Q400-W750	400	750
7	Ü-Q400-W600	400	600
8	Ü-Q400-W500-1	400	500
9	Ü-Q400-W500-2	400	500
10	Ü-Q400-W400-1	400	400
11	Ü-Q400-W400-2	400	400
13	Ü-Q750-W5000	750	5000
14	Ü-Q600-W5000	600	5000
15	Ü-Q500-W5000	500	5000

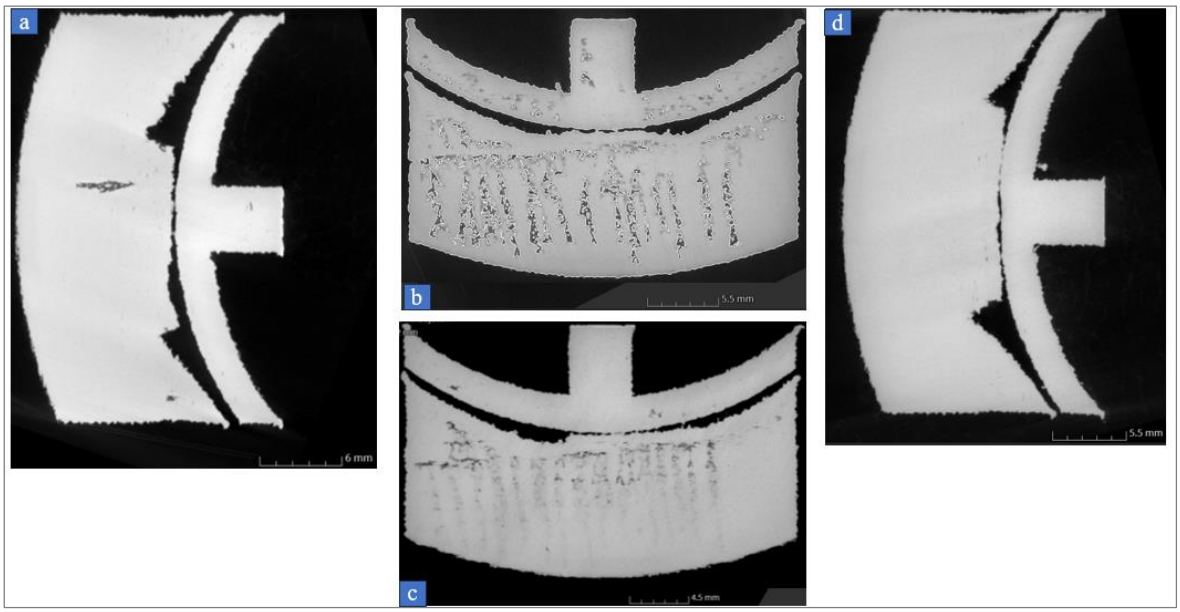
CT ölçümleri gerçekleştirilen üst bölge parçalar Çizelge 5.1.'de belirtilmiştir.

Q boşluk bölgeleri incelendiğinde 400 µm Q boşluk miktarına sahip üst bölge parçaların hepsinde (Parça 6-11) sarkma dolayısıyla iç ve dış parçanın orta bölgede birleştiği gözlemlenmiştir. Öte yandan her ne kadar sarkma dolayısıyla birleşme görülmemiş olsa da 500 µm boşluklu Parça 15'de tozun özellikle sarkma olan orta bölgede tahliye edilemediği görülmektedir (Bkz. Resim 5.2.). 600 µm Q boşluklu Parça 14'de yer yer az miktarda toz kalmakla beraber 750 µm ve üzeri boşluklarda tozun rahat bir şekilde tahliye edilebilmiştir. 600 µm Q boşluklu Parça 14 ve 750 µm Q boşluklu Parça 13'de birleşmeler meydana gelmemiştir. Parça fonksiyonel olarak rahatça çalışabilir durumdadır.



Resim 5.2. Üst bölge parçaların Q bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 8 (b) Parça 15 (c) Parça 14 (d) Parça 13

Üst bölge parçalarda W boşluk bölgesine bakıldığında ise Resim 5.3.'de yer alan CT görüntüleri elde edilmiştir. Aynı Q bölgesinde olduğu gibi W bölgesinde de 400 µm boşluk değerine sahip parçalarda sarkma dolayısıyla iç parça ile dış parça birleşmiştir. Alt W bölgesinde sarkma eğilimindeki parça iç parçadır. Birleşme iç parçanın yer çekimi yönünde akması ve dış parçaya yapışması ile oluşmaktadır. Q bölgesine benzer şekilde W bölgesinde 500 µm boşluğa sahip Parça 8'de da toz birikmesi ve 300-500 µm boyutlu birleşmeler meydana gelmiştir. Bu birleşmeler sıklığı dolayısı ile kırılıp birbirinden ayrılamayacak niteliktedir. 600 µm boşluğa sahip Parça 7'de iç parçanın sarkması dolayısıyla iki ile üç adet 200 µm'luk birleşme gelmiştir. Ancak bu birleşmelerin kırılıp parçalar ayrılabilecek boyutta olması dolayısıyla parçalar alıştırılıp fonksiyonelliği sağlaması muhtemeldir. 750 µm boşluklu Parça 6'da sarkma meydana gelmiş ancak parçalar birleşecek boyutta bir sarkma gerçekleşmemiştir.



Resim 5.3. Üst bölge parçaların W bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 6 (b) Parça 7 (c) Parça 8 (d) Parça 10

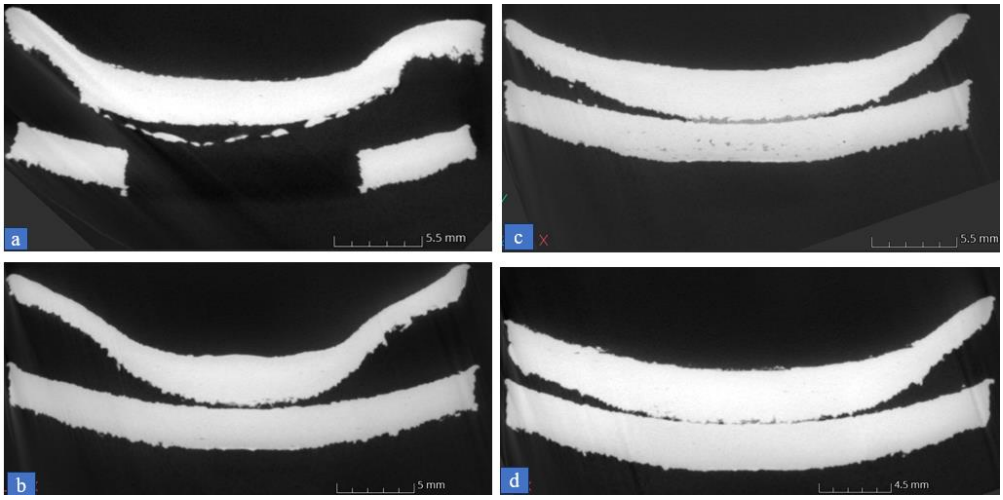
Cooper ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmada (2017) düz numunelerde 490 µm boşlukta birleşme saptanırken, 630 µm ideal üretim boşluk değeri olarak belirlenmişti. Öte yandan iç bükey ve dış bükey formlu numuneler ise 10 mm yarıçapa ve 630 µm boşluğa sahip olup diğer boşluk değerleri için üretim ve testleri gerçekleştirilmemiştir. Bu tez çalışması için üretilen üst bölge parçalara bakıldığında Cooper ve arkadaşlarının çalışmalarının aksine yer yer 500 µm boşluğa sahip parçaların bile fonksiyonel kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. 600 µm boşluklu parçalarda yapışmanın olmadığı ya da hareket ile kırılabilir seviyede olduğu gözlemlenmiş ve kullanılabilir boşluk değeri olduğu saptanmıştır.

CT ölçümleri gerçekleştirilen alt bölge parçalar Çizelge 5.2'de yer almaktadır.

Çizelge 5.2. CT ölçümü gerçekleştirilen alt bölge parçalar

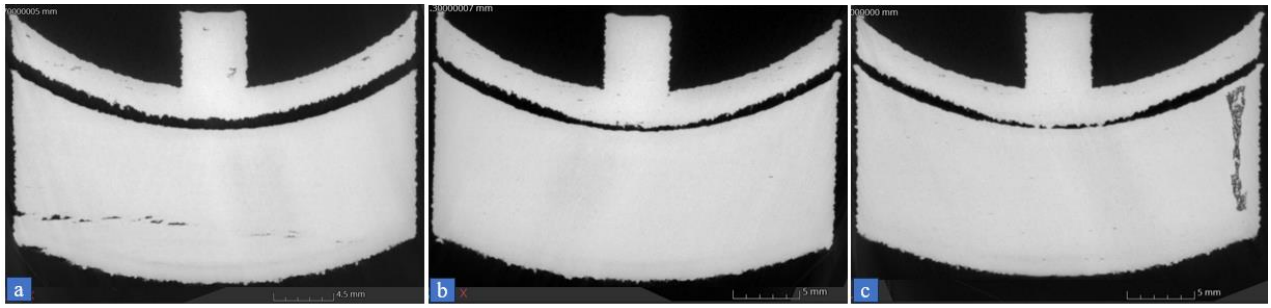
Parça No	Parça Tanımı	Q (µm)	W (µm)
20	A-Q750-W5000	750	5000
21	A-Q600-W5000	600	5000
22	A-Q500-W5000	500	5000
30	A-Q400-W750	400	750
31	A-Q400-W600	400	600
32	A-Q400-W500	400	500

Alt bölge parçaların Q boşlukları incelendiğinde elde edilen CT görüntüleri Resim 5.4.'te yer almaktadır. Nominal Q boşluğu 750 µm olan Parça 20'de sarkma potansiyeli olan iç parçanın kalınlığı fazla olması ve boşluk miktarının ısı transferini sağlamaya yetmeyecek kadar fazla olması dolayısıyla iç parça çok bozulmuş ve gözenekli, bozuk bir yapıya sahip olmuştur. Q boşluğu 600 µm olan Parça 21'de ise ısı transferi yüksek miktarda sağlanıyor ve parçalar arasında yapışma meydana gelmemiş olsa da iç parçada ergime havuzları oluşarak parça formu bozulmuştur. 500 µm Q boşluğuna sahip Parça 22'de üst bölge parçalarda da yaşanıldığı gibi toz tahliyesi sorunu ile karşılaşılmış ancak parçalar arasında birbirine yapışma problemi yaşanmamıştır. 400 µm boşluğuna sahip Parça 30'da iç parçanın sarkması ve formun bozulması ile iç ve dış parça birbirine yapışmıştır.



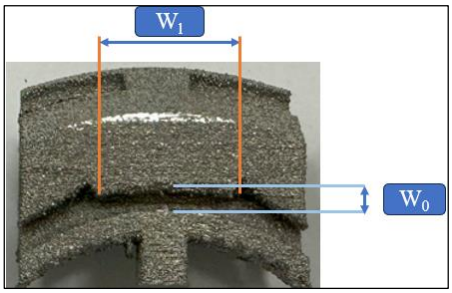
Resim 5.4. Alt bölge parçaların Q bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 20 (b) Parça 21 (c) Parça 22 (d) Parça 30

Resim 5.5.'de alt bölge parçaların W bölgesi CT görselleri yer almaktadır. Parça 32'nin CT görselleri incelendiğinde W bölgesinde iki adet 400-450 µm derinlikli bir tane de 300 µm derinlikli birleşmeler bulunmaktadır. Bu hali ile parçanın birleşmesinin parçayı el ile döndürerek kırılamayacak boyutta olduğu düşünülmektedir. Parça 30'a ve Parça 31'e bakıldığında W bölgesinde sarkma oluşmuş ancak hiçbir birleşmeye rastlanmamıştır.



Resim 5.5. Alt bölge parçaların W bölgesi CT görüntüleri (a) Parça 30 (b) Parça 31 (c) Parça 32

Parçalarda sarkma genişlikleri, minimum boşluk miktarları CT katmanları üzerinden ölçülmüştür. Parçalarda gerçekleştirilen CT ölçümlerinde parçalardaki Q ve W boşluk miktarının her bir ölçüm katmanında ya da aynı katmanda parça üzerinde sabit olmadığı, değiştiği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda çok sayıda ölçüm alınarak sarkma genişlikleri için ortalama değerler saptanmıştır. Çizelge 5.3.'de üst bölge parçaların, Çizelge 5.4.'te alt parçaların ölçüm sonuçları yer almaktadır. Q_l Q bölgesindeki sarkma uzunluğunu, Q_0 Q bölgesinde orta, simetri eksenindeki minimum boşluk miktarını, W_l W bölgesindeki sarkma uzunluğunu, W_0 W bölgesinde orta, simetri eksenindeki minimum boşluk miktarını belirtmektedir (Bkz. Resim 5.6.).



Resim 5.6. Sarkma genişliği ve sarkma uzunluğu ölçülerinin gösterilmesi

Çizelge 5.3. CT ölçümü gerçekleştirilen üst bölge parçaların sarkma miktarları

Parça No	Parça Tanımı	Q (µm)	W (µm)	Q_l (µm)	Q_0 (µm)	W_l (µm)	W_0 (µm)
6	Ü-Q400-W750	400	750	15000	-	13000	475
7	Ü-Q400-W600	400	600	15000	-	11000	326
8	Ü-Q400-W500	400	500	14500	-	7500	225
9	Ü-Q400-W500	400	500	14000	-	14000	-
10	Ü-Q400-W400	400	400	14500	-	15000	-
11	Ü-Q400-W400	400	400	15000	-	15000	-
13	Ü-Q750-W5000	750	5000	16000	660	14500	-
14	Ü-Q600-W5000	600	5000	15500	480	12500	-
15	Ü-Q500-W5000	500	5000	14500	310	12000	-

Çizelge 5.4. CT ölçümü gerçekleştirilen alt bölge parçaların sarkma miktarları

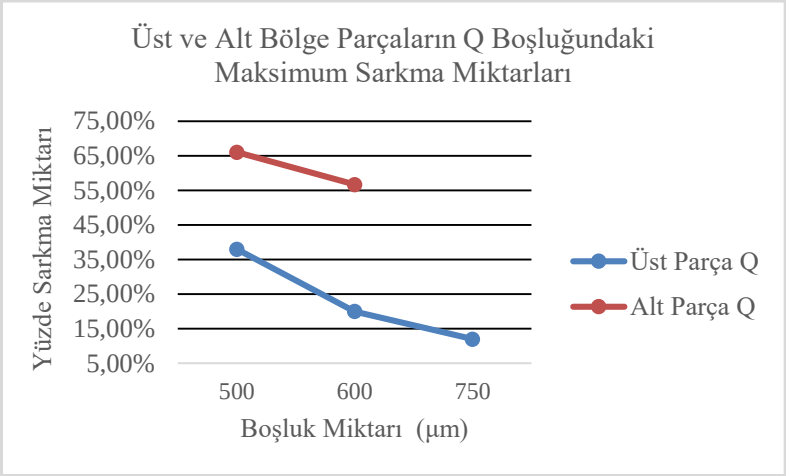
Parça No	Parça Tanımı	Q (µm)	W (µm)	Q_1 (µm)	Q_0 (µm)	W_1 (µm)	W_0 (µm)
20	A-Q750-W5000	750	5000	21500	-	5500	4700
21	A-Q600-W5000	600	5000	18000	260	5500	4800
22	A-Q500-W5000	500	5000	16500	170	5500	4900
30	A-Q400-W750	400	750	15000	-	12000	640
31	A-Q400-W600	400	600	15000	-	10000	450
32	A-Q400-W500	400	500	14000	-	9500	210

Sarkma genişliğine bakıldığında üst bölge parçalarda Q sarkma genişliği 14500- 16000 µm olarak değiştiği görülmektedir. 400 µm boşluk değerinden 750 µm boşluk değerine doğru sarkma genişliği artma eğilimindedir. Alt bölge parçalarda Q sarkma genişliği ise 14000-21500 µm değerleri arasında değişmektedir. İstisnasız 400 µm boşluk değerine sahip tüm parçalarda birleşme meydana gelmiştir ve hem üst hem de alt bölge parçalarda sarkma genişliği yapılan ölçümler sonucunda 14000- 15000 µm olduğu görülmektedir. Sarkma dolayısıyla birleşme meydana gelmeyen 500, 600 ve 750 µm boşluk değerlerinde boşluk miktarı arttıkça sarkma genişliğinin artmaktadır. Üst ile alt bölge parçalar kıyaslandığında alt bölge parçalarda Q bölgesinde sarkma genişliği üst bölge parçalardaki Q bölgesindeki sarkmaya göre 500 µm boşluk değerinde %13, 600 µm boşluk değerinde %16, 750 µm boşluk değerinde %34 daha fazla olmaktadır.

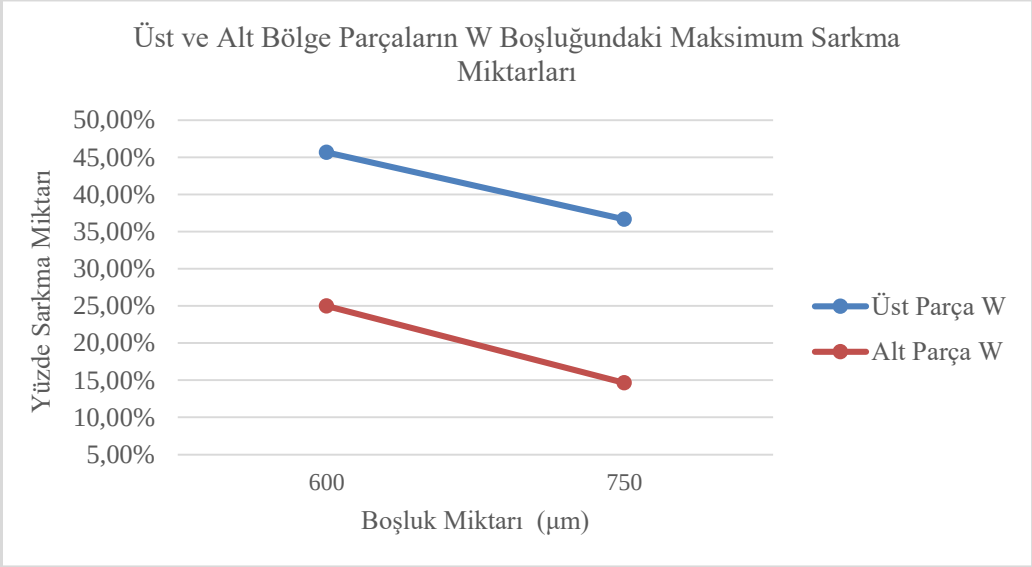
W bölgesinde hem üst hem de alt bölge parçalarda 400 µm ve 500 µm boşluk değerlerinde sarkma dolayısıyla birleşme meydana gelmiştir. W değeri 400 µm olan üst bölge parçalarda W sarkma genişliği 15000 µm'dur. 500 µm boşluk değerine sahip iki üst bölge parçaya bakıldığında Parça 8'de W sarkma genişliği 7500 µm, Parça 9'da ise 14000 µm olmaktadır. 5000 µm W boşluğuna sahip üst bölge parçalarda sarkma genişliği 12000-14500 µm arasındadır. Alt bölge parçalarda ise W boşluk miktarı 500 µm olan Parça 32'de yapışma gerçekleşmiştir. Bu parçadaki W sarkma genişliği 9500 µm'dir. 600 µm W boşluğuna sahip Parça 31'de W sarkma genişliği 10000 µm ,750 µm boşluklu Parça 30'da ise W sarkma genişliği 12000 µm'dir. 5000 µm W boşluğuna sahip Parça 20, Parça 21 ve Parça 22'de W sarkma genişliği 5500 µm'dir.

Temassız destek yapısının etkili olduğu ve yapışmanın olmadığı boşluk miktarlarına bakıldığında hem üst hem de alt bölge parçalarda Q ve W bölgelerinde boşluk miktarı arttıkça sarkma genişliği artmıştır.

Üst ve alt bölge parçalarda Q ve W bölgelerinde 500 µm, 600 µm ve 750 µm boşluk değerlerinde parçaların orta, simetri eksenindeki üretim yönündeki sarkma davranışı incelendiğinde Çizelge 5.3. ve Çizelge 5.4.'den elde edilen sonuçlara göre parçaların yüzdesel maksimum sarkma miktarları hesaplanmıştır. Boşluk miktarlarına göre parçalardaki maksimum sarkma miktarlarının yüzdesel olarak değişim grafikleri Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de yer almaktadır.



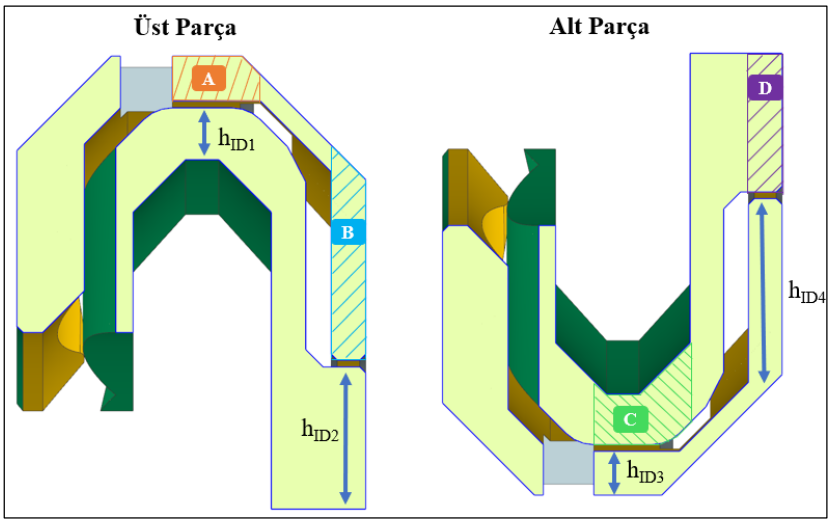
Şekil 5.1. Q boşluklu üst ve alt bölge parçaların maksimum sarkma miktarları



Şekil 5.2. W boşluklu üst ve alt bölge parçaların maksimum sarkma miktarları

Yapılan CT ölçümlerinde üst parça Q bölgesi, üst parça W bölgesi, alt parça Q bölgesi ve alt parça W bölgesi olmak üzere dört farklı bölgeden söz etmek mümkündür (Resim 5.7.). Bu bölgeleri farklı kılan sarkma eğilimli kısımlarının geometrisi ile sarkma eğilimli

malzeme miktarı ve temassız destek yapısı kalınlığıdır. Her ne kadar aynı boşluk miktarına sahip üretimler gerçekleştirilmek istense de geometrik farklılıklar, sarkma eğilimli malzeme miktarı ve temassız destek yapısı kalınlığı sebebi ile bölgelerde gerçekleşen maksimum sarkma miktarları farklıdır. Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de bu davranış net olarak görülmektedir. İç parça ile dış parça arasındaki boşluk miktarı arttıkça yüzdesel sarkma miktarının azaldığı genellemesini yapmak mümkündür. Çalışmalar gerçekleştirilen parçalara bakıldığında en fazla sarkmanın alt parçadaki Q bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. En az sarkma ise üst parçadaki Q bölgesinde meydana gelmektedir. Bu dört bölge için maksimum simetri eksenindeki maksimum sarkma durumunda sıralama yapmak gerekirse sarkma miktarı çoktan aza doğru alt parça Q bölgesi, üst parça W bölgesi, alt parça W bölgesi ve üst parça Q bölgesi şeklindedir. Bu durumun oluşmasının genel sebebi geometri, bölgelerdeki sarkma eğilimli malzeme miktarı ve ısıl destek yapısı gibi davranan temassız destek yapısı kalınlığıdır.



Resim 5.7. Üst ve alt bölge parçaların maksimum sarkma eğilimindeki bölgeleri

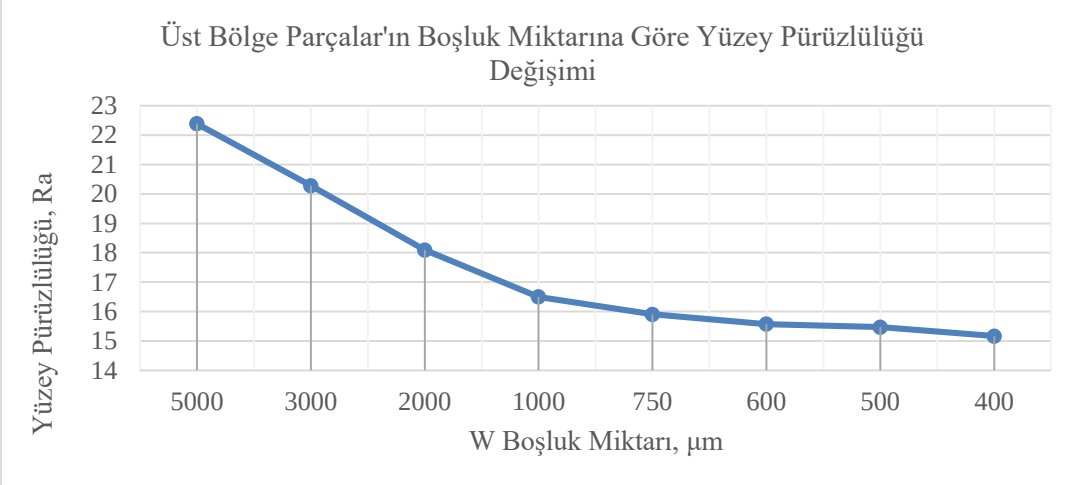
Sabit Q boşluk miktarına sahip ve sabit W boşluk miktarına sahip parçalar olarak kıyaslama yapıldığında maksimum sarkma miktarlarına göre şöyle bir sonuç görülmektedir. 500 µm Q boşluğuna sahip alt parçada yüzdesel maksimum sarkma miktarı üst parçadaki sarkmaya göre %42,42, 600 µm Q boşluğuna sahip alt parçadaki yüzdesel maksimum sarkma miktarı üst parçadaki sarkmaya göre %64,71 daha fazladır. W bölgesinde ise 600 µm boşluğa sahip üst parçadaki yüzdesel maksimum sarkma miktarı alt parçadaki sarkmaya göre %45,26 daha fazladır. 750 µm W boşluk miktarında ise üst parçadaki yüzdesel maksimum sarkma miktarı alt parçadaki sarkmaya göre %60 daha fazla olmaktadır.

Yapılan çalışmadaki hedeflerden bir diğeri temassız destek yapısı olgusunun yüzey pürüzlülüğüne etkisidir. Bu kapsamda üretilen parçaların W bölgelerinde sabit nokta üzerinden yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Üst parçadaki sarkma eğilimli parçaların yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.5.'de, alt parçaların yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 5.6.'da yer almaktadır. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçüm alınmak istenen nokta tüm parçalarda sabit olarak belirlenip, belirlenen noktanın 100-150 µm sağ ve solu olmak üzere en az üçer ölçüm gerçekleştirilip bu değerlerin ortalamasının alınması ile elde edilmiştir.

Çizelge 5.5. Üst parçalarda W bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü değerleri

Parça No	Parça Tanımı	W (µm)	Ra
2	Ü-Q400-W5000-2	5000	21,137
3	Ü-Q400-W3000	3000	20,278
4	Ü-Q400-W2000	2000	18,092
5	Ü-Q400-W1000	1000	16,500
6	Ü-Q400-W750	750	15,908
7	Ü-Q400-W600	600	15,573
9	Ü-Q400-W500-2	500	15,475
10	Ü-Q400-W400-1	400	15,166
13	Ü-Q750-W5000	5000	21,364
14	Ü-Q600-W5000	5000	23,137
15	Ü-Q500-W5000	5000	23,915

5000 µm W boşluğuna sahip Parça 2, Parça 13, Parça 14 ve Parça 15'in yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ortalaması alınarak 5000 µm boşluklu parçaların ortalama yüzey pürüzlülük değeri 22,388 Ra olarak kabul edilmiştir. Üst parçalardaki W boşluk miktarı değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 5.3.'de grafik olarak gösterilmektedir.



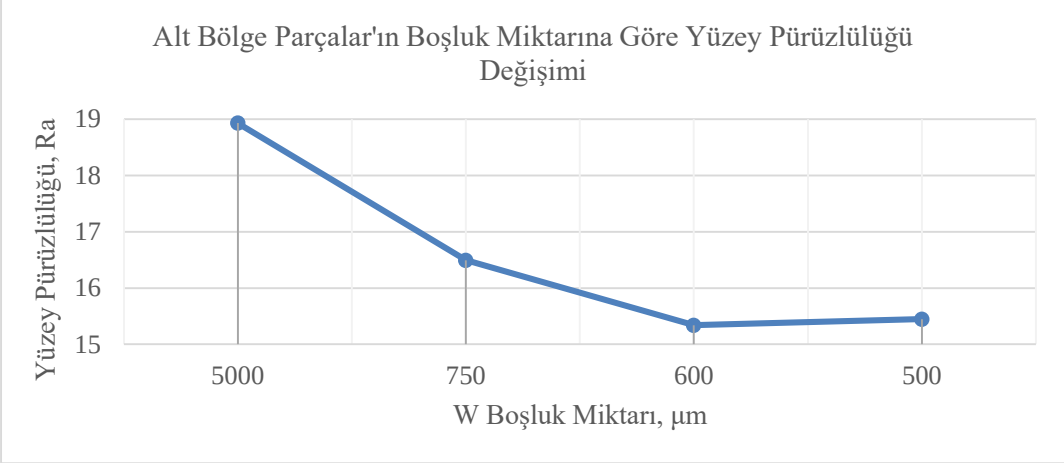
Şekil 5.3. Üst bölge parçalarda boşluk miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Üst bölge parçalara bakıldığında ısı transferinin mümkün olduğu düşünülen 1000 µm- 400 µm boşluk değerleri aralığında boşluk miktarı azaldıkça ısıl direncin azalıp düşey yönde ısı transferinin artması ile parçalardaki yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmektedir. Bu boşluk değerleri arasında 16,5- 15,16 Ra yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Isı transferine etkisi olmadığı düşünülen 5000 µm boşluk değeri için ölçülen 22,388 Ra yüzey pürüzlülüğü değeri ısı transferinin mümkün olduğu 750 µm boşluk değerinde %28,94'lik iyileşme ile 15,9, 600 µm boşluk değerinde %30,44'lik iyileşme ile 15,57, birleşme olmasına rağmen 500 µm boşluk değerinde %30,88'lik iyileşme ile 15,47, birleşme olan 400 µm boşluk değerinde ise %32,26'lık iyileşme ile 15,16 olmaktadır.

Çizelge 5.6. Alt bölge parçalarda W bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü değerleri

Parça No	Parça Tanımı	W (µm)	Ra
33	A-Q500-W5000	5000	18,926
41	A-Q400-W750	750	16,494
42	A-Q400-W600	600	15,340
43	A-Q400-W500	500	15,446

Alt bölge parçalardaki W boşluk miktarı değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 5.4.'te grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Alt bölge parçalarda boşluk miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Alt bölge parçalarda üst bölge parçalarda olduğu gibi boşluk miktarı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü iyileşmiştir. Düşey yönde ısıl direncin yüksek olduğu dolayısıyla ısı transferinin düşük olduğu düşünülen 5000 µm boşluk değerinde 18,926 Ra olan yüzey pürüzlülüğü değeri 750 µm boşluk değerinde %12,85 iyileşerek 16,5 Ra, 600 µm boşluk değerinde %18,9

iyileşerek 15,44 Ra, birleşme olmasına rağmen 500 µm boşluk değerinde %18,4 iyileşerek 15,446 Ra olmuştur.

Üst ve alt bölge parçalarda aynı boşluk miktarlarında benzer yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Bu durum parçaların sarkma eğilimi, geometrisi ve sarkma eğilimindeki malzeme miktarı değişse bile yüzey pürüzlülüğünün etkilenmediğini göstermektedir. Deneyimlenen parametreler içerisinde sadece boşluk miktarının yüzey pürüzlülüğüne etki ettiği, boşluk miktarı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü değerinin düştüğü görülmüştür.

Şekil 5.3. ve Şekil 5.4. grafiklerinde de görüldüğü üzere boşluk miktarı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü de düşmektedir. Literatürde EBM yöntemi ve Ti6Al4V malzemesi kullanılarak üretilmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri 25 Ra ile 130 Ra arasında olduğu belirtilmektedir [12]. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen ölçümlerde parçalar arası mesafe 600 µm ve altına inildiğinde yüzey pürüzlülüğünün 15 Ra mertebelerine inilebildiği gözlemlenmiştir. Öte yandan ısı transferinin mümkün olduğu boşluk miktarlarından 750 µm değerinde de yüzey pürüzlülüğü 16 Ra mertebelerine inmektedir.

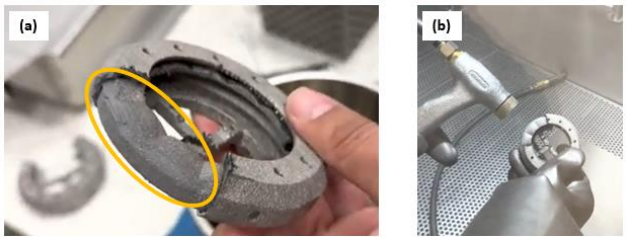
5.2. Tam Dairesel Parçaların Test ve Ölçüm Sonuçları

Üç ayrı sette toplamda on yedi tane tam dairesel parça üretilmiş ve çeşitli metotlarla ölçümleri amaçlanmıştır. Ölçüm metotları olarak bilgisayarlı tomografi (CT), optik mikroskop ve el tipi tarama cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerin sağlıklı gerçekleşmesi ve fonksiyonel olarak dönmenin kontrol edilebilmesi için parçaların EBM cihazında üretimi sonrasında toz geri kazanım sistemi (PRS) ile detaylı bir şekilde temizlenmesi, kullanılmayan tozlardan arınması gerekmektedir. Bu sebeple parçalarda üretimden kalan fazla tozlar ilk olarak PRS ile sonrasında üretim tozu içeren basınçlı hava kaynağı yardımıyla parçadan tahliye edilmiştir.

Tam dairesel parçalardan on bir tanesinde Q bölgesindeki fonksiyonel dönmeyi inceleyebilmek adına W değeri tozun rahat tahliye edilebileceği bir değer olan 5.000 µm olarak belirlenmiştir. Diğer parçalarda W boşluk değeri literatürde yapışma göstermeyen 750 µm olarak üretilmiştir. Sadece Parça 39'da W değeri 500 µm'dur.
Parça 34-39 tam dairesel olarak üretilip W boşluk miktarı Parça 39 hariç 750 µm'dur. Bu değer literatürde yapışma göstermeyen değer olması sebebi ile belirlenmiştir. Bu parçalarda

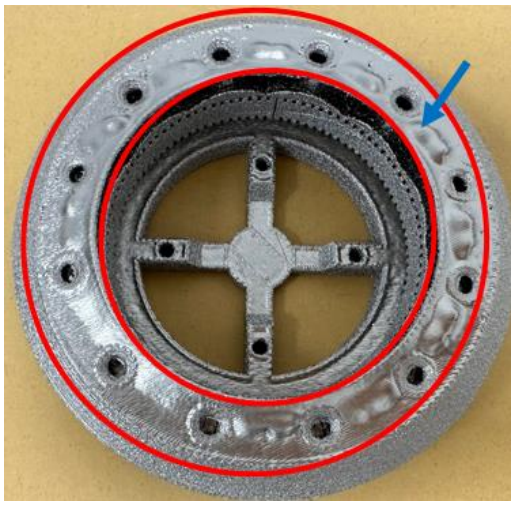
amaç 400 µm, 500 µm ve 600 µm Q boşluk değerlerinde fonksiyonel dönmeyi test etmektir. Bu üretilen parçaların hepsi sorunsuz olarak dönmüştür. Literatüre göre yapışma beklenen 400 µm boşluğa sahip Parça 37, literatürün aksine başarılı bir sonuç elde etmiştir. 400 µm yükseklikteki toz dolu hacim için gerçekleştirilen analizlerde bu yükselikte tozun en alt katmana kadar ergime göstereceği yönünde olmasına rağmen iç parça ile dış parçanın birbirine temassız destek yapısı gibi davranması sebebi ile yapışma meydana gelmeyip fonksiyonel olarak çalışmıştır. Parçaların katı bölgesinde ısıl iletkenlik katsayısının toza göre yüksek olması, yoğunluk değerinin sinterlenmiş toza göre yüksek olması sebebi ile sinterlenmiş tozun üzerindeki ısıyı alt parçaya atımı kolaylaşmıştır. Bu sayede sinterlenmiş tozun alt kısmındaki sıcaklığın ergime sıcaklığı altında kalmasına fayda sağlamış ve parçalar birbirine yapışmamıştır.

5000 µm W boşluk değerine sahip tam dairesel parçalarda Q bölgesindeki fonksiyonel davranış test edilmiştir. Bu parçalardaki Q boşluk miktarı ise en çok 1.000 µm, en az 300 µm olmaktadır. Parça 41 ve Parça 42 birebir aynı ölçülere sahip olmakla birlikte üretim yönleri farklıdır. Parça 41 radyal yönde üretilirken Parça 42 eksenel yönde üretilmiştir. Parçalardaki bir diğer farklılık toz tahliye detaylarıdır. Parça 43, Parça 44, Parça 45 ve Parça 46 aynı Q değerine ancak farklı toz tahliye detaylarına sahiptir. Bu parçaların detaylı PRS işlemleri yapıldıktan sonra dönme kontrolü yapıldığında Parça 41 fonksiyonelliği düzgün sağlayacak şekilde, Parça 42 dalgalı formdaki yüzey bozulmaları dolayısıyla uygun olmayan şekilde dönmüştür. Parça 41 ve Parça 43 ilk aşamada dönmemiştir. Ancak Parça 41 ve Parça 43 kesildikten sonra Q boşluğunun bulunduğu bölgede iç parçaya yapışan ve parçadan ayrılmamış toz öbeklerinin olduğu gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.5.). Dış parçanın bir kısmı kesilip yeniden PRS yapıldığında parçaların hepsi dönmüştür.



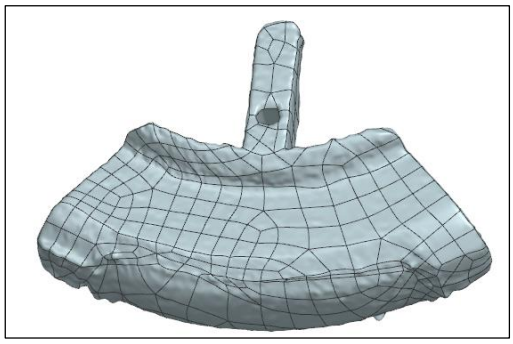
Şekil 5.5. (a) Tahliye edilememiş toz öbeği (b) Parça 41'e PRS uygulaması

Tam dairesel parçalar içerisinden eksenel yönde sadece Parça 42 üretilmiştir. Üretim sonrasında üst yüzeyde yüksek miktarda bozulma Şekil 5.6.'da görülmektedir.



Şekil 5.6. Eksenel yönde üretilen Parça 42'nin üretim görseli

Parça 42 ile aynı ölçülere sahip radyal yönde üretilen Parça 41 kesilip dış ve iç parça içerisindeki toz temizlendikten sonra dış ve iç parçanın birbirine yapışmamış olduğu ve dönme fonksiyonunu sağladığı gözlemlenmiştir. Resim 5.8.'deki tarama modelinde de orta eksende alt bölgede kalan iç parçada bozulma olmadığı görülmektedir.

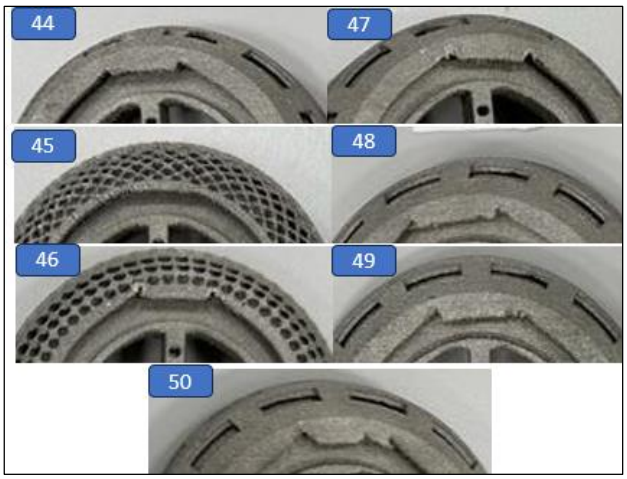


Resim 5.8. Parça 42'nin iç- alt kısmının tarama modeli

Parçaların iç ile dış parçanın birbirine üretim esnasındaki pozisyonunu bozmayacak şekilde sabitlenmesini sağlayan detaylarının olmaması ve parça içerisindeki bozulmaları saptayabilmek için iç-dış parçanın kesilip birbirlerinden ayrılması sebebiyle tarama modellerinden ölçüm alınamamıştır.

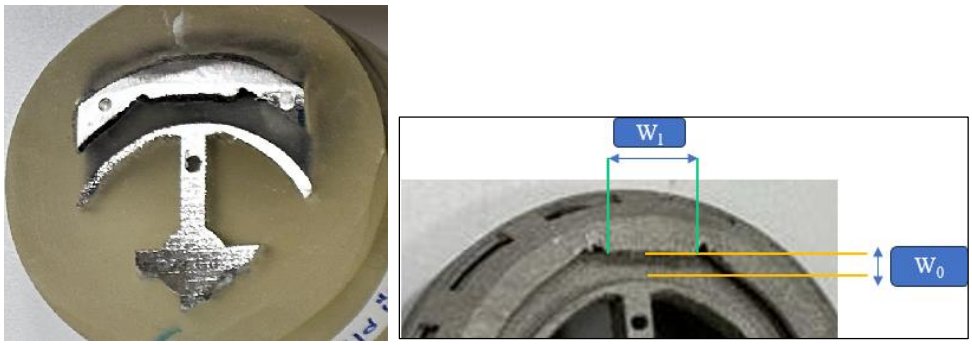
Üst bölgedeki fonksiyonel çalışmayı test etme amacı ile üretilen beşinci üretim setinde PRS işlemi sonrasında bütün parçaların döndüğü gözlemlenmiştir. Parçaların alt bölgesinde iç parçada fazla miktarda sarkma meydana gelmiştir. Bazı parçaların sarkan bölgelerinden

oluşan yüksek sıcaklık ve bu sıcaklığı tahliye edememeden kaynaklı parça kopması meydana gelmiştir. Alt bölgede dış parça olmaması, temassız destek yapısı olmaması, sebebi ile kopmalar oluşmuştur. Öte yandan kafes yapısı ile üretilen parçalarda aynı sette üretilen diğer parçalara göre daha az sarkma gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.7.).



Şekil 5.7. Beşinci set üretimde W bölgesindeki yüzey bozulması

W bölgesindeki sarkmayı ölçmek Kafes yapısına sahip Parça 45 ve Parça 46 parçaları haricindeki diğer parçalar kesilmiştir. Kesilen parçalar Biresin U1419 kullanılarak kalıp içerisine yerleştirilmiş, daha sonrasında zımparalama gerçekleştirilip parçanın optik mikroskop altında W bölgesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 5.8.). Parça 45 ve Parça 46'da dış ve iç parçayı sabitleyebilecek arayüz olmadığı için kesme işlemi gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 5.8. Üst bölgesi zımpara sonrası numunesi ve W sarkma bölgesi ölçüleri

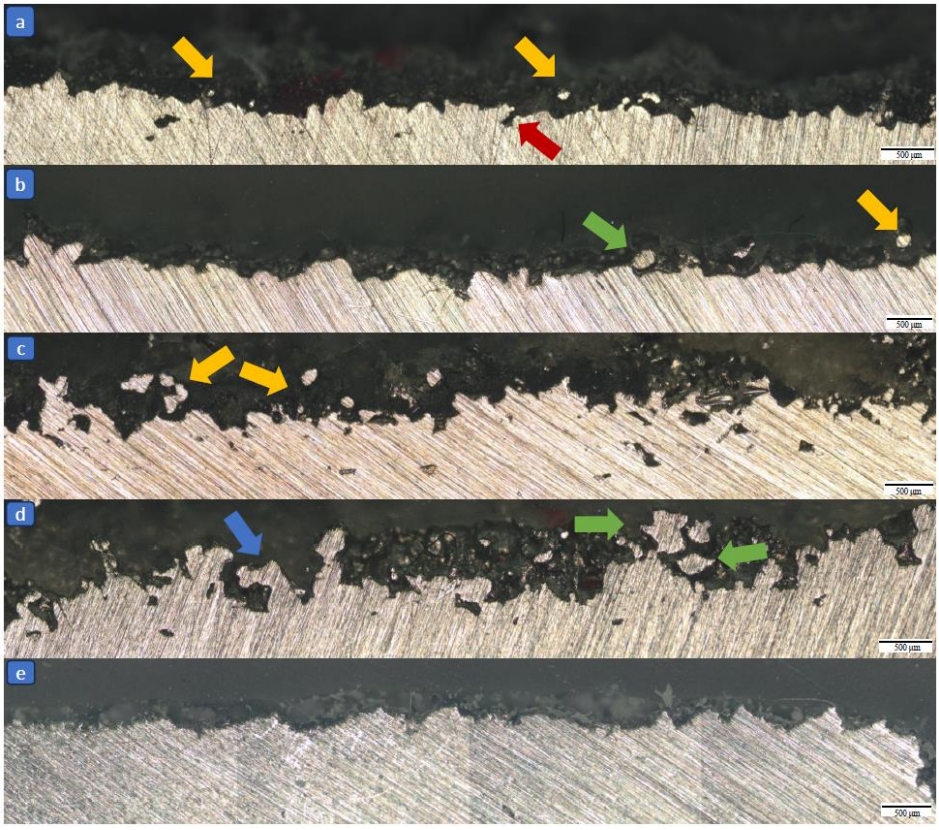
Optik mikroskop altında gerçekleştirilen ölçümlerde elde edilen değerler Çizelge 5.7.'de yer almaktadır. Parçalarda üretim sonrasında gerçekleşen W miktarı W_0, nominal W ölçüsü Wn,

sarkma genişliği ise W_l olarak belirtilmiştir (Bkz. Şekil 5.8.). Ölçümler aynı bölgeden üçer ölçü olarak alınıp ortalama değeri alınmıştır.

Çizelge 5.7. Beşinci sette üretilen parçaların W bölgesi ölçüm sonuçları

Parça Numarası	Parça Tanımı	W_0 (μm)	Wn (μm)	W_l (μm)
44	T-Q450-W5000	4710	5000	14314
47	T-Q400-W5000	4560	5000	13588
48	T-Q350-W5000	4360	5000	14731
49	T-Q300-W5000	4370	5000	13558
50	T-Q450-W5000	4510	5000	11172
		W_0,ort: 4502 μm		W_l, ort: 13472 μm

Optik mikroskop altında parçalar incelendiğinde sarkma potansiyeli olan dış parçanın alt yüzeyinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yüksek olmasına sebep olan bazı yapılar gözlemlenmiştir. Resim 5.9.'da Parça 44, Parça 47-50'in optik mikroskop altındaki görüntüleri yer almaktadır. Sarı okla gösterilen yapılar ek parçacıklardır. Neredeyse numunelerin tamamında bulunmaktadır. Çelik ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada açı, mesafeden bağımsız olarak bu yapıların oluştuğunu belirtmiştir. Yeşil okla gösterilen yapılar baloncuklanma fenomenidir. Yaklaşık orta eksenin 2 mm yanında yani 2°'lik açıya denk gelen kısımda Parça 47 ve Parça 49'da baloncuklanma fenomeninin oluştuğu gözlemlenmiştir. Çelik ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada özellikle 30° ve 15° açıya sahip parçalarda daha sık baloncuklanma fenomenine rastlamışlar. Mavi ok ile gösterilen yapılanma ise mantar benzeri yapı olarak adlandırılmıştır. Bu yapıya Parça 50'de rastlanmıştır. Kırmızı ok ile gösterilen yapı ise derin çatlak olarak adlandırılmış olup sadece Parça 47'de bu yapıya rastlanmıştır. Genel itibari ile pek derin çatlak yapısı olmadığı rahatlıkla söylenebilir. Derin çatlakların bu denli oluşmamasında hem temassız destek yapısının faydasının olduğu hem de Çelik'in DMLM yöntemi kullanımının aksine EBM yönteminin avantajlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle DMLM'de ön ısıtma olmaması dolayısıyla üretim esnasında gözenekler oluşması ve soğuma esnasında termal gradyanın fazla olması dolayısıyla çatlamaların oluştuğu düşünülmektedir. EBM'de DMLM'in aksine gerçekleştirilen ön ısıtma prosesi mikro çatlak oluşum ihtimalini azalttığı düşünülmektedir.



Resim 5.9. Beşinci set üretimdeki parçaların W bölgesinin Optik mikroskop altında kesit görüntüleri (a) Parça 44 (b) Parça 47 (c) Parça 48 (d) Parça 49 (e) Parça 50

5.3. Tozda Isıl İletim Analiz Sonuçları

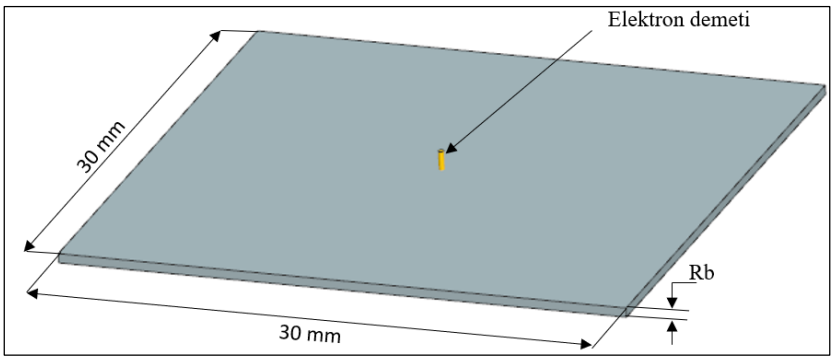
Üretim esnasında parçada bulunan boşluklar toz ile dolu olmaktadır. Boşluklarda bulunan tozlar parçaları üretim esnasında pozisyonunun bozulmaması açısından desteklediği gibi bazı boşluk değerleri iletim ile ısı transferi açısından da yardımcı olmaktadır. Öte yandan üretim esnasında elektron demetinin parçayı üretirken toz yığını üzerine enerji göndermesi ile toz bölgesi ergimeye başlayıp sıcaklığı alt katman tozlara kadar iletmektedir. Yapılan bu analiz çalışmasında ergimenin gerçekleşip parçaya yapışmanın oluştuğu sınır boşluk değerinin saptanması amaçlanmıştır.

Tozdaki iletim yolu ile ısı transferi senaryosunun çözümlendiği analiz çalışmaları Ansys Fluent üzerinden gerçekleştirilmiştir. Davranışının incelenmesi hedeflenen toz ile dolu boşluğun yüksekliğinde eni 30 mm ve boyu 30 mm olan toz dolu hacim tanımlanmıştır (Resim 5.10.). Analiz gerçekleştirilen toz dolu hacmin yükseklikleri fonksiyonel olarak çalışması test edilecek boşluk değerleri olup 400 µm, 500 µm, 600 µm ve 750 µm olarak belirlenmiştir. Hacmin üst orta noktasından elektron demeti uygulanmış olup ışın çapı 300 µm, etki derinliği 75 µm ve gücü 900 W olarak tanımlanmıştır. Sınır koşulları olarak toz

dolu hacmin sıcaklığı 730 ºC, vakum ortamında ve dış yüzeyler için emisyon katsayısı 0,8 olarak tanımlanmıştır. Yoğunluk ortalama olarak 4250 kg/m^3 alınmıştır. Toz iletim değeri ile özgül ısı için Çizelge 5.8.'deki fonksiyonlar tanımlanmıştır.

Çizelge 5.8. Ti-6Al-4V Termo-fiziksel özellikler [41]

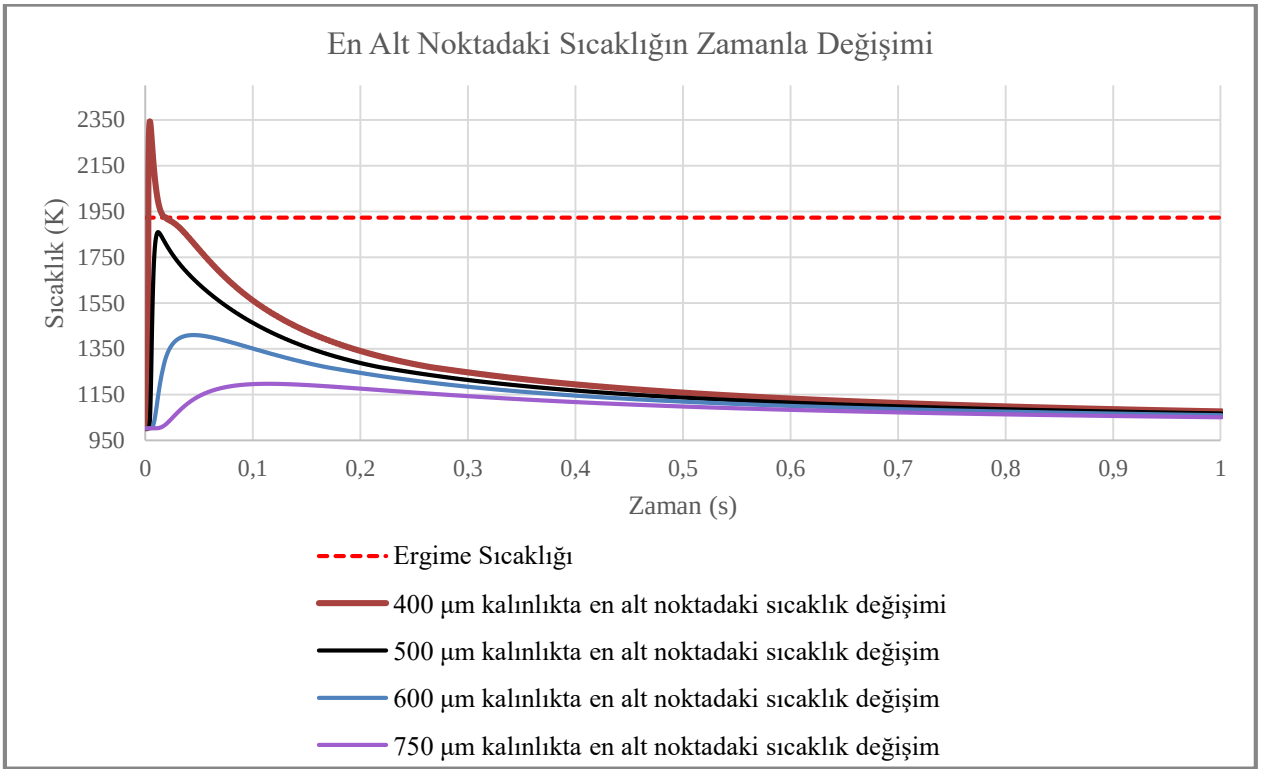
Termo-fiziksel Özellik	Değer/ Fonksiyon		Birim
Toz iletim değeri	$0.0011 \times T + 0.3585$ $-12.75 + 0.024 \times T$	$T \leq 1923$ $T > 1923$	W/ (mK)
Özgül ısı	$483.04 + 0.215 \times T$ $412.7 + 0.1801 \times T$ 831	$T \leq 1268$ $1268 < T \leq 1923$ $T > 1923$	J/ kg K
Solidüs sıcaklığı	1877		K
Likidüs sıcaklığı	1923		K



Resim 5.10. Toz üzerinde gerçekleştirilen ısıl analiz modeli

Gerçekleştirilen ısıl analiz senaryosunda sinterlenmiş toz üzerine elektron demeti zaman aralığı (time step) 0.1 ms olarak ayarlanmış, 1 ms (10 zaman aralığı) boyunca uygulanmıştır. Sonrasında elektron demeti çekilip analiz 1 sn boyunca analiz koşturulmaya devam etmiştir. Bu süre zarfında toz hacminin belirlenen yükseklik boyunca sıcaklık değişimi düşey eksende incelenmiştir. Düşey eksen, parçanın boşluğunu simüle etmektedir. Üretim esnasında sinterlenmiş toz dolu olan boşlukta elektron demetinin kaynak olarak uygulandığı en üst bölgeden, 0 noktası, en alt boşluğun bittiği bölgeye doğru sıcaklık dağılımları incelenmiştir. En alt noktada ergime sıcaklığının üzerinde değer saptanması parçada ergimenin gerçekleştiği, boşluğun en üst noktasından en alt noktasına kadar sürdüğü ve sonrasında soğuma ile katılaşmanın gerçekleşmesiyle yapışma olduğunun göstergesidir. Böyle bir senaryoda parçanın boşluk bölgesindeki tozun en alt noktaya kadar eridiği, iç ve dış parçanın birbirine yapışıp dönme fonksiyonunu yerine getiremeyeceği anlamına gelmektedir. Şekil

5.9.'da 400 µm, 500 µm, 600 µm ve 750 µm kalınlığındaki toz bölgelerinde en alt katmandaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi yer almaktadır.



Şekil 5.9. 400 µm, 500 µm, 600 µm ve 750 µm kalınlığındaki toz bölgelerinde en alt katmandaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi

400 µm yükseklikli toz bölgesinde en alt noktanın zamana bağlı sıcaklık değişimine bakıldığında o bölgenin yaklaşık 2350 K değerlerine ulaştığı ve 1 sn sonrasında sıcaklığın 1100 K mertebelerine doğru azaldığı görülmektedir (Şekil 5.9.). 400 µm yükseklikli toz bölgesinde elektron demetinin en üst katmandan tozu ısıtması ile en alttaki 400 µm bölgesindeki katmandaki tozun da ergime sıcaklığının üzerine çıktığı sonucuna analizlerle varılmaktadır.

500 µm yüksekliğindeki toz bölgesinde en alt noktadaki sıcaklığın zamana bağlı değişimine bakıldığında ise 1 sn içerisinde 1850 K sıcaklık değerinden 1100 K sıcaklık değeri seviyesine indiğini gözlemlemek mümkündür (Şekil 5.9.). En alt nokta ergime sıcaklığı değerine çok yakın olması dolayısıyla bu yükseklik değeri risk teşkil etmektedir.

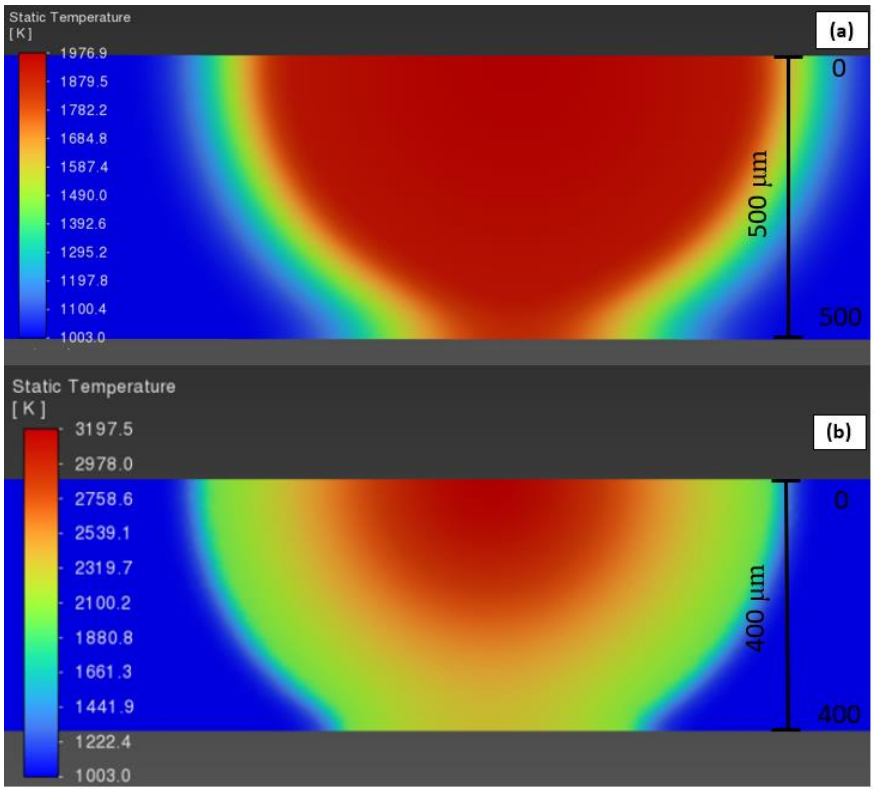
600 µm yüksekliğindeki toz bölgesinde aynı şartlar altındaki en alt katmandaki sıcaklık 1 sn içerisinde 1420 K sıcaklığından 1100 K sıcaklık değerine zaman içerisinde düşmektedir

(Şekil 5.9.). Bu değerler ergime sıcaklığı altında olması dolayısıyla en alt katmana kadar ergime riski bulunmamaktadır.

750 µm yüksekliğindeki toz bölgesindeyse en alt katmandaki sıcaklık 1 sn içerisinde 1200 K sıcaklığından 1050 K sıcaklık değerine zaman içerisinde düşmektedir (Şekil 5.9.). Bu değerler ergime sıcaklığının oldukça altında olması dolayısıyla en alt katmana kadar ergimediğini ve bu sayede iç ve dış parçanın birbirine yapışmadığını söylemek mümkündür.

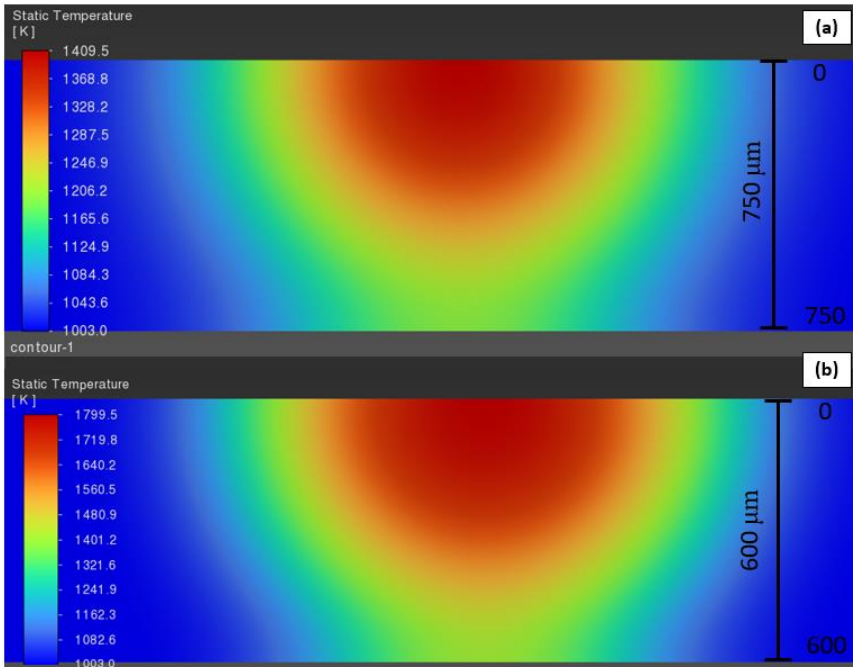
400 µm ve 500 µm yüksekliğindeki toz bölgelerinin anlık sıcaklık dağılımı Resim 5.11'de, 600 µm ve 750 µm yüksekliğindeki toz bölgelerinin anlık sıcaklık dağılımı ise Resim 5.12'de gösterilmektedir.

Resim 5.11'de görüldüğü üzere 400 µm toz yüksekliği için gerçekleştirilen analizde en alttaki 400 µm noktasında 2000 K üzerinde, 500 µm toz yüksekliği için gerçekleştirilen analizde en alttaki 500 µm noktasında ise 1850 K civarlarında sıcaklık değeri görülmektedir.



Resim 5.11. (a) 400 µm (b) 500 µm Ti-6Al-4V sinterlenmiş tozu üzerinde oluşan ergiyik havuzdaki sıcaklık dağılımı

Resim 5.12'ye bakıldığında ise 600 µm toz yüksekliği için gerçekleştirilen analizde en alttaki 600 µm noktasında 1420 K civarlarında, 750 µm toz yüksekliği için gerçekleştirilen analizde ise en alttaki 750 µm noktasında 1200 K civarlarında sıcaklık değeri görülmektedir.



Resim 5.12. (a) 600 µm (b) 750 µm Ti-6Al-4V sinterlenmiş tozu üzerinde oluşan ergiyik havuzdaki sıcaklık dağılımı

Tez çalışmasında kullanılan elektron demeti ile ergitme cihazında birçok parametre cihazın kendi algoritması ile oluşturduğu değer olup cihaz anlık olarak değiştirmektedir. Bu sebeple bazı verilerin cihazdaki hali ile verilmesi pek mümkün olamamaktadır. Yapılan analizlerde bu değerler sabit olarak alınıp farklı yüksekliklerdeki toz hacimlerinde iletim ile olan ısı transferlerinin birbirine göre kıyaslamasının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda parça üretilirken minimum boşluğun hedeflendiği bölgelerdeki sinterlenmiş toz üzerindeki katman üretilirken bu boşluğu dolduran sinterlenmiş toza tesiri incelenmiş ve 400 µm toz bölgesinde tozun en alt kısmına kadar ergime sıcaklığının üzerinde sıcaklık değerinin oluştuğu ve bu sayede tozun ergiyip parçaya yapışacağı sonucuna varılmıştır. 500 µm toz bölgesinde ise en alt katman ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklık değerine ulaşmıştır. Tahmin edilemeyen ve yansıtılamayan parametreler dolayısıyla çok hassas bir analiz yapılamadığı için bu değerde risk olma ihtimalinin yüksek olacağı saptanmıştır. 600 µm ve 750 µm kalınlıklı modellerde en alt tablada, ergime sıcaklığı üzerinde bir sıcaklığa erişilmediğinden döner parçanın iç ve dış parçasında boşlukta yapışmayacağı kanısına varılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında EBM metodu ve Ti6Al4V malzemesi kullanılarak radyal yönde üretilebilir minimum boşluklu döner yapı araştırılması gerçekleştirilmiş ve boşluk miktarının parçadaki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda tam dairesel parçalar ile üst ve alt parçalar farklı boşluklarda üretilip parça bozulması, karakterizasyonu, yüzey pürüzlülüğü gibi değerler açısından incelenmiştir. CT, optik mikroskop, tarama cihazı ile ölçüm gibi ölçme aletlerinden faydalanılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Çalışmalar konvansiyonel üretim metotlarına uygun olarak tasarlanıp üretilmiş muadil döner yapı sınırlılıkları içerisinde gerçekleştirilmiştir. Muadil yapı eklemeli imalata uygun olacak şekilde topoloji optimizasyonu yardımı ile sadeleştirilmiştir. Bu kapsamda %85'lik ağırlık azalması meydana gelmiştir.
- 400 µm, 500 µm, 600 µm ve 750 µm yükseklikli toz hacmine elektron kaynağı uygulandığında ısıl analiz sonuçlarına göre 400 µm toz yüksekliği olan modelde 400 µm boyunca her noktada okunan sıcaklık değeri ergime sıcaklığından fazla olmaktadır. Bu durum 400 µm boşluklu parçada üretim esnasında modeldeki boşlukta bulunan tozun ergiyip iç ve alt parçanın birbirine yapışacağı anlamına gelmektedir. 500 µm boşlukta ise okunan sıcaklık değerleri ergime sıcaklığına yakın olması dolayısıyla risk teşkil etmektedir. Ancak boşluğun altında bulunan dış ya da iç parça temassız destek yapısı davranışı gösterdiği için 400 µm ve 500 µm boşluklu tam dairesel parçalarda iç ve dış parçalar birbirine yapışmamış olup fonksiyonel olan dönme davranışlarını yerine getirebilmektedir.
- Küçük alt ve üst parçalardan 400 µm boşluklu parçalar CT sonuçlarına göre yapışmış görünmektedir. Ancak 400 µm boşluklu tam dairesel parçalarda yapışma gözlemlenmemiştir. Parça tam dairesel formda olduğunda temassız destek yapısı hacminin fazla olması sebebi ile bu durumun ısı transferine pozitif etki yaratıp yapışma meydana gelmemiş olduğu düşünülmektedir.
- Küçük üst ve alt parçalarda yapışmanın meydana gelmediği en küçük boşluk değeri Q bölgesinde 500 µm, W bölgesinde 600 µm'dir. Tam dairesel parçalarda ise denenen parçalar içerisinde dönebilen en küçük boşluk değeri 400 µm'dur.
- Aynı boşluğa sahip alt parçalardaki sarkma miktarı üst parçalardan daha fazladır.

- Alt parçaların üst parçalara göre yüzdesel maksimum sarkma miktarı üst parçalara göre en az % 40- %60 daha fazladır.
- Radyal yönde üretilen silindirik yapılarda boşluk miktarı arttıkça radyal yönde sarkma azalırken üretim yönüne dik eksendeki sarkma genişliği artmaktadır. Boşluk arttıkça toz bölgesinde ısıl direncin, katı bölgeye göre daha yüksek olması sebebi ile üretim esnasındaki ısının bir kısmının yandaki katı bölgeye aktardığı, katı bölgenin ergiyip yüzey gerilimi ve yer çekimi ile birlikte aşağı doğru aktarılmasıdır.
- Boşluk miktarı arttıkça parçaların formunun daha fazla bozulma sebebinin ısıl direncin artması, ısı transferinin azalması ve temassız destek yapısı etkisinin azalması olduğu düşünülmektedir.
- Parçadaki ısıl direnç azaldıkça ve ısı transferi arttıkça yüzey iyileşerek yüzey pürüzlülüğü miktarı azalmaktadır.
- Parçaların iç bükey ya da dış bükey olmasından bağımsız aynı boşluk miktarında benzer yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.
- 500- 750 μm boşluk değerleri için üst ve alt parçalarda yüzey pürüzlülükleri 15-16,5 Ra arasında gelmektedir.
- Bölgelerdeki sarkma davranışına sarkma etki eden parametreler sarkma eğilimli malzeme miktarı, ısıl destek yapısı gibi davranan temassız destek yapısı kalınlığı ve yüksekliğidir.
- Birim malzeme miktarına düşen ısıl destek yapısı yüksekliği miktarı arttıkça sarkma davranışı azalmıştır.
- 400-750 μm boşluklu bütünleşik parçaların EBM yöntemi ile üretilmesinde toz tahliyesinin zor olduğu gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen fazlı toz tahliyesi yapıları içerisinde toz tahliyesi açısından en uygun tasarım yaklaşımının kafes yapılar olduğu kanısına varılmıştır.
- Isı transferini artırması dolayısıyla kafes yapıların kullanımının sarkmayı azalttığı gözlemlenmiştir. Üretilen BCC ve truncated cube kafes yapıları içerisinden BCC yapının en az sarkma davranışı gösteren yapı olduğu belirlenmiştir.
- Tam dairesel parçaların üst ve alt parçalarının sarkma eğilimli bölgesi bölgesi optik mikroskop altında incelendiğinde DMLM yönteminde olduğu gibi ek parçacıkların yapıya yapışması, baloncuklanma fenomeni, tersine mantar benzeri yapılar oluşmuştur. Literatürde yer alan DMLM çalışmasının aksine tez çalışmasında derin

mikro çatlaklara rastlanmamıştır. Bunun sebebinin EBM yöntemindeki ön ısıtmanın gerçekleştirilmesidir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması ile destek yapısının kullanılmasının imkansız olduğu bütünleşik silindirik yapıların üretimsel açıdan zor olan radyal yönde kendi kendine temassız destek yapısı gibi davrandığı gözlemlenmiştir. Üretilebilir minimum boşluk değerinin 400 μm olduğu saptanmıştır. Bu boşluk değerinin sağlıkla üretilebilmesi için kritik olan parametreler saptanmış ve yüzey pürüzlülüğü gibi olgulara boşluk miktarının etkisi ölçülmüştür. Elde edilen bu verilerin metal eklemeli imalat yöntemleri alanında çalışan araştırmacılar için faydalı olacağı kanaatine varılmıştır. Bu veriler konvansiyonel metot için tasarlanmış ve üretilmiş muadil yapının dış boyutları üzerinden tasarlanan numuneler için elde edilmiştir. Başka araştırmacıların tarafından farklı çap değerleri için de benzer çalışmanın gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca farklı kalınlığa sahip numuneler ile kontrollü deney gerçekleştirilerek numune sayısının artırılması gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarının güvenilirliğini artıracaktır. Aynı çalışma DMLM gibi diğer metal eklemeli imalat yöntemleri için de gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, *11*(2), 1687814018822880.

2. Çelik, A., Tekoğlu, E., Yasa, E., & Sönmez, M. Ş. (2022). Contact-free support structures for the direct metal laser melting process. *Materials*, *15*(11), 3765.

3. Ameen, W., Al-Ahmari, A., Mohammed, M. K., & Mian, S. H. (2018). Manufacturability of overhanging holes using electron beam melting. *Metals*, *8*(6), 397.

4. Hashmi, A. W., Mali, H. S., & Meena, A. (2023). Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review. *Materials Today: Proceedings*, *81*, 723-738.

5. Gao, X., Okigami, F., Avedissian, N., & Zhang, W. (2024). An experimental and modeling study on warping in additively manufactured overhang structures. *Additive Manufacturing*, *81*, 104017.

6. Ameen, W., Al-Ahmari, A., & Mohammed, M. K. (2019). Self-supporting overhang structures produced by additive manufacturing through electron beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *104*, 2215-2232.

7. Godec, D., Gonzalez-Gutierrez, J., Nordin, A., Pei, E., & Ureña Alcázar, J. (2022). *A guide to additive manufacturing*. (1st edition.) Cham: Springer Nature, 324.

8. Cooper, K., Steele, P., Cheng, B., & Chou, K. (2017). Contact-free support structures for part overhangs in powder-bed metal additive manufacturing. *Inventions*, *3*(1), 2-12.

9. Bandyopadhyay, A. (2015). *Additive Manufacturing*. (1st edition). Newyork: CRC Press, 1-3.

10. İnternet: American Society for Testing and Materials (ASTM), 7 Families of Additive Manufacturing. URL: https://www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/7_families_print_version.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.01.2024.

11. İnternet: Eklemeli İmalat URL: https://www.phillipscorp.com/eos/industrial-3d-printers, Son Erişim Tarihi: 08.12.2023.

12. ISO/ASTM. (2021). ISO/ASTM 52900:2021(en) - Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary.

13. Yakout, M., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2018). A review of metal additive manufacturing technologies. *Solid State Phenomena*, *278*, 1-14.

14. Ahn, D.-G. (2021). Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *8*(2), 703-742.

15. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, *117*, 371-392.

16. Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, *11*(3), 1213.

17. Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., & Zhang, J. (2018). Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *27*(1), 1-13.

18. Ahn, D. G. (2016). Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *3*, 381-395.

19. Malekipour, E., & El-Mounayri, H. (2018). Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *95*, 527-550.

20. Jhabvala, J., Boillat, E., André, C., & Glardon, R. (2012). An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *59*, 137-142.

21. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2015). Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, *5*, 77-84.

22. Kooistra, G. W., Deshpande, V. S., & Wadley, H. N. (2004). Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium. *Acta Materialia*, *52*(14), 4229-4237.

23. Del Guercio, G., Galati, M., & Saboori, A. (2021). Electron beam melting of Ti-6Al-4V lattice structures: correlation between post heat treatment and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *116*, 3535-3547.

24. Wadley, H. N., Fleck, N. A., & Evans, A. G. (2003). Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. *Composites science and technology*, *63*(16), 2331-2343.

25. Yasa, E., Yılmaz, O., Kayacan, M. C., Saklakoğlu, İ. E. (2024). *Tasarım felsefesini değiştiren yeni bir imalat anlayışı-eklemeli imalat*. (1. Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 283-285.

26. Pei, E., Kabir, I., Breški, T., Godec, D., & Nordin, A. (2022). A review of geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) of additive manufacturing and powder bed fusion lattices. *Progress in Additive Manufacturing*, *7*(6), 1297-1305.

27. Wang, X., Zhang, Y., Xu, H., & Li, X. (2021). Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed–fused lattice structures: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(7-8), 2179-2198.

28. Letov, N., & Fiona Zhao, Y. (2023). Beam-based lattice topology transition with function representation. *Journal of Mechanical Design*, *145*(1), 011704.

29. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., & Raymont, D. (2012). Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *62*, 32-38.

30. Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2013). A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *66*, 1247-1254.

31. Brennan, M. C., Keist, J. S., & Palmer, T. A. (2021). Defects in metal additive manufacturing processes. *The Journal of Materials Engineering and Performance*, *30*, 4808-4818.

32. Charles, A., Elkaseer, A., Müller, T., Thijs, L., Torge, M., Hagenmeyer, V., & Scholz, S. (2018, September). A study of the factors influencing generated surface roughness of downfacing surfaces in selective laser melting. In *Proceedings of the World Congress on Micro and Nano Manufacturing (WCMNM), Portorož, Slovenia*. 3(4), 5.

33. Joshi, S., Martukanitz, R. P., Nassar, A. R., & Michaleris, P. (2023). Metal Additive Manufacturing Processes–Laser and Electron Beam Powder Bed Fusion. In *Additive Manufacturing with Metals: Design, Processes, Materials, Quality Assurance, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 59-109.

34. Fousová, M., Vojtěch, D., Doubrava, K., Daniel, M., & Lin, C. F. (2018). Influence of inherent surface and internal defects on mechanical properties of additively manufactured Ti6Al4V alloy: Comparison between selective laser melting and electron beam melting. *Materials*, *11*(4), 537.

35. İnternet: ARCAM AB, Arcam A2X. URL: http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcam, Son Erişim Tarihi: 10.02.2024.

36. İnternet: Creaform Ametek. URL: https://www.creaform3d.com/en, Son Erişim Tarihi: 06.03.2024.

37. İnternet: OSTENCO, Center of Testing Machine. URL: https://www.ostenco.co.id/images/Broshure-pdf/METKON_ECOPRESS_100.pdf, Son Erişim Tarihi: 04.06.2024.

38. İnternet: Evident. URL: https://www.olympus-lifescience.com, Son Erişim Tarihi: 06.03.2024.

39. İnternet: Mitutoyo. (2012, Nisan). Surface Roughness Measuring System Surfest SV-3100 Series. URL: https://www.mitutoyo.com/Images/003/316/2068_SV-3100.pdf, Son Erişim Tarihi: 06.03.2024.

40. İnternet: RX Solutions. Easytom xl CT Scanner. URL: https://www.rxsolutions.com/en/products/easytom-xl-micro-1195, Son Erişim Tarihi: 05.01.2024.

41. Zhang, T., Li, H., Liu, S., Shen, S., Xie, H., Shi, W., ... & Wei, M. (2018). Evolution of molten pool during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *52*(5), 055302.



Gazili olmak ayrıcalıktır