



**BÜTÜNLEŞİK DÖNER MAFSALLARIN ELEKTRON ERGİTMELİ
EKLEMELİ İMALATA GÖRE TASARIMI**

Umut GÖVEZ

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2020

Umut GÖVEZ tarafından hazırlanan BÜTÜNLEŞİK DÖNER MAFSALLARIN ELEKTRON ERGİTMELİ EKLEMELİ İMALATA GÖRE TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

İkinci Danışman: Dr. Enver TAN

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Doç.Dr. İhsan TOKTAŞ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

Üye: Doç.Dr. Tunç APATAY

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/10/2020

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

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Umut GÖVEZ

27/10/2020

BÜTÜNLEŞİK DÖNER MAFSALLARIN ELEKTRON ERGİTMELİ EKLEMELİ İMALATA GÖRE TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Umut GÖVEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2020

ÖZET

Eklemeli imalat teknolojisi ile birlikte endüstride geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesi zor ve maliyetli parçaların üretimi kolaylaşmış, karmaşık geometriye sahip, bütünleşik ya da gözenekli parçaların üretimi mümkün hale gelmiştir. Geleneksel yöntemler ile çok parçalı yapıda olan parçaların bütünleşik olarak tek parça olarak üretilebilir olması çeşitli uygulamalarda üstünlükler sunmaktadır. Bu tez çalışmasında, eklemeli imalata yönelik bütünleşik döner mafsalları tasarım yaklaşımları önerilmiştir. Geliştirilen tasarım yaklaşımları, eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan toz yataklı elektron ışın ergitme (EBM) yönteminde uygulanmıştır ve eklemeli imalata uygun tasarım kuralları ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, EBM cihazın bütünleşik üretim yeteneklerini görmek ve sistemin genel ölçüsel hata payını belirlemek için üzerinde bütünleşik yapılar da içeren bir test parçası üretilmiş ve bu test parçasının boyutsal ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, endüstriyel bir ürünün çalışma şartlarına uygun üretilebilmesi için gerekli olan toleranslandırmaların bütünleşik döner mafsallar üzerinde uygulanabilirliği de çalışılmıştır. Uygulama için 5 farklı bütünleşik döner mafsalları tasarımı gerçekleştirilmiştir. Toleranslandırmalar için ISO Fit tablosundan faydalanılmıştır. Tolerans aralıkları test parçasının ölçüm sonuçlarından elde edilen sistemin genel ölçüsel hata miktarının üzerinde ya da eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen 18mm çaptaki 5 farklı tasarıma sahip döner mafsalların ise üretim sonrası yatak boşlukları kurulan deney düzeneği ile ölçülmüş, üretim öncesi toleranslar ile karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre farklı tasarım yaklaşımları sayesinde bütünleşik döner mafsallarda elde edilen en düşük boşluk değeri 10 µm olarak ölçülmüştür.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, elektron ışını ergitme, bütünleşik döner mafsalları
Sayfa Adedi : 69
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ
İkinci Danışman : Dr. Evren TAN

DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF CONSOLIDATED REVOLUTE
JOINTS FOR ELECTRON BEAM MELTING

(M. Sc. Thesis)

Umut GÖVEZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2020

ABSTRACT

With additive manufacturing technology, the production of difficult and costly parts, which are difficult to manufacture with traditional production methods in the industry, has become easier, and production of complex or integrated or porous parts has become possible. The parts, which are in a multi-part structure, can be produced as one piece as a whole, offers advantages in various applications. In this thesis, revolute joint design approaches are proposed for the parts that will be designed as integrated with additive manufacturing. Developed design approaches have been applied in electron beam melting method which is one of the additive manufacturing methods and design rules for additive manufacturing have been introduced. In this context, in order to see the integrated production capabilities of the EBM device and to determine the overall dimensional margin of error of the system, a test piece including integrated structures was produced and measurements of this test piece were performed. In this study, the applicability of the tolerances required to produce an industrial product in accordance with the working conditions on the integrated revolute joints was also studied. Five different integrated revolute hinges were designed for the application. ISO Fit table is used for tolerances. The tolerance ranges were determined to be greater than or equal to the overall dimensional error of the system obtained from the measurement results of the test piece. After the production of the revolute joints with 5 different designs of 18 mm diameter, the bearing gaps were measured with the experimental setup established and compared with the pre-production tolerances. Thanks to different design approaches according to the measurement results, the lowest clearance value obtained in the integrated revolute joints was measured as 10 μm .

Science Code : 91438
Key Words : Additive manufacturing, EBM, consolidated revolute joint
Page Number : 69
Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ
Co-Supervisor : Dr. Evren TAN

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca tezimin planlanması, yürütülmesi ve her aşamasında yol gösteren, ilgi ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a, çalışmam boyunca, gece gündüz demeden destek veren ve yol gösteren, tezimin ikinci danışmanı Dr. Evren TAN'a ve yine desteklerini esirgemeyen Dr.Berkay GÜMÜŞ'e, her zaman olduğu gibi bu dönemde de sonsuz sevgi ve anlayışla yanımda olan her türlü desteği sonuna kadar veren canım eşim Nazlıcan ERDOĞAN GÖVEZ'e, bu günlere gelmemde büyük emeği olan ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem Emine GÖVEZ ve babam Mehmet Şevket GÖVEZ'e, sunduğu imkanlar sayesinde çalışmalarımızı gerçekleştirdiğimiz, her zaman çalışanlarına desteğini sonuna kadar hissettiren ASELSAN ailesine, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi.....	3
2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	3
2.2.1. Metal eklemeli imalat	5
2.2.2. Toz yatağında ergitme	6
2.2.3. Yoğunlaştırılmış enerji yığma	7
2.2.4. Bağlayıcı püskürtme	8
2.2.5. Tabaka laminasyon	8
2.2.6. Elektron ışını ile ergitme.....	9
2.3. Ti-6Al-4V.....	11
2.4. Eklemeli İmalata Yönelik Tasarım	12
2.5. Test Parçası	14
2.6. Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Katkıları	15
3. TASARIM YAKLAŞIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ	21
3.1. Ti6Al4V metal toz malzeme	21

	Sayfa
3.2. Cihazlar ve Sistemler	21
3.3. EBM Test Parçası Tasarımı	22
3.4. Bütünleşik Döner Mafsal Tasarımları	24
3.4.1. Bütünleşik Döner Mafsalların Yapısal Performanslarının Belirlenmesi .	30
3.4.2. Üretim	30
3.4.3. Üretim sonrası testler ve ölçümler	32
4. TASARIM DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI	35
4.1. EBM Test Parçası Ölçüm Sonuçları	35
4.1.1. Bütünleşik döner mafsalların yapısal performansları	41
4.2. Tasarım Detayları	43
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
5.1. Sonuçlar	59
5.2. Öneriler	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ASTM F2792 standardında eklemeli imalat yöntemleri.....	4
Çizelge 2.2. Eklemeli imalatın geleneksel üretim yöntemlerine karşı avantajları	13
Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V tozu özellikleri	21
Çizelge 3.2. ARCAM A2X EBM cihazı standart parametreleri.....	31
Çizelge 4.1. Bütünleşik silindirlerin deliklerinin ölçüm değerleri	36
Çizelge 4.2. İçi boş olarak üretilmiş deliklerin ölçüm değerleri	37
Çizelge 4.3. Bütünleşik olarak üretilen soldaki millerin alt ve üst bölgelerinin ölçüm değerleri.....	37
Çizelge 4.4. Bütünleşik olarak üretilen sağdaki millerin alt ve üst bölgelerinin ölçüm değerleri	37
Çizelge 4.5. Sol bölümdeki silindirler ile deliklerin arasındaki boşluk değerleri.....	39
Çizelge 4.6. Sağ bölümdeki silindirler ile deliklerin arasındaki boşluk değerleri	39
Çizelge 4.7. Bütünleşik olarak tasarlanan delikler ile sol bölgedeki içi boş deliklerin silindiriklik, dairesellik ve yüzey pürüzlülük değerleri	40
Çizelge 4.8. Bütünleşik olarak tasarlanan delikler ile sağ bölgedeki içi boş deliklerin silindiriklik, dairesellik ve yüzey pürüzlülük değerleri	40
Çizelge 4.9. Bütünleşik olarak tasarlanan delikler ile orta bölgedeki içi boş deliklerin silindiriklik, dairesellik ve yüzey pürüzlülük değerleri.....	40
Çizelge 4.10. ISO fit tolerans aralıkları ve bu aralıklardaki minimum ve maksimum boşluk değerleri	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Seçici lazer ergitme sistemi (SLE) çalışma prensibi.....	6
Şekil 2.2. Yoğunlaştırılmış enerji yığma (YFY) teknolojisi şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.3. Bağlayıcı püskürtme teknolojisi şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.4. Tabaka laminasyon teknolojisi şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.5. Elektron Işını Ergitme (EBM) teknolojisinin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.6. Chen ve Lu (2011) tarafından tasarlanan bütünleşik döner mafsallar, Geleneksel tasarım (a), Köşelere pah verilmiş tasarım (b), İkili konik yapılı tasarım (c), Davul şeklinde tasarım (d).....	15
Şekil 2.7. Wei ve diğerleri (2016) tarafından tasarlanan bütünleşik döner mafsallar, Geleneksel tasarım (a), Davul şeklinde tasarım (b), Sonsuz dişli şeklinde tasarım (c)	16
Şekil 2.8. Cali ve diğerleri (2012) gerçekleştirmiş oldukları mafsalları	18
Şekil 2.9. Cali ve diğerleri (2012) seçmiş oldukları boşluk azaltmalı bütünleşik küresel mafsalları	18
Şekil 2.10. Boschetto ve Bottini (2019) gerçekleştirmiş oldukları mafsalları .	19
Şekil 4.1. Bütünleşik döner mafsalları anahtar ağız detayı	45
Şekil 4.2. Bütünleşik döner mafsalları deney düzeneği montaj arayüzü.....	46
Şekil 4.3. T1 Bütünleşik döner mafsalları 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değeri.....	47
Şekil 4.4. T1 Bütünleşik döner mafsalları tasarım kuralları.....	47
Şekil 4.5. T2 Bütünleşik döner mafsalları 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değeri.....	49
Şekil 4.6. T2 Bütünleşik döner mafsalları tasarım kuralları.....	47
Şekil 4.7. T3 Bütünleşik döner mafsalları 18-30 mm H9-c9 tolerans aralığı boşluk değeri.....	51
Şekil 4.8. T3 Bütünleşik döner mafsalları tasarım kuralları.....	51
Şekil 4.9. T4 Bütünleşik döner mafsalları 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değeri.....	53
Şekil 4.10. T4 Bütünleşik döner mafsalları tasarım kuralları.....	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. T5 Bütünleşik döner mafsalı 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değeri.....	55
Şekil 4.12. T5 Bütünleşik döner mafsalı tasarım kuralları.....	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Ti-6Al-4V tozu a) Lazer Ergitme Yöntemi (SLE) b) Elektron Işını Ergitme Yöntemi (EBM).....	12
Resim 2.2. Test parçası tasarımları (sırası ile) Mahesh, Kruth, Castillo, Delgado, Johnson, Moylan	15
Resim 3.1. EBM test parçası iki boyutlu üst görünüşü	23
Resim 3.2. Bütünleşik döner mafsallar katı model görüntüsü: (a) Tasarım 1, (b) Tasarım 2, (c) Tasarım 3, (d) Tasarım 4, (e) Tasarım 5	24
Resim 3.3. Bütünleşik döner mafsalları katı model görüntüsü; Tasarım 1	25
Resim 3.4. Bütünleşik döner mafsalları katı model görüntüsü; Tasarım 2.....	26
Resim 3.5. Bütünleşik döner mafsalları katı model görüntüsü; Tasarım 3.....	27
Resim 3.6. Bütünleşik döner mafsalları katı model görüntüsü; Tasarım 4.....	28
Resim 3.7. Bütünleşik döner mafsalları katı model görüntüsü; Tasarım 5.....	29
Resim 3.8. Bütünleşik döner mafsallara uygulanan sınır koşulları	30
Resim 3.9. Bütünleşik döner mafsalların üretim sonrası toz geri kazanım sistemindeki (PRS) görüntüsü	31
Resim 3.10. Bütünleşik döner mafsalları ölçüm platformu adım adım ölçüm basamakları	33
Resim 4.1. EBM test parçası üretim sonrası PRS görüntüsü.....	35
Resim 4.2. Bütünleşik döner mafsalların yapısal analiz sonuçları a) Tasarım 1, b) Tasarım 2, c) Tasarım 3, d) Tasarım 4, e) Tasarım 5.....	42
Resim 4.3. T1 Bütünleşik döner mafsalları üretim sonrası kesit görüntüsü	48
Resim 4.4. T2 Bütünleşik döner mafsalları üretim sonrası kesit görüntüsü	50
Resim 4.5. T3 Bütünleşik döner mafsalları üretim sonrası kesit görüntüsü	52
Resim 4.6. T4 Bütünleşik döner mafsalları üretim sonrası kesit görüntüsü	54
Resim 4.7. T5 Bütünleşik döner mafsalları üretim sonrası kesit görüntüsü	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
°	Derece
µm	Mikrometre
C	Santigrat
cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
g	Gram
mA	Miliamper
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
Pa	Pascal
rpm	Revolutions per minute
σ	Sigma

Kısaltmalar	Açıklamalar
3DP	3D Printing
3SP	Scan, spin and selectively photocure technology
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
BP	Bağlayıcı Püskürtme
CLI	Common Layer Interface
CLIP	Continuous liquid interface production
CMM	Coordinate Measuring Machine
DFAM	Eklemeli İmalata Yönelik Tasarım
DFM	Üretim İçin Tasarım
DLP	Digital Light Processing

Kısaltmalar	Açıklamalar
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Elektron Işını Ergitme
Eİ	Eklemeli İmalat
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused filament fabrication
ISO	International Organization for Standardization
LEAF	Layer Exchange ASCII Format
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMD	Laser Metal Deposition
LMI	Layer Manufacturing Interface
LOM	Tabaka Laminasyon
MJF	Multi Jet Fusion
MJM	Multi-jet modeling
PLA	Polilaktik asit
PRS	Powder Recovery System
SCP	Solutions Components Performance
SDL	Selective Deposition Lamination
SLA	Stereolithography
SLE	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolitografi
T1	Tasarım 1
T2	Tasarım 2
T3	Tasarım 3
T4	Tasarım 4
T5	Tasarım 5
TYE	Toz Yatağında Ergitme
UAM	Ultrasonik Eklemeli İmalat
UTS	Maksimum Çekme Mukavemeti
YEY	Yoğunlaştırılmış Enerji Yığma
YS	Akma Dayanımı

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) bilgisayar destekli tasarım (BDT) verilerini kullanarak, üç boyutlu fiziksel bir nesneyi çizgi, parça parça ya da katmanlı olarak üretme yöntemidir [1-3]. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesi zor ya da imkansız olan karmaşık geometrilili yapılar, hücreli yapılar ve hareketli bütünleşik yapıların üretimi Eİ yöntemleri sayesinde mümkün hale gelmiş, tasarımcıların zihnindeki geleneksel üretim bariyerlerinin kırılması sağlanmıştır.

Günümüzde endüstrideki yeri giderek artan eklemeli imalatın bizlere sunduğu en büyük avantajlardan bir tanesi çok parçalı yapıların bütünleşik olarak üretimine imkan sağlamasıdır. Bu sayede karmaşık sistemlerde parça sayısı azaltılmakta, buna bağlı olarak üretim süresi ve montaj süreleri kısalmakta, imalat maliyetleri düşürülmektedir. Verimlilik açısından bakıldığında bir sistemde çok parçalı yapıdan tek parçalı yapıya geçiş ile elde edilen zaman kazancı ve maddi kazanç yadsınamaz boyuttadır. Çoklu parçalar birleştirilerek tek parçalı yapıların elde edilmesinde birçok avantaj sunulsa da, hareket içeren yapılarda bu işlem kolay bir şekilde gerçekleştirilememektedir. Hareket içeren yapılarda boşluk miktarı, yüzey pürüzlülüğü, ölçüsel doğruluk gibi birçok yapısal ve geometrik faktör parçanın performansında ve ömründe etkin rol oynamaktadır. Eİ cihazlarının sahip oldukları üretim yetenekleri sebebiyle, tek parçalı üretimlerde yüksek boşluk miktarı, yüksek yüzey pürüzlülüğü, geometrik bozukluklar; düzgün ve çalışma şartlarına uygun parça üretimi zorlaştırmaktadır. Bu sebeple hareketli parçalar içeren sistemlerin eklemeli imalat ile bütünleşik tasarımlarında eklemeli imalata yönelik bir takım tasarım yaklaşımlarına ve bu yaklaşımların kurallarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V tozu kullanılarak elektron ışını ile ergitme (ing. EBM) teknolojisinin bütünleşik döner mafsallı üretimi için gerekli boşluk değerlerinin belirlenmesi, sistemin genel hata miktarının çıkarılması ve bütünleşik üretimi gerçekleştirilen yapıların yüzey pürüzlülüğü, ölçüsel doğruluğu gibi geometrik özelliklerinin incelenmesi amacıyla test parçası üretilmiş ve incelenmiştir. Elektron ışını ergitme teknolojisi ile üretilen bütünleşik döner mafsallar için alternatif tasarımlar gerçekleştirilmiş, bu tasarımların ISO fit toleranslandırılmalarına uygun şekilde üretilebilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışmanın amacı EBM teknolojisi kullanılarak yapılacak bütünleşik döner mafsallı tasarımlarının kurallarının oluşturulmasıdır. Bu kapsamda bu çalışmanın hedefleri aşağıda verilmiştir:

- EBM teknolojisi ile üretilen bütünleşik döner mafsallı tasarımları ISO fit toleranslandırma bantlarına uygunluğunu denetlemek.
- EBM teknolojisi ile bütünleşik yapı üretiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek.
- EBM teknolojisi ile bütünleşik yapı üretiminin dairesellik ve silindiriklik özellikleri etkisini incelemek.
- EBM teknolojisi ile üretilen bütünleşik yapılarda ölçüsel doğruluk miktarındaki değişimi denetlemek.
- EBM teknolojisi ile üretilen bütünleşik döner mafsallarda boşluk miktarını azaltacak tasarım yaklaşımları geliştirmek.
- EBM teknolojisi ile üretilen alternatif bütünleşik döner mafsallı tasarımı gerçekleştirmek.
- EBM teknolojisi ile üretilen bütünleşik döner mafsalların tasarım kurallarını ortaya koymak.

Bu tez çalışması giriş, literatür özeti, materyal ve yöntem, deneysel sonuçlar ve tartışma, sonuç ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Literatür özetinde konuya ilişkin genel bilgiler verilmiş ve yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde çalışmanın metodolojisine yer verilerek çalışmanın planı yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ve tartışma bölümünde çalışmanın analizleri, sonucunda çıkan veriler paylaşılmış olup literatürde yer alan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde ise çalışmanın sonuçları özetlenmiş ve ileride yapılacak diğer çalışmalara ışık tutması amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi

Eklemeli imalat, BDT verilerini kullanarak, üç boyutlu fiziksel bir nesneyi çizgi, parça parça ya da katman üretme yöntemidir [1-3]. Bu teknoloji Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) standartlarında, talaş kaldırmalı imalat yöntemlerinin aksine genellikle katman üzerine katman şeklinde malzemeleri birleştirerek 3 boyutlu model verilerinden nesne üretme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Literatürde eklemeli imalat, hızlı prototipleme, dijital üretim, eklemeli üretim tekniği, serbest şekilli imalat olarak birçok farklı isimle ifade edilmektedir [3-6].

Eklemeli imalatın tarihçesine baktığımızda; temelleri, iki boyutlu (2B) katmanlardan serbest biçimli topografik harita oluşturma çalışmaları ile yaklaşık 150 yıl öncesine dayanmaktadır [7-9]. Gerçekleştirilen araştırmalar ve çalışmalar sonucunda, 1960'ların sonlarında fotopolimerizasyon [10], 1972'de toz ergitme ve 1979'da tabaka laminasyon [11] olmak üzere modern eklemeli imalatsüreçlerinin konseptleri ortaya çıkmış ve ilk patentler alınmıştır. Fakat akademik yayınların ve patentlerin asıl artışı 1980 ve 1990'ların başında görülmüştür. Seçici lazer ergitme yöntemi gibi yeni teknolojiler 1990'ların başında [12] geliştirilmiş olup bunun yanında proses teknolojilerinin başarılı ticarileşmeleri de bu yıllarda görülmüştür. Fotopolimerizasyon 1988 yılında, malzeme ekstrüzyon ile tabaka laminasyon 1991'de [10], lazer sinterleme ise 1992'de ticarileştirilmiştir [12]. Eklemeli imalat için 1990-2000 yılları arası geçen süre bir büyüme dönemidir. Bu dönem Elektron ışını ergitme (EBM) gibi yeni süreçler ticarileştirildiği [13], mevcut teknolojilerin ilerlediği ve eklemeli imalat ile ilgili yazılımların dosya formatlarının geliştirildiği bir dönemdir. Stereolitografi (STL), Common Layer Interface (CLI), Layer Exchange ASCII Format (LEAF) ve Layer Manufacturing Interface (LMI) [9] gibi özel dosya formatları tanıtılmış; Materialise's Magics (1992) gibi programlar geliştirilmiştir [14].

2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemlerinin isimlendirmelerinde malzemenin formu, malzeme ekleme yöntemi, enerji kaynağının türü olmak üzere üç temel değişken rol oynamaktadır. Farklı sınıflandırmalar mevcut olsa da ilgili ASTM F2792 standardında [5] eklemeli imalat

yöntemleri yedi ayrı kategoriye ayrılmıştır. Bu yöntemler Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir [15].

Çizelge 2.1. ASTM F2792 standardında eklemeli imalat yöntemleri

Proses Türü	Tanımı	Ticari Adı	Güçlü Yönleri	Malzeme Türleri
Fotopolimerizasyon	Bir sıvı fotopolimer reçinesi, bir lazer veya projektör yoluyla seçici olarak maruz bırakılarak kürlenir ve bölge katı hale dönüştürülür.	SLA DLP 3SP CLIP	Kompleks geometrilerin ve yüksek düzeyde ölçüsel doğruluğa sahip parçaların üretimine imkan sağlar. Pürüzsüz Yüzeyler Büyük imalat alanları	Fotopolimer Reçineler
Toz Yatağında Ergitme	Toz halindeki malzemeyi, bir lazer veya elektron ışın kaynağı ile seçici bir şekilde ergiterek birleştirerek parça oluşturulur. Parçayı çevreleyen ergimemiş tozlar, ters açılı yüzeyler için destek malzemesi görevi görür.	SLS DMLS EBM SLE MJF	Yüksek düzeyde karmaşık geometrilerin üretimine imkan sağlar Toz destek yapısı görevi görür. Geniş malzeme yelpazesine sahiptir.	Metal Polimer Seramik Kum
Bağlayıcı Püskürtme	Metal ya da seramik tozların üzerine seçici olarak sıvı bağlayıcı madde püskürtülerek katman katman üretim gerçekleştirilir.	3DP ExOne Voxeljet	Renkli imalat olanağı sağlar Yüksek verimliliğe sahiptir Geniş malzeme yelpazesine sahiptir.	Plastik Metal Seramik Cam Kum
Malzeme Püskürtme	Parçayı oluşturacak malzemenin damlacıklar halinde seçici bir şekilde püskürtülmesi ile üretim gerçekleştirilir. Püskürtülen fotopolimer içerikli malzeme uv- ışını ile kürlenerek katılaştırılır.	Polyjet SCP MJM Projet	Yüksek ölçüsel doğruluğa sahiptir. Renkli parça üretimine imkan sağlar Tek parçada birden farklı malzeme kullanılabilir.	Fotopolimer Polimer Mum Metal
Tabaka Laminasyon	İnce tabakalar şeklinde olan malzeme katman katman istiflenir ve lamine edilir. Laminasyon yöntemi olarak yapıştırıcılar, ultrasonik kaynak veya sert lehimleme tercih edilir. Gereksiz bölgeler her katmanda kesilir ve parça oluşturulur.	LOM SDL UAM	Yüksek hacimli parça üretim imkanı Göreceli düşük maliyet Malzeme kombinasyonlarına ve sensör vb. ürünlerin gömülmesine imkan verir.	Kağıt Plastik Metal
Malzeme Ekstrüzyon	Malzeme ergiyik halde bir nozülünden akıtılarak yığma işlemi gerçekleştirilir. Yaygın olarak termoplastik malzemeler kullanılır.	FFF FDM	Ucuz ve ekonomiktir. Renkli parça üretimine imkan sağlar. Ofis ortamlarında kullanılabilir.	Termoplastik Filamentler
Direkt Enerji Yığma	Parça veya katman üzerinde lazer ya da elektron ışını gibi bir enerji kaynağı ile oluşturulan ergiyik havuza toz ya da tel beslenir. Otomatikleştirilmiş bir kaynak olarak düşünülebilir.	LMD LENS DMD DMD	Yön ya da eksen kısıtlaması yoktur. Tamir ve unsur ekleme işlemlerine uygundur. Tek parçada farklı malzeme kullanılabilir.	Metal Seramik

2.2.1. Metal eklemeli imalat

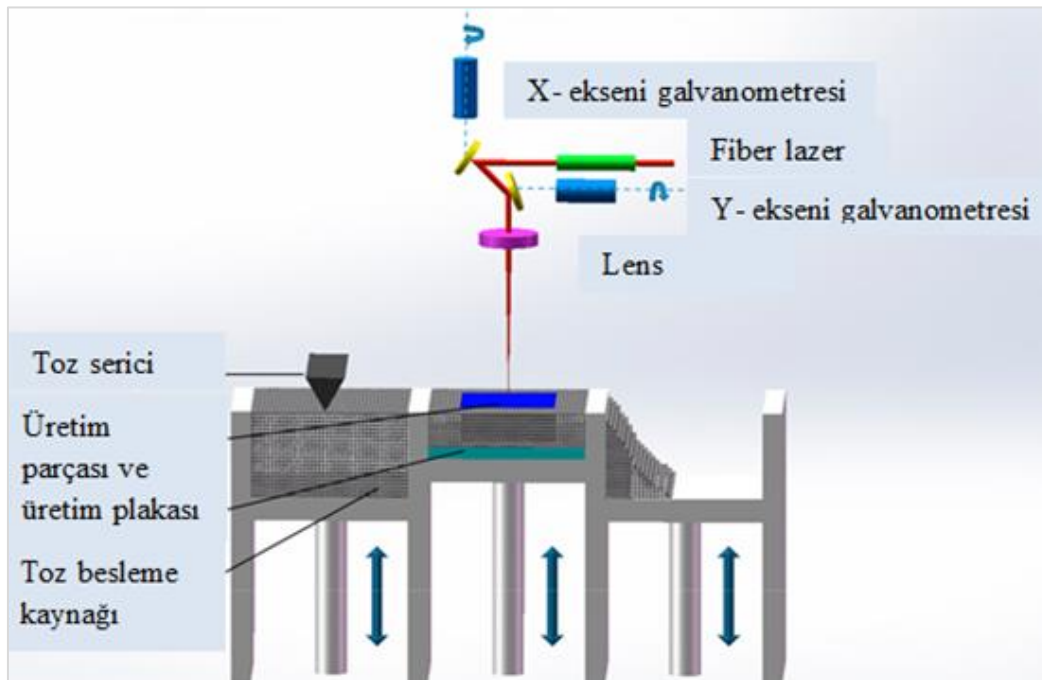
Eklemeli imalatın endüstride serüveni hızlı prototipleme ile başlamıştır. Eklemeli imalat, tasarımcının önündeki geleneksel üretim kısıtlarını kaldırmak ile birlikte üretim için tasarımdan, tasarım için üretime geçişi başlatmıştır. Popülerliğinin artmaya başladığı ilk dönemlerde daha çok tasarımı gerçekleştirilen ürünlerin hızlı bir şekilde üretilip, görsel bir ürün ortaya çıkarılması amacına hizmet etmiştir. Böylece tasarım doğrulamaları kolay ve ucuz bir şekilde gerçekleştirilebilmekte, tasarım hataları kaynaklı oluşacak ek maliyet ve zaman kayıplarının önüne geçilmektedir. Buna rağmen, eklemeli imalat teknolojisinin ilerlemesi, üretim hacimlerinin artması ile birlikte nihai ürün üretimi de gündeme gelmiştir. Günümüzde yeni nesil eklemeli imalat cihazlarında gerçekleştirilen çalışmalar prototiplemeden çok nihai ürün üretme çalışmalarına odaklanılmıştır. Nihai ürün üretme çalışmalarının artmasıyla birlikte en popüler eklemeli imalat türleri de metal üretilen yöntemlerden oluşmaktadır.

Çizelge 2.1.'de' de özetlenen üretim yöntemlerinden dört tanesi metal eklemeli imalat ile ilgilidir. Bu yöntemlerin sınıflandırılmasında ise kullandığı enerji kaynağı, malzeme besleme yöntemi, beslediği malzemenin şekli gibi özellikler göz önünde bulundurulmaktadır [16].

- Toz Yatağında Ergitme (TYE)
 - Seçizi Lazer Ergitme (SLE)
 - Elektron Işığında Ergitme (ing. EBM)
- Yoğunlaştırılmış Enerji Yığma (YEY)
 - Lazer ya da elektron ışını
 - Tel besleme ya da Toz besleme
- Bağlayıcı Püskürtme (BP)
 - Infiltrasyon
 - Konsolidasyon
- Tabaka Laminasyon
 - Ultrasonik eklemeli imalat (UEİ)

2.2.2. Toz yatağında ergitme

Toz yatağında ergitme (TYE) yönteminde sistemler enerji kaynağı, toz serici, üretim tablası ve toz haznesi olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır [17]. Üretim tablasının üzerine serici ile toz serildikten sonra odaklanmış bir enerji kaynağının tabla üzerindeki tozları ergitmesi prensibine dayanır. Ergitme işlemi tamamlandıktan sonra üretim tablası bir katman kalınlığı kadar aşağıya hareket eder ve toz serici silindir ya da bıçak yardımıyla yeniden toz serilir. Mevcut katmanın ergitilmesi sırasında bir önceki katmanların bir bölümünün de yeniden ergitilmesi ile katmanların birbirine yapışması sağlanır [16]. Bu işlem parça tamamlanan kadar tekrarlanır. Parça tamamlandıktan sonra etrafında bulunan tozlar özel ekipmanlar ile parçanın etrafından uzaklaştırılır. Toz yatağında ergitme yönteminde enerji kaynağına göre elektron ışını ergitme (EBM) ve (SLE) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Seçici lazer ergitme sistemi Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Her iki sistem de benzer toz yatağı prensibini kullansa da donanımları ve enerji kaynakları açısından önemli farklılıklar içermektedirler [16]. Elektron ışını ergitme sisteminde vakum ortamı altında bir tungsten filamandan koparılan elektronların manyetik bobinler ile yönlendirilmesiyle seçici olarak tozu ergitmektedir. Seçici Lazer ergitme sistemlerinde ise bir lazer kaynaktan çıkan ışın mercekler ve aynalar ile yönlendirilerek üretim tablası üzerinde bulunan tozu ergiterek üretim gerçekleşir [18, 19].

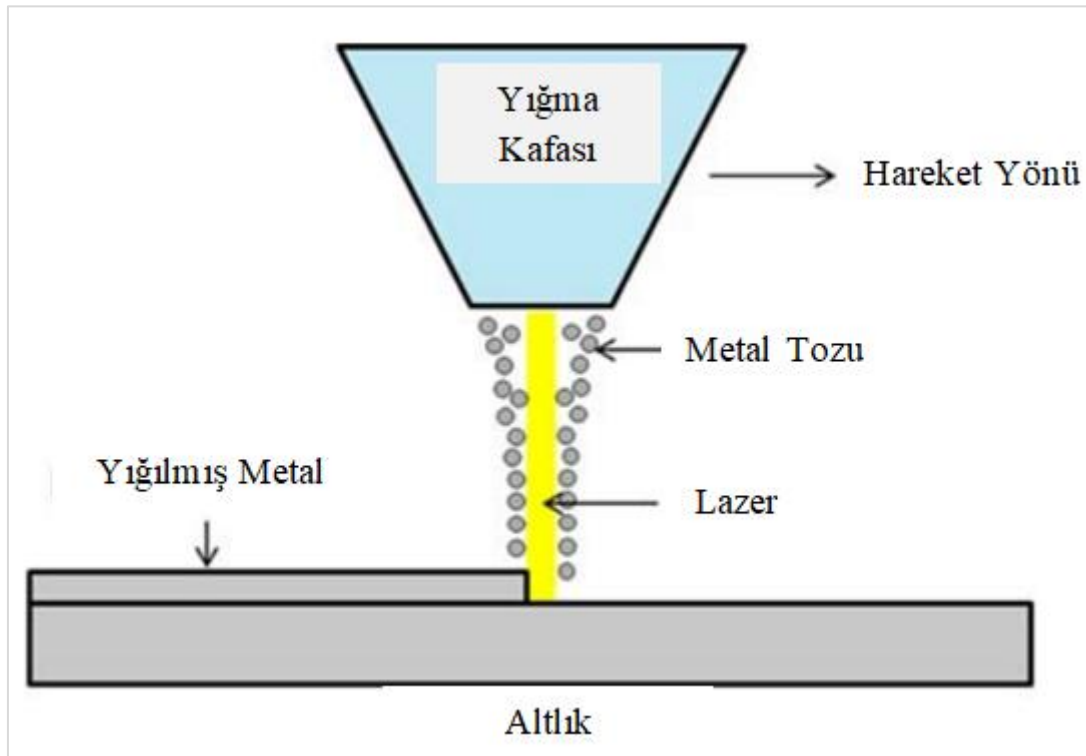


Şekil 2.1. Seçici Lazer ergitme sistemi (SLE) çalışma prensibi [20]

2.2.3. Yoğunlaştırılmış enerji yığma

Yoğunlaştırılmış Enerji Yığma (YİY) yoğunlaştırılmış ve odaklanmış bir termal enerji ile üretimi yapılacak parçanın hammaddesinin birleşmesi sonucu ergiyik havuz oluşturularak parça üretim yöntemidir [16, 21]. Bu işlemde enerji kaynağı olarak bir lazer ışını, elektron ışını ya da plazma ark kullanılabilir. Kullanılan hammadde ise toz halinde ya da tel şeklinde olabilir [22]. Bu teknolojinin temelleri kaynak teknolojisine dayanmaktadır. Üretim sırasında oluşan ergiyik havuz atmosferin olumsuz etkilerinden korumak için soygaz ile koruma kalkını oluşturulur [16, 23].

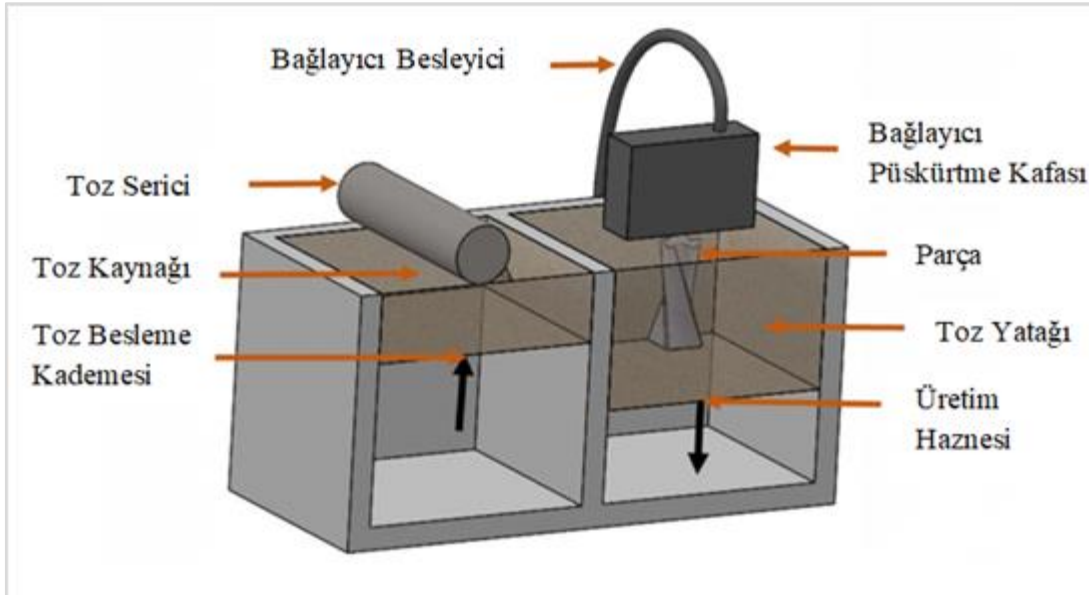
Bu teknolojiyi kullanan cihazlar toz yatağında ergitme yöntemine göre daha basit bir yapıya sahiplerdir. Özellikle tel beslemeli sistemlerde yüksek yığma oranları gözlenmektedir. Üç ya da beş eksenle yığma yapabilen bu cihazlar günümüzde büyük hacimli parça üretimde ve parça üzerine tadilat gerektiren işlemlerde kullanılmaktadırlar [16, 22]. Direkt enerji yığma sistemi şematik olarak Şekil 2.2.'de gösterilmiştir [24].



Şekil 2.2. Yoğunlaştırılmış enerji yığma (YİY) teknolojisi şematik gösterimi [24]

2.2.4. Bağlayıcı püskürtme

Bağlayıcı püskürtme (BP), üretim haznesinde bulunan metal tozlarının üzerine bağlayıcı püskürtülüp kürlenmesi ile birlikte tozların birbirine tutunmasını sağlayan üretim yöntemidir. Bağlayıcı genellikle bir sıvı, metal ya da seramik toz formundadır [25]. Metal üretimi sırasında genellikle bağlayıcı malzeme olarak erime sıcaklığı ana malzemeden daha düşük ve küçük taneciklere sahip başka bir metal kullanılır. Üretim sırasında yüksek ortam sıcaklıkları oluşmamaktadır. Bu sebeple üretilen parçada kalıntı gerilme görülmemektedir fakat üretimden çıkan parça kırılgan bir yapıdadır, bu nedenle sinterleme, infiltrasyon ve tavlama gibi birçok ardıl işleme ihtiyaç duyulur [25, 26]. Bu teknolojiyi kullanan cihazlar yüksek hızda üretime imkan sunarlar, yüzey pürüzlülükleri toz yataklı cihazlar ile benzer sonuç vermektedir. Fakat üretilen parçaların ardıl işlem görmesi gerekmektedir. Bağlayıcı püskürtme sistemi şematik olarak Şekil 2.3.'te gösterilmiştir [27].

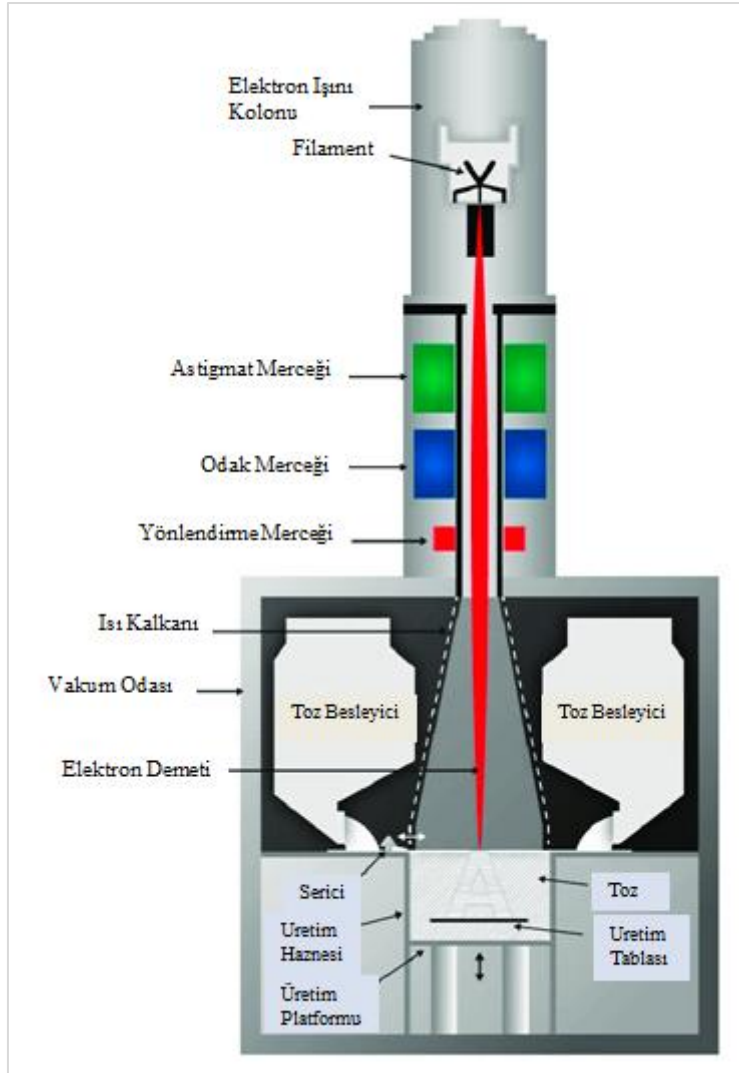


Şekil 2.3. Bağlayıcı püskürtme teknolojisi şematik gösterimi [27]

2.2.5. Tabaka laminasyon

Tabaka laminasyonu (LOM), ince sac malzemelerin birbiri üzerine basınç, ısı, ultrasonik kaynak ya da direnç kaynağı kullanılarak birleştirilmesi ile parça üretilmesi yöntemidir. Basınç ve ısı uygulamalarında tabakalar termal bir yapışkan kaplanır ve bu sayede birbirine bağlanır. Her katman oluşturulduktan sonra bir lazer, plazma ya da kesici takım yardımıyla

oluşan sıcaklık farklarını azaltmak ve üretimi devam eden parçada kalıntı gerilmeleri ortadan kaldırmak için ön ısıtma uygulanmaktadır [34, 35]. Üretim sırasında yüksek enerjili elektronların saçılmasını engellemek ve ergiyik havuz etrafından oluşabilecek oksidiyonun önüne geçmek için ise üretim süreci vakum altında gerçekleştirilmektedir [22, 36, 37]. Elektron ışını ile ergitme sistemi şematik olarak Şekil 2.5.'te gösterilmiştir [38].



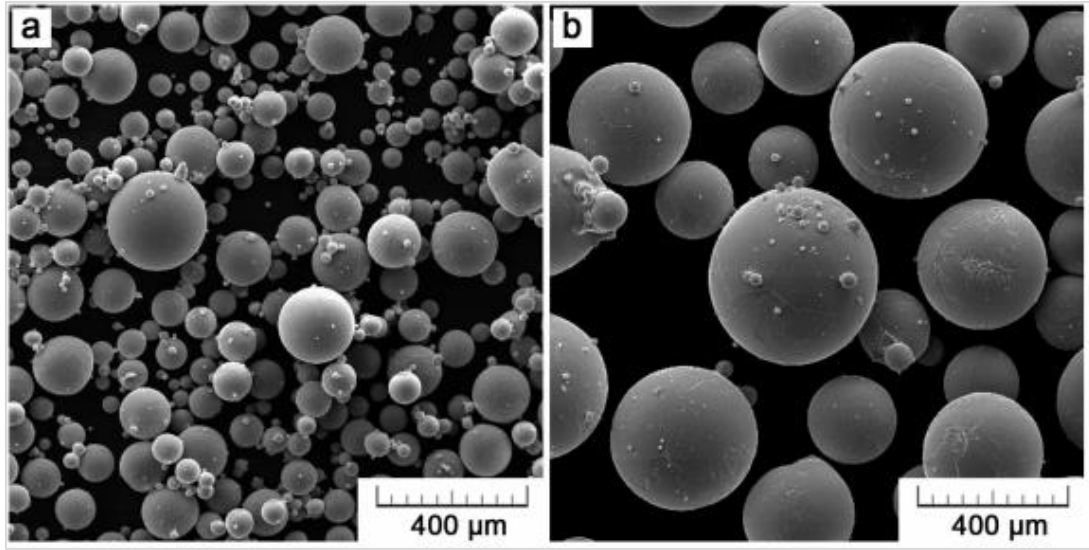
Şekil 2.5. Elektron Işını Ergitme (EBM) teknolojinin şematik gösterimi [38]

Elektron ışını ile ergitme yönteminde elektron ışını elektromanyetik merceklerle odaklanır ve manyetik bobinler ile üretim tablası üzerinde istenilen konuma yönlendirilerek ergitme işlemi gerçekleştirilmektedir [39]. Her katmanda ilk işlem basamağı ön ısıtmadır. Toz yatağının yüzeyi odaklanmamış elektron ışını ile birkaç kez belirli bir tarama stratejisi ile taranır [40]. Ön ısıtma işlemi sırasında 30mA'ya kadar yüksek bir akım ve 104mm/s tarama hızı değerleri kaydedilmiştir. Bu şartlar altında Ti-6Al-4V tozu için ön ısıtma

sıcaklığının 700 C°'den yüksek değerler elde edildiği görülmüştür [34, 41]. Bu durumda sadece tozun ön ısıtılmasını değil aynı zamanda taneciklerin sinterlenmesini sağlamaktadır [41]. Sinterleme işlemi üretim sırasında yüksek enerjiye sahip elektron ışının tozunun etrafa saçılmasını engellemektedir. Bunun yanı sıra sinterlenmiş olan toz destek yapısı görevi görmektedir. EBM üretim süreci için operasyonel atmosfer $<10^2$ Pa'lık bir vakum ortamıdır [34]. Ergitme işlemi sırasında çalışma alanına helyum beslenerek sistem basıncı yaklaşık 1Pa'ya yükseltilir, böylece metal tozlarının elektriksel yüklenmesi önlenirken ergiyik bölgede ısı iletimi iyileşeceğinden soğuma hızı artar [34, 39].

2.3. Ti-6Al-4V

Titanyum alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranına ve biyouyumluluğa sahip oldukları için havacılıktan medikal implant çalışmalarına kadar geniş bir uygulama alanına sahiptirler [34, 42-45]. Titanyum ve titanyum alaşım malzemelerin kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda parça üretimi, işleme maliyetleri yüzünden pahalı ve uzun sürmektedir fakat Titanyum alaşımların eklemeli imalat ile üretimiyle daha hızlı bir şekilde ve daha uygun maliyet ile üretimler gerçekleştirilmektedir [22]. Ti-6Al-4V ise popüler bir titanyum alaşımıdır. Yoğunluğu 4.43 g/cm^3 , özgül mukavemeti 200 Mpa/g/cm^3 ve erime noktasına 1650 C° 'dir [34, 42]. Eklemeli imalat ile üretilmiş Ti-6Al-4V'ün statik özelliklerinin (Akma dayanımı (YS), Maksimum çekme mukavemeti (UTS)) geleneksel yöntem ile üretilmiş alaşım ile karşılaştırıldığında akma dayanımı ve maksimum çekme mukavemetinin daha yüksek olduğu, sünekliğinin ise daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca eklemeli imalatla üretim yönüne bağlı olarak alaşımın akma dayanımı ve maksimum çekme mukavemeti bakımından anizotropik olduğu belirtilmiştir [22, 46, 47]. Resim 2.1.'de SLE ve EBM teknolojilerine sahip cihazlarda kullanılan Ti-6Al-4V tozuna ait, toz boyut karşılaştırılması görülebilir.



Resim 2.1. Ti-6Al-4V tozu a) Lazer Ergitme Yöntemi (SLE) b) Elektron Işını Ergitme Yöntemi (EBM) [45]

Ti-6Al-4V alaşımı kullanılan eklemeli imalat üretimlerinde alaşımda oksitlenmeyi önlemek için kontrollü bir ortama ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ortam SLE sistemlerde genellikle argonun koruyucu gaz olarak ortama verilmesi ile gerçekleştirilirken EBM sistemlerde vakum ortamının oluşturulması ile sağlanmaktadır [34, 48].

2.4. Eklemeli İmalata Yönelik Tasarım

Ürün geliştirme süreci tarihinde uzun bir süre tasarım ve imalat iki ayrı kavram olarak düşünülmüştür fakat bu dönemlerde süreçlerin birbirinden ayrı olması kaynaklı ortaya çıkan tasarım hatalarının düzeltilmesi çok maliyetli olmaktadır. Bilgisayar tabanlı teknolojilerin geliştirilmesi ve eş zamanlı mühendislik yaklaşımının ortaya çıkmasıyla üretim ve tasarım bir bütün olarak ele alınmaya başlanmıştır [49]. Bununla birlikte üretim süreçlerini kolaylaştırmak ve sürdürülebilir kılmak için “üretim için tasarım” (DFM) kavramı ortaya çıkmıştır. Bu konsept ile geçmişten gelen deneyim ve üretim yaklaşımları ile ürün geliştirme süreçlerine, kılavuz olması amaçlanmıştır. Bu sayede maksimum faydayı elde etmek için konvansiyonel üretim tekniklerini dikkate alan genel yönergeler geliştirilmiştir [50].

Eklemeli imalat başlangıçta tasarım görselleştirme ve hızlı prototipleme yöntemi olarak kullanılsa da [51] eklemeli imalat teknolojinin gelişmesi ve metaller de dâhil olmak üzere üretimi gerçekleştirilebilecek hammaddelerin artmasıyla endüstride önemli hale gelmiştir

[14, 52]. Eklemeli imalatın geleneksel üretim yöntemlerine karşı bir çok avantajı bulunmaktadır; bu avantajlar Çizelge 2.2.'de verilmiştir [1].

Çizelge 2.2. Eklemeli imalatın geleneksel üretim yöntemlerine karşı avantajları

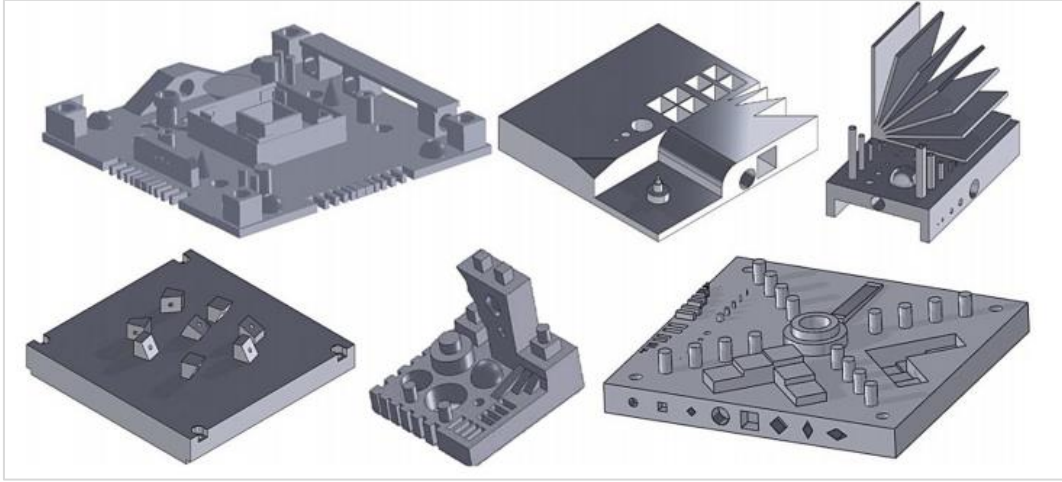
Avantajlar	Açıklamalar
Karmaşık Geometriler	Geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmeyecek karmaşık geometriler, parça içi kanallar, ince duvarlar, hücresel yapılar üretmeye imkan sağlar [1, 53, 54].
Malzeme Esnekliği	Eklemeli imalat teknolojisi sayesinde bir parçanın üretimi sırasında farklı katmanlarda farklı malzemeler kullanılabilir. Böylece parçanın farklı noktalarında farklı fiziksel, kimyasal veya mekanik özellikler gözlemlenebilir[49, 55].
Fonksiyonel Komplekslik	Eklemeli imalat süreçleri parça konsolidasyonu ve fonksiyonel eklemelere imkan verdiği için tam anlamıyla işlevsel parça üretimine imkân sağlar. Farklı fonksiyonları gerçekleştirmek için çok parçalı yapılar yerine azaltılmış parça sayısı ile üretimin gerçekleştirilebilmesi[54, 56], parçanın içeresine sensör vb. ürünlerin gömülmesine imkan vermesi avantaj sağlar.
Kişiselleştirilmiş Ürünler	Eklemeli imalat teknolojisi sayesinde kişiye ve kişinin ihtiyaçlarına özgü, biyouyumlu parça üretimi hızlı bir şekilde gerçekleştirile bilinmektedir.
Bulunulan Yerden Bağımsız Üretim	Eklemeli imalat teknolojilerine sahip cihazlar sayesinde tasarlanmış ve ihtiyaç duyulan bir parçayı uzayda bile üretime imkan sağlar. Geleneksel üretim yöntemlerinde bu tarzda bir operasyon için gerekli operatör, hammadde, sarf malzemeler ve tezgah sayısı ihtiyacı ile kıyaslandığında eklemeli imalat büyük avantaj sağlamaktadır[57].
Üretim Esnekliği	Eklemeli imalat teknolojisi aynı anda birden fazla farklı parça üretimine imkan verdiği için, çeşitli ihtiyaçlar tek bir üretim ile kolayca gerçekleştirilebilir.

Eklemeli imalatın geleneksel üretim yöntemlerine karşı sahip olduğu bu avantajlardan tam anlamıyla faydalanabilmek için eklemeli imalat yöntemine özgü ve yenilikçi tasarımlar yapılması gereklidir. Bu sebeple DFM konseptine olduğu gibi eklemeli imalata yönelik tasarım (DFAM) konseptiyle yeni tasarım kılavuzları oluşturulmuştur [1, 58]. Bu tasarım kılavuzları eklemeli imalata özgü tasarım kurallarını, ilkelerini ve limitlerini içermektedir [59].

Eklemeli imalata yönelik tasarımda istenilen performans ve diğer hedeflere ulaşmak için üretim sürecinin yeteneklerini en iyi şekilde kullanılması amaçlanır [49]. Eklemeli imalata yönelik tasarım yöntemi, parça sayısını azaltmak, ürün performansını ve fonksiyonelliğini artırmak amacıyla; üretim süreci bilgisiyle birlikte yapısal optimizasyonları bir araya getirerek geliştirilmiştir [59]. Geleneksel tasarım süreçlerine alışkın olan tasarım mühendisleri için geçiş sürecini kolaylaştırmak amacıyla DFAM için geleneksel tasarım sürecine benzer metodolojiler ortaya konmuştur [60].

2.5. Test Parçası

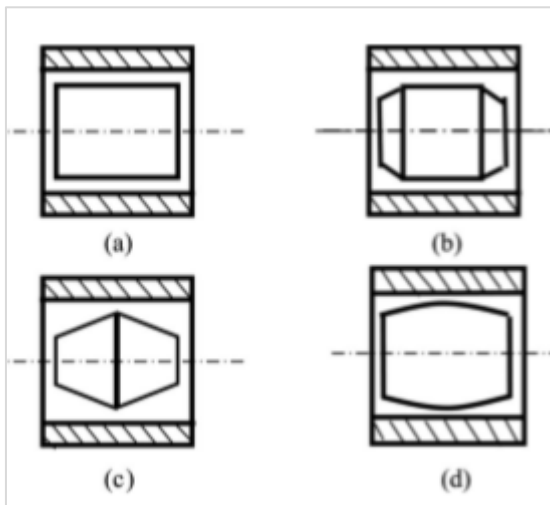
İmalat metodolojisinde, bir sistemin performansını değerlendirmek için iki temel yaklaşım vardır. Bunlardan ilki sistem bileşenlerinin, konumlarının, yönlerini, hızlarını vb. doğrudan ölçmektir. İkinci yaklaşım ise imalatı gerçekleştirilen test parçalarının ölçümleri yapılarak gerçekleştirilir [61-63]. Günümüzdeki eklemeli imalat cihazlarında bahsi geçen ilk yöntem, hareketli bileşenlerin son kullanıcı tarafından erişilebilir olmaması ve bu cihazların içerdikleri yüksek güçlü lazerler, elektron ışın kaynakları sebebiyle güvenlik riski oluşturdukları için uygulanabilir değildir. Bu sebeple eklemeli imalat cihazlarının performansının belirlenmesi için en kısa ve kolay yol test parçası üretimi yöntemidir [62, 64]. Test parçası üretim yönteminde sistem bileşenlerinin her birinin hatası birleşeceği için, çalışmanın sonunda belirli bir hata kaynağı bulunması zor olabilir. Bunun yanı sıra test parçası üretiminin avantajları vardır. Bu yöntem sayesinde özel ekipmanlara ihtiyaç duyulmadan amaca ulaşılabilir, parçanın sistemin son ürünündeki performansını direkt ortaya konulabilir, aynı yapıyı üreten farklı sistemlerin kolayca karşılaştırılmasına olanak verir ve uygun bir şekilde tasarlanırsa sistemin limitlerinin test edilmesini sağlar [62-66]. Literatürde daha önce tasarlanmış test parçalarının bir bölümü Resim 2.2.'de gösterilmiştir.



Resim 2.2. Test parçası tasarımları (sırası ile) [67], [68], [69], [70], [71] ve [72]

2.6. Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Katkıları

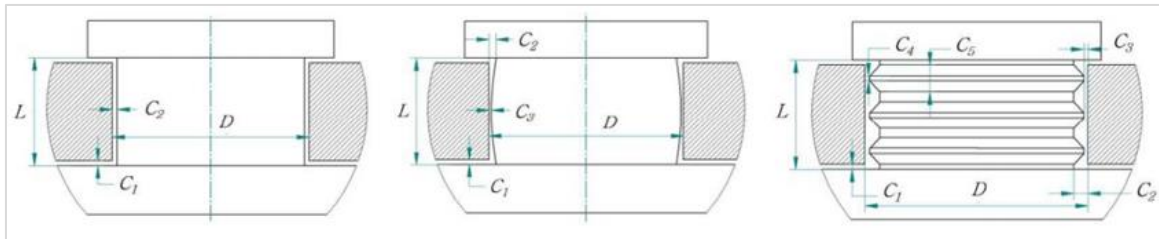
Chen ve Lu (2011) SLE ile tek parça olarak üretilecek döner mafsallarda boşluğu minimize etme üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada üretilecek döner mafsallar işlevsel olabilmesi ve üretilebilmesi için belirli bir boşluk değerine sahip olması gerektiği belirtilmektedir. Boşluk değerinin sadece üretilebilirlik açısından değil aynı zamanda kullanılacak olan mafsal yapısının taşıyacağı darbe yükü açısından da kritik olacağının üzerinde durulmuştur. Çalışma sırasında Şekil 2.6.'da gösterilen 4 ayrı tasarım üzerine yoğunlaşmıştır [73].



Şekil 2.6. Chen ve Lu (2011) tarafından tasarlanan bütünsel döner mafsallar, Geleneksel tasarım (a), Köşelere pah verilmiş tasarım (b), İkili konik yapıli tasarım (c), Davul şeklinde tasarım (d) [73]

Chen ve Lu (2011) tarafından bu tasarımlar üzerinde darbe yüküne bağlı olarak olması gereken boşluk değerleri hesaplanmış, bu boşluk değerlerine göre sanal ortamda yapısal analizleri gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu analizler sonucunda en iyi ve en düşük stres dağılımını davul şeklinde tasarımın verdiği belirlenmiştir. Bunun üzerine çalışmalara davul şeklinde tasarım ile devam edilmiştir. Aradaki boşluk değeri 0,3-0,2-0,1 ve 0,08 mm olacak şekilde denemeler yapılmış ve üretilebilir minimum değer 0,1 mm olarak belirlenmiştir. Bu 0,1 mm boşluk değerine sahip numunelerde üretim sırasında yapışmalar ve çalışma sırasında sıkışmalar olduğundan bahsedilmiştir. Bu değer geleneksel tasarım üzerinde denendiğinde en düşük boşluk değerinin 0,2 mm olduğu, 0,15 mm boşluk değerinde birbirine kaynama sorunu olduğu bilgisi verilmiştir. Sonuç olarak davul şeklinde tasarıma sahip mafsallı yapısının yük taşıma kapasitesi en iyi ve en düşük boşluk değeri ile üretime imkan veren tasarım olduğu belirtilmiştir. Bu tasarımı kullanarak çalışan bir mafsallı elde etmek için davul şeklinde tasarımda 0,2 mm boşluk verilmesi gerektiği ortaya konulmuştur [73]. Bu çalışmada bahsi geçen tasarımlar birlikte üretilebilir olsalar da tek parçalı bir tasarıma sahip değildir. Bu sebeple birbirlerinden ayrılabilirler. Bunun yanı sıra, davul şeklinde tasarıma sahip yapının davul bölgesindeki çap değeri ve açısının ayarlanması ile bu çalışmada verilen tolerans değerlerinden daha düşük değerler ile EBM cihazda üretilebileceği düşünülmektedir.

Wei, Tian ve Joneja (2016) tarafından bütünlük olarak üretimi gerçekleştirilecek bütünlük döner mafsalların üretimi için gerekli minimum boşluk miktarının belirlenmesi ve dinamik performansların incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada yapılan tasarımlar FDM cihaz ile üretilmiştir [74]. Wei ve diğerleri (2016) tarafından tasarlanan bütünlük döner mafsallar Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Wei ve diğerleri (2016) tarafından tasarlanan bütünlük döner mafsallar, Geleneksel tasarım (a), Davul şeklinde tasarım (b), Sonsuz dişli şeklinde tasarım (c) [74]

Wei ve diğerleri (2016) tarafından yapılan tasarımlardan ilki geleneksel döner mafsallı tasarımına sahiptir. Bir diğeri ise literatürde birçok çalışmada da kullanılan davul şeklinde tasarım [73, 75-77] tercih edilmiştir. Davul şeklinde tasarımın avantajı yüzey alanı düşük bir bölgede, karşı parçanın duvarına yaklaşarak daha düşük boşluk değerlerinde üretim gerçekleştirilebilmesidir. Birbirine yaklaşan yüzey alanları az olacağı için herhangi bir kaynama ya da yapışma durumunda tork uygulayarak açılabilceğinden bahsedilmektedir [73, 74]. Davul şeklinde tasarımın dezavantajları olarak; merdiven etkisine bağlı temas alanının az, temas yüzeyinin kontrolsüz ve mafsallı tasarımı kaynaklı serbestlik derecesinin fazla olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple sonsuz vida şeklinde tasarımın tercih edildiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, sonsuz vida tasarımı ile yüzey alanlarının karşı duvara yaklaşmasıyla aradaki boşluğun minimize edilmesinin amaçlandığı belirtilmiştir. Tasarımı sayesinde merdiven etkisinden bağımsız kontrollü temas yüzeyi oluşturabildiğinden ve birçok temas alanı oluşturulduğu için serbestlik derecesinin sınırlı olduğundan bahsedilmektedir. Yapılan çalışmada radyal boşluk değerleri deneysel olarak bulunmuştur. Sırasıyla 0,2-0,1-0,05-0,025 mm boşluk değerleri denenmiş ve hareket edebilen parçalardaki en düşük boşluk değeri 0,05 mm olarak belirlenmiştir. Burada bahsi geçen radyal boşluk değeri Şekil 2.7. de gösterilen c3 ve c2 değerleridir. Üretilen parçaların dinamik performanslarını değerlendirmek amacıyla parçalar maksimum 300 rpm minimum ise 60 rpm'de test edilmiştir. Bu testler sonucunda tepki kuvvetleri ölçüldüğünden bahsedilmektedir. Aynı zamanda yapılan tasarımların statik yük altında yer değişim miktarları ölçülmüştür [74].

Liu, Yang Y., Yang X., Wang ve Xiao (2014) SLE ile yaptıkları bütünleşik mekanizma tasarımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ölçüsel doğruluk ve boşluk miktarının karakterizasyonu araştırılmıştır. Mekanizmaların bütünleşik bir şekilde üretimi denetlenmiş olup bu sırada açılı üretimin toleranslar ve ölçüsel doğruluk üzerindeki etkileri incelenmiştir. Döner mafsallı içeren bütün mekanizmalarda davul şeklinde tasarım tercih edildiğinden bahsedilmiştir. Bu döner mafsallı minimum boşluk miktarı ise 0,2 mm olarak belirtilmiş ve 45° açılı üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen bütün mekanizmaların çalıştığı saptanmış fakat kullanılan davul şeklinde tasarımın detaylarından bahsedilmemiş ve farklı döner mafsallar arasında bir kıyaslama verilmemiştir. Bu çalışmada sadece 0,2 mm boşluk değeri ile 45° açılı bir oryantasyonda üretim yapılabildiği sonucu bulunmuştur [78].

Cali ve diğerleri (2012) tarafından küresel mafsallı yapılar için eklemeli imalata yönelik tasarım ile bütünleşik tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada SLA ve SLE cihazlar ile üretime yönelik bir tasarım gerçekleştirilmiş ve boşluk miktarları bu cihazların özelliklerine göre belirlenmiştir. Yapılan tasarımlarda üretimi gerçekleştirilen küresel mafsalların yer çekimine karşı sabit durabilmeleri için sürtünme kuvvetinden yararlanılmıştır. Bu amaçla boşluk miktarının azaltılmasına yönelik tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kuvvetini artırmak için yapılan bir çok tasarımdan bir tanesi seçilmiş ve çalışmaların bu seçilen tasarım üzerinden devam ettiği belirtilmiştir (Bkz. Şekil 2.8.) Parçaların üretim konumlarında daha fazla bir boşluk ile üretimine imkan sağlayan bu tasarım, üretimden sonra parçanın hareket ettirilmesi sonucu daha düşük boşluk değerindeki alana geçmesiyle sürtünme değerinin artmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada ölçüsel doğruluk ve boşluk değerlerinin diğer etkileri incelenmemiş, sadece sürtünme kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir [79]. Tercih edilen küresel mafsallı tasarımda kullanılan boşluk azaltma yöntemi, döner mafsallara da uygulanabilir (Bkz. Şekil 2.9.).



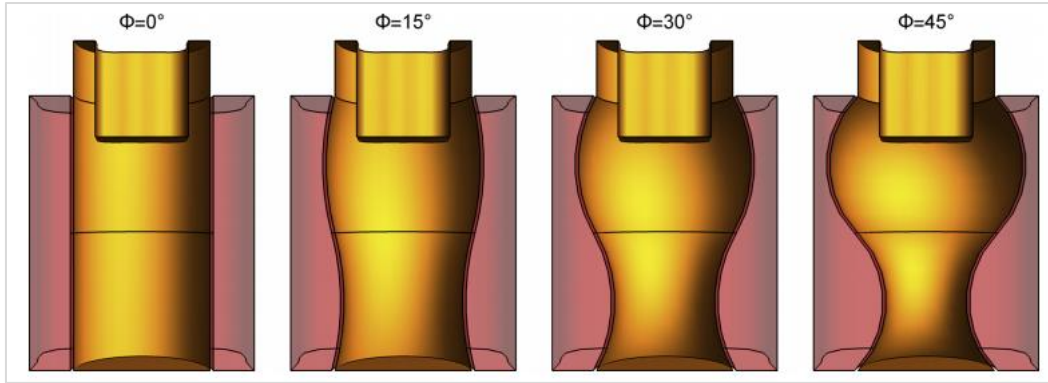
Şekil 2.8. Cali ve diğerleri (2012) gerçekleştirmiş oldukları mafsallı tasarımları [79]



Şekil 2.9. Cali ve diğerleri (2012) seçmiş oldukları boşluk azaltmalı bütünleşik küresel mafsallı tasarımları [79]

Boschetto ve Bottini (2019) SLE cihazlarda bütünleşik döner mafsallı üretilebilirliğinin incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada başta altı farklı tasarımdan bahsedilmiş fakat daha sonra tek bir tasarım ile devam edilmiştir. Şekil 2.10. gösterilen tasarımda 0,15-0,1 ve 0,05 mm boşluk değerleri denenmiştir. Aynı zamanda açılı yüzeye sahip bu tasarımda 0-15-30-45°'lik farklı açılarının üretilebilirliğe etkisi

incelenmiştir. Burada desteksiz üretimin gerçekleştirilebilmesi için açı değerinin 45° 'den yüksek olmamasına dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Aynı zamanda parçaların hem üretim yönüne paralel hem de 10° açılı bir şekilde tablaya yerleştirilip üretimi gerçekleştirilmiştir. Verilen bu 10° açının üretilebilirliğe etkisinin incelenmesi sağlanmıştır [77].



Şekil 2.10. Boschetto ve Bottini (2019) gerçekleştirmiş oldukları mafsal tasarımları [77]

Boschetto ve Bottini (2019) üretimi tamamlanan parçaların her birinin üzerlerindeki anahtar ağızı detayına yerleştirilen ve kontrolcü yardımıyla yönlendirilebilen bir torkmetre ile 6 rpm'de 20s boyunca (2 tam tur) döndürülerek, mafsalların dönüşleri boyunca uygulanan tork değerleri grafik olarak kaydedilmiştir. Bütünleşik olarak üretilen mafsallarda mil ve yatak parçasında kaynama görülen ve üretim yönüne paralel üretilen numunelerin, 10° açılı üretilen varyasyonlarında kaynama olmadığı görülmüştür. Aynı zamanda parça tasarımı tercih edilen ideal açının 30° olması gerektiği belirtilmiştir [77].

Bu bölümde bütünleşik döner mafsal tasarımları üzerine yapılmış olan güncel çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. Çalışmaların üretimlerini gerçekleştirmek için kullandıkları sistemler arasında EBM cihazların olmadığı, genellikle SLE cihazların tercih edildiği görülmüştür. Kullandıkları enerji kaynakları sebebiyle farklılaşan bu iki cihazın üretim yetenekleri de birbirinden farklıdır. Yüzey pürüzlülüğü, üretilebilir minimum delik genişliği, duvar kalınlıkları ve desteksiz üretim açısı gibi faktörler bu farklılıklardandır [25, 80-84]. Bu nedenle EBM cihazda bütünleşik döner mafsal üretimine yönelik tasarım yaklaşımları ve kurallarının bulunmadığı görülmüştür. Yapılacak olan EBM cihaz ile üretim çalışmasında, SLE cihazlara göre daha farklı sonuçlar vereceği düşünülmektedir. İncelenen çalışmalarda bulunan bir başka eksiklik ise, bütünleşik döner mafsal

tasarımlarında geleneksel tasarım, sonsuz vida şeklinde tasarım, davul şeklinde tasarım haricinde başka bir tasarımın olmadığı, yapılan çalışmaların bu tasarımlar ile sınırlı kaldığı şeklindedir. Tezde sunulan yeni tasarım yaklaşımlarının bu açıdan EBM yönteminde kullanılabilecek tasarımlara katkı sunabileceği düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda Boschetto ve Bottini (2019) haricinde, üretilen tasarımların üretim öncesi boşluk değerleri ile üretim sonrası boşluk değerleri ölçülerek karşılaştırılmamıştır. Üretim sonrası tasarımlardaki boşluk miktarları ölçülerek sistemin genel hata payı bulunabilir ve tasarımı yapılacak bütünleşik döner mafsalların ISO fit toleranslandırmalarına uygunluğu denetlenebilir nitelikte olduğu görülmüştür.

3. TASARIM YAKLAŞIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde tasarımları yapılan bütünleşik döner mafsalların, geometrik boyutlandırma özelliklerinin incelenmesi adına üretim tezgahı, tez düzeneği ve diğer sistemler anlatılmıştır. Tasarımın nasıl yapılması gerektiği ve tasarım kuralları ile ilgili yöntemlerden bu bölümde bahsedilmiştir.

3.1. Ti6Al4V metal toz malzeme

Üretim için tercih edilen tozun seçim kriterleri arasında malzemenin birçok farklı disipline hitap etmesi; implant, ısı eşanjörü, uzay ve havacılık alanlarında kullanılması ve EBM cihazlarda yaygın olarak kullanılması yer almaktadır [34, 42-45].

Bu çalışmada ARCAM'den tedarik edilmiş olan Ti-6Al-4V metal tozları kullanılarak test parçası ve döner mafsallar üretilmiştir. Kullanılan tozun boyutu 45-105 μm , ortalama boyutu ise 75 μm 'dir. Kullanılan toz, serim sırasında iyi bir akışkanlık sağlaması için küresel bir şekle sahiptir. Toz kalitesi, parçacık büyüklüğü, tozun havayla temas süresinin minimuma indirgenmiş olması ürün kalitesini etkileyen önemli faktörlerdir [45]. Ti-6Al-4V toza ait özellikler Çizelge 3.1.'de verilmiştir [45].

Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V tozu özellikleri

Metal Tozu	Ortalama Gözeneklilik (%)	Gözenek yoğunluğu (mm^{-2})	Akma Mukavemeti (Mpa)	Azami Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%)
Ti-6Al-4V	0,15	$1,6 \pm 0,9$	1074 ± 14	1132 ± 11	$7,2 \pm 0,2$

3.2. Cihazlar ve Sistemler

Elektron ışını ergitme cihazı

Bütünleşik olarak tasarlanan döner mafsallar ve test parçası, EBM teknolojisine sahip Arcam A2X cihazı ile üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen bütünleşik döner mafsalların geometrik doğrulukları, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon problemleri, termal gerilmeler, kullanılan üretim teknolojisinden, üretimin gerçekleştirildiği atmosferden ve EBM cihazın bulunduğu çevreden etkilenmektedir [80, 83, 84]. Üretim sırasında tozda meydana gelecek

oksidasyonu engellemek ve kararlı bir elektron ışını elde edebilmek için vakum ortamında yüksek saflıkta helyum dolu bir atmosferde gerçekleştirilmiştir. EBM cihazın bulunduğu laboratuvar, üretim sırasında elektronların çevre şartlarından etkilenip farklı yönlere saçılmasını engellemek adına, cihazın yakınından büyük kütleli metal herhangi bir araç geçmeyecek şekilde dizayn edilmiştir.

Döner mafsallık ölçme düzeneği

Bütünleşik olarak üretimi gerçekleştirilen döner mafsalların, tasarımı sırasında verilen tolerans değerlerinin, üretim sonrasında hangi seviyede olduğunu ölçmek için düzeneğe tasarlanmıştır. Düzeneğin temel amacı bütünleşik döner mafsallık parçalarının radyal boşluklarını ölçmektir. Düzeneğin ortasına dört adet vida ile bağlanan döner mafsallara daha önceden açılmış olan delikler üzerinden yük bağlayabilmek için ip geçirilir. Daha sonra bu ipler deney düzeneğinin her iki yanında bulunan kulelerden geçirilerek aşağıya sarkıtılır. Bu sırada bir adet komparatör bütünleşik döner mafsallık milinin üzerine yerleştirilir ve ölçüm için sıfırlanır. İplerin aşağıya bakan kısımlarına eşit ağırlıklar takılarak döner mafsalların yer çekimi kuvvetinin tersi yönde kuvvet uygulayarak yukarı kaldırılması sağlanır ve komparatör üzerinden milin hareket miktarı okunur. Okunan bu değer mil ile yatak arasındaki boşluk değerini vermektedir.

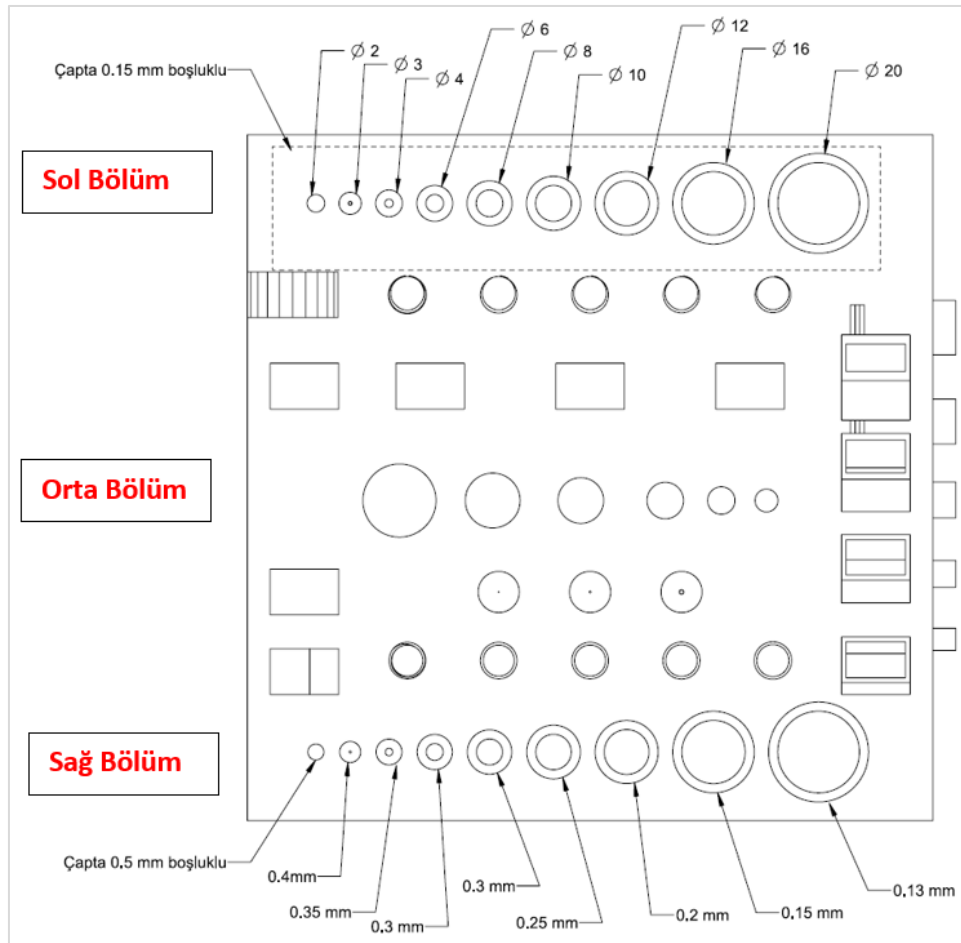
Koordinat ölçme makinesi (CMM) cihazı

Koordinat ölçme makinesinin temel işlevi, bir iş parçasının gerçek şeklinin ölçülmesi, istenen şekil ile karşılaştırılması ve boyut, form, yer, yön gibi metrolojik bilgilerin oluşturulmasıdır [85]. Bu çalışmada kullanılan CMM cihazı köprü tipi adı verilen cihazdır. Bu cihazlar, granit tabla üzerinde iki adet dikey kolon ve bu kolonlar arasına yerleştirilmiş köprü bölümünden oluşmaktadır. İki adet dikey kolon granit üzerinde hareketi sağlarken, köprü parçası hem iki kolon arasında hareket edebilmekte, hem de yukarı aşağı yönde hareketi sağlayabilmektedir [86].

3.3. EBM Test Parçası Tasarımı

Bütünleşik döner mafsalların üretilebilirliği için gerekli minimum boşluk miktarının saptanması gerekmektedir. Bu sebeple EBM cihazının ölçüsel hata payını belirleyebilmek için test parçası tasarlanmasına karar verilmiştir. Tasarlanacak test parçasının her iki

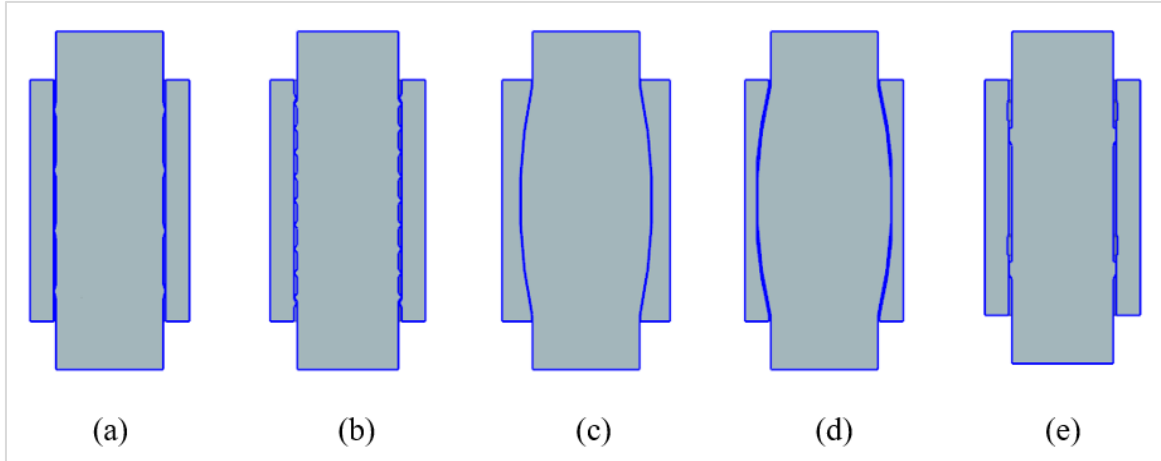
tarafında 2 mm çaptan 20 mm çap değerine kadar bütünleşik silindirlerin olması planlanmıştır. Silindir ile delik arasındaki boşluk değerleri, Resim 3.1’de gösterilen parçanın sol bölümde her çap değerinde sabit 0,15 mm; sağ bölümde ise 0,13 mm ile 0,5 mm aralığında tanımlanmıştır. Bununla birlikte döner mafsalların milleri deliklerden daha uzun tasarlanarak millerin delik içerisinde kalan bölümleri ile delik dışarısında kalan bölümleri arasında, dairesellik ve çap değerleri arasında kıyaslama yapabilme imkanı sağlanmıştır. İçerisinde mil bulunan deliklerin üretimi sonrası karşılaştırması için ise test parçasının ortasına içi boş delikler eklenmiştir. Bu sayede bütünleşik üretilmiş deliklerde çap, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılabilmesine imkan sağlanmıştır. Ayrıca desteksiz üretim kabiliyetinin belirlenmesi amacı ile açılı yüzeyler, diş detayı açılmış mil ve delikler, bütünleşik küresel mafsallar daha sonraki çalışmalarda incelenmek üzere modele eklenmiştir. Bu çalışmada sadece üretim yönüne paralel bütünleşik silindirler ve içi boş delikler incelenecektir. Bu çalışmada tasarlanmış olan test parçası Resim 3.1.’de paylaşılmıştır.



Resim 3.1. EBM test parçası iki boyutlu üst görünüşü

3.4. Bütünleşik Döner Mafsal Tasarımları

Eklemeli imalat teknolojisinin en büyük avantajlarından bir tanesi geleneksel üretim yöntemleriyle çok parçalı olarak üretilen yapıların, bütünleşik olarak üretimine imkan sağlamasıdır [73, 74, 77-79, 87]. Bu çalışmada bütünleşik olarak üretilmek istenen yapılarda kullanılacak döner mafsallara yönelik alternatif tasarımlar ve ISO Fit tolerans aralıklarına uygun toleranslandırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 5 farklı bütünleşik döner mafsal tasarlanmıştır (Bkz. Resim 3.2.). Bütünleşik döner mafsallar için tasarımda kullanılacak ISO fit toleranslandırmaları, test parçasının ölçüm sonuçlarından elde edilecek verilere göre yapılacaktır. Her bir tasarım 6-10-18-30 mm çap değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede farklı çap değerlerinde toleranslandırmaların yapılması amaçlanmıştır.

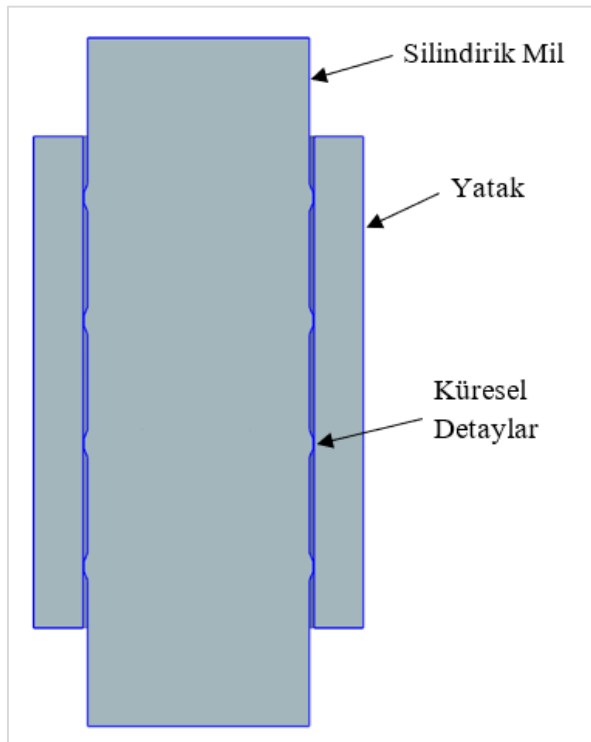


Resim 3.2. Bütünleşik döner mafsallar katı model görüntüsü: (a) Tasarım 1, (b) Tasarım 2, (c) Tasarım 3, (d) Tasarım 4, (e) Tasarım 5

Tasarım 1

Tasarım 1 (T1) (Bkz. Resim 3.3) bizim bildiğimize göre literatürde örneği görülmemiş bir tasarımdır. Bütünleşik mil silindir olarak tasarlandıktan sonra yüzeyden dışarı doğru bir örüntü içerisinde çıkıntı oluşturan küreler eklenmiştir. Yüzeyden dışarı çıkan kürelerin temel amacı üretilebilir boşluk miktarının azaltılmasıdır. Küresel çıkıntıların katman katman üretimi sırasında orta ekseninde merdiven etkisi minimum düzeyde olacaktır. Bu sayede küresel çıkıntı ile mil yatağı merdiven etkisinden etkilenmeden kontrollü bir şekilde birbirine yaklaşıacaktır. Küresel çıkıntıların orta ekseninde merdiven etkisinin minimum

olacağı katman sayısı üç olacak şekilde kürenin çap değeri ayarlanmıştır. Tasarımda kullanılan yöntem ile birlikte birbirine yakın iki duvar 3 katman boyunca düşük boşluk değerine sahip olacaktır. Bu sayede aynı bölgede ısı girdisi daha az olacağından; kaynama-yapışma beklenmemektedir. Herhangi bir kaynama ya da yapışma meydana gelse bile az bir yüzey alanında olacağı için, üretim sonrasında mili döndürmek için gerekli ilk açma torku ile kaynayan yüzeylerin birbirinden ayrılabilceği ve milin hareket edebileceği tahmin edilmektedir. Kürelerin desteksiz üretilebilmesi için mil yüzeyi ile arasındaki açının $\leq 50^\circ$ olması gerekmektedir.

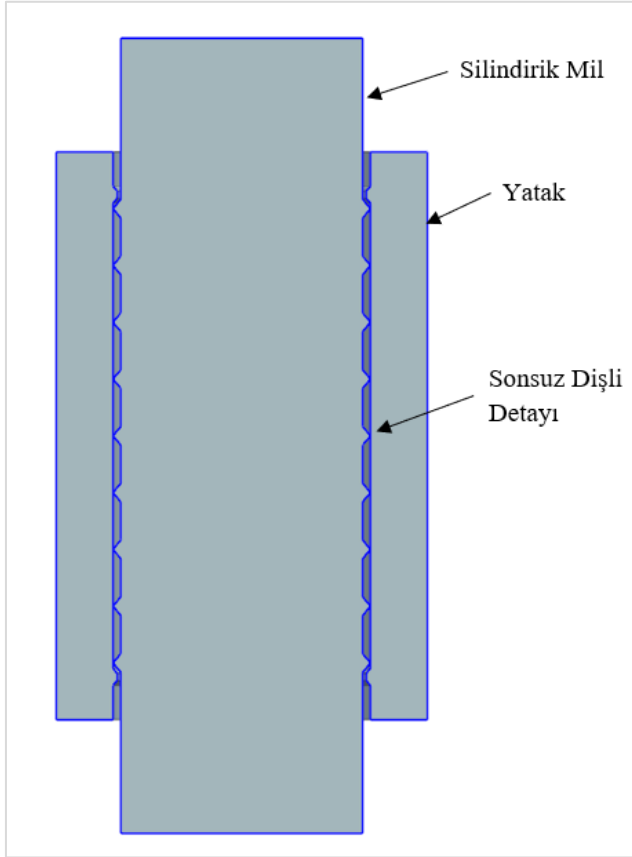


Resim 3.3. Bütünleşik döner mafsal katı model görüntüsü; Tasarım 1

Tasarım 2

Tasarım 2 (T2) (Bkz. Resim 3.4.) literatürde sonsuz vida biçimi [74] olarak adlandırılan tasarımdan esinlenilmiştir. Tasarım 2’de tasarım 1’den farklı olarak boşluk değerlerini azaltabilmek için milin üzerine küresel değil silindirik çıkıntılar yapılmıştır. Tasarım 2’de bulunan silindirik çıkıntıların düz yüzeylerin 3 katman olması planlanmıştır. Tasarımda kullandığımız yöntemde birbirine yakın iki duvar 3 katman boyunca düşük boşluk değerine sahip olacaktır. Bu sayede aynı bölgede ısı girdisi daha az olacağından; kaynama- yapışma beklenmemektedir. Herhangi bir kaynama ya da yapışma meydana gelse dahi üç katman

kalınlığı boyunca meydana geleceğinden, üretim sonrasında mili döndürmek için gerekli ilk açma torku ile kaynayan yüzeylerin birbirinden ayrılabilmesi ve milin hareket edebileceği tahmin edilmektedir. Silindirik çıkıntılarının desteksiz üretilebilmesi için mil yüzeyi ile arasındaki açının $\leq 50^\circ$ olması gerekmektedir.

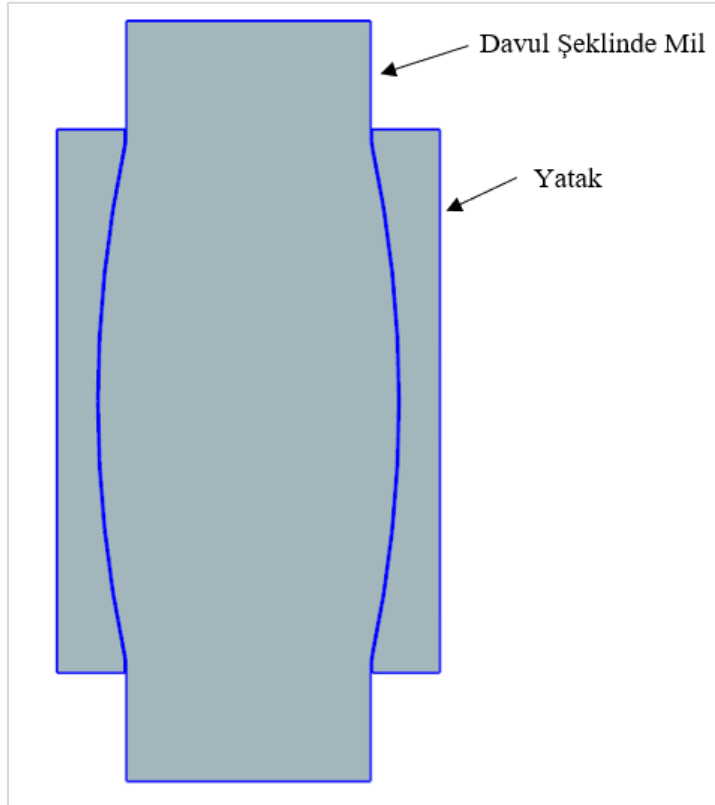


Resim 3.4. Bütünleşik döner mafsal katı model görüntüsü; Tasarım 2

Tasarım 3

Tasarım 3 (T3) (Resim 3.5.) literatürde davul biçimli [73, 75, 76, 88] olarak adlandırılan tasarımdan esinlenilmiştir. Hem mil hem de mil yatağı kavisli tasarlanmıştır. Bu kavisli tasarım sayesinde bütünleşik olarak üretim gerçekleştirilmektedir. Tasarımın kavisli yapısı sebebiyle birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Kavisli tasarım parçanın yüzeyinde merdiven etkisi oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle parçanın üretilebilir olması için gerekli boşluk miktarı belirlenirken merdiven etkisi kaynaklı ölçülerdeki hata payı hesaba katılmalıdır. Bir diğer yandan kavisli yüzeylerin desteksiz bir şekilde üretilebilir olması ve yüzeylerde sarkma meydana gelmemesi gerekmektedir. Bu nedenle kavisli yüzeylerin açılarının EBM cihazlar için $\leq 50^\circ$ olması önemlidir; ancak 50 um katman kalınlığı ile

gerçekleştirilen üretimlerde 50° kavis açısında merdiven etkisi fazla olması beklenmektedir. Merdiven etkisinin artması ile bütünleşik döner mafsallın üretilebilir olması için gerekli boşluk miktarı da artacaktır. Bu durum üretimde tekrar edilebilirliği etkileyeceği ve üretilecek döner mafsallardaki boşluk miktarının fazla olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada kavis açısı maksimum 20° olacak şekilde kısıtlanmıştır. Davul şeklinde tasarım sırasında kullanılmak üzere Matlab yazılımında program yazılmıştır. Bu program ile tasarımda gerek duyulan merdiven etkisi kaynaklı ek boşluk miktarı kavis açısına bağlı olarak hesaplanmakta; mil ve yatak duvarının kavisli yüzeylerinin merkezleri arası mesafesi bu değere uygun bir şekilde belirlenmektedir.

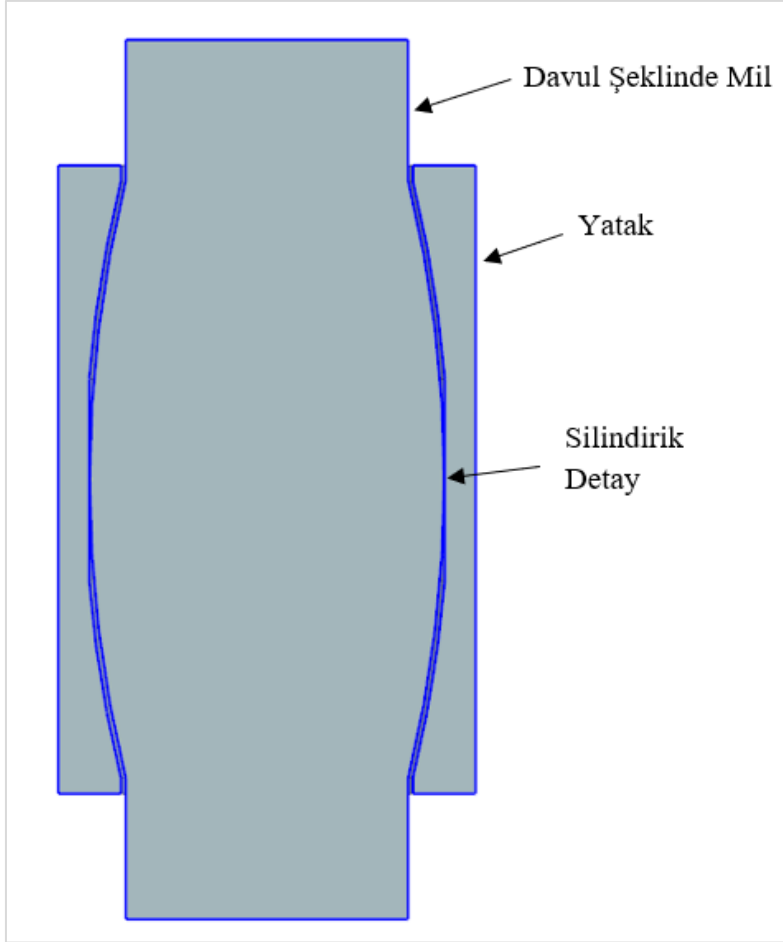


Resim 3.5. Bütünleşik döner mafsal katı model görüntüsü; Tasarım 3

Tasarım 4

Tasarım 4 (T4) (Resim 3.6.) literatürde düşük boşluklu davul biçimi olarak adlandırılmaktadır [73]. İki ayrı davul biçimli tasarım adlandırılması kullanılmaktadır. İlki tasarım 3'te olduğu gibi yatak ve milin kavisli olduğu, bir diğeri ise sadece milin kavisli, yatağın silindirik şekilde tasarlandığı bütünleşik döner mafsallardır. Tasarım 4'de hem mil kavisli hem de yatağın bir bölümü kavisli tasarlanmıştır. Milin merdiven etkisinin en az

olduğu bölge olan orta ekseninde, yatak silindir şeklinde tasarlanmıştır. Tasarım bu çalışmada kullanılan haliyle, literatürdeki tasarımlardan ayrılmaktadır. Tasarım 2 ve Tasarım 1’de olduğu gibi tasarım 4’te de izlenen yöntem belirli katman sayısı boyunca mil ve yatak arasındaki boşluk değeri EBM cihazın üretimde gerekli boşluk değerinin altına indirileceği düşünülmektedir. Herhangi bir kaynama – yapışma problemi gerçekleşmesi durumunda az bir katmanda oluşacağı için, üretim sonrası mili döndürmek için verilecek ilk açma torku ile yapışan yüzeyler birbirinden ayrılacağı düşünülmektedir. Böylece T3’e göre T4’te üretilen bütünleşik davul şeklinde mafsallın daha düşük boşluk değeri ile üretilabilir olacağı düşünülmektedir.

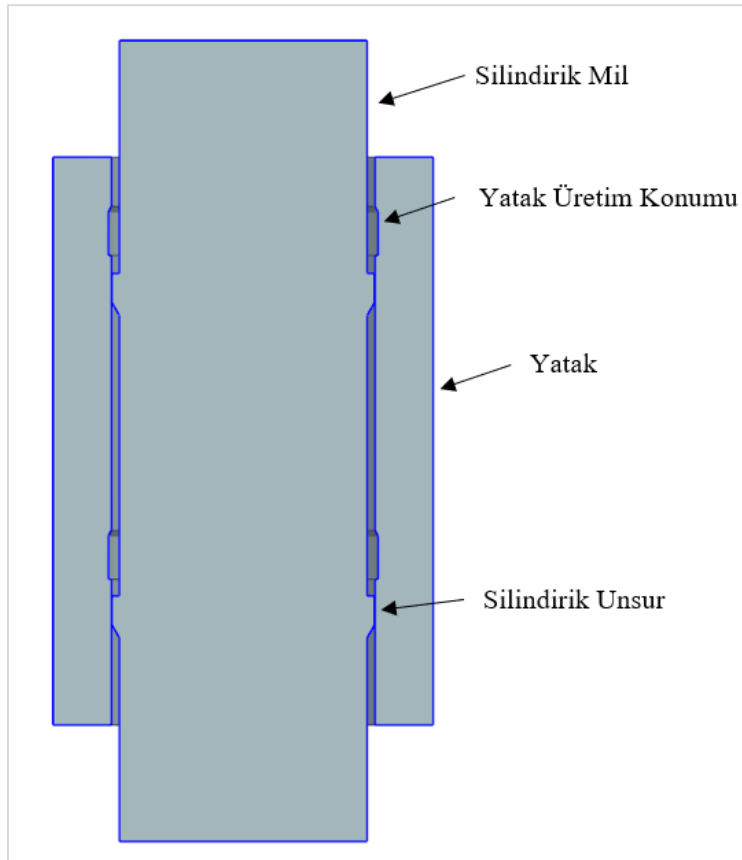


Resim 3.6. Bütünleşik döner mafsal katı model görüntüsü; Tasarım 4

Tasarım 5

Tasarım 5 (T5) (Resim 3.7.) bizim bilgimize göre literatürde bütünleşik döner mafsal uygulamasına rastlanmamış bir tasarımdır. Tasarımda Cali ve diğerleri (2012) tarafından

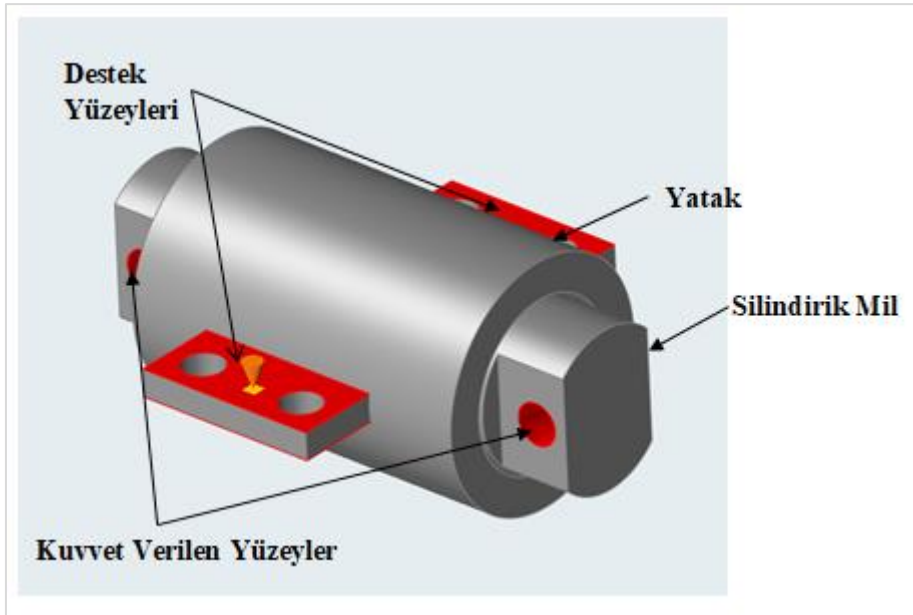
küresel mafsallar üzerinde yapılan tasarımdan esinlenilmiş, fakat bu tasarım yaklaşımı bizim çalışmamızda döner mafsallar üzerine uygulanmıştır. Tasarımda milin üzerine mil çapından 0,5 mm daha büyük çapta 2 silindir eklenmiştir. Üretim sırasında bu 2 silindirin milin yatağına kaynamaması için yatak üzerinde yer alan mildeki silindirlerin geometrisine uygun yuvalar eklenmiştir. Tasarım 5’de bulunan silindirik yapıların tasarım 2’de olan silindirlerden farkı; üretim sırasında direkt olarak çalışma toleransı ile üretilmeyip geniş bir tolerans aralığında üretilmesidir. Aynı zamanda tasarım 1’de eklenen iki adet silindirin yüzey alanları tasarım 2’de bulunan silindirlerden daha büyüktür fakat sayıları daha azdır. Yatak üzerindeki yuva detayları ile mil üzerinde bulunan silindirler destek malzemesi gerektirmeyecek şekilde açılı olarak tasarlanmıştır. Üretim pozisyonu ile çalışma pozisyonu arasındaki geçiş için bütünlük mafsalları üretimi sonrasında milin yuvada 5 mm eksenel olarak hareket ettirilerek daha dar toleranslandırma yapılan bölgeye geçişi sağlanır. Böylece mil üzerindeki silindirler mafsal yüzeyiyle temas etmeye başlar ve daha az boşluklu bir mafsal elde edilmiş olur. Bu sayede EBM cihazlarda üretilebilecek boşluk değerlerinden daha az değerlerde üretim gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.



Resim 3.7. Bütünlük döner mafsalları katı model görüntüsü; Tasarım 5 (Çalışma Konumu)

3.4.1. Bütünleşik Döner Mafsalların Yapısal Performanslarının Belirlenmesi

Bu çalışmanın amacı EBM cihazlarda üretilecek bütünleşik döner mafsalların tasarım kurallarının belirlenmesidir. Birbirinden farklı beş adet tasarımın karşılaştırılmasında çalışma toleransları haricinde, yük taşıma kapasiteleri ve stres dağılımlarının örnek bir senaryo üzerinden değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda her milin çapları ve yataktaki duvarın kalınlıkları aynı ölçülerde tasarlanmıştır. EBM cihazı ile üretilcek numunelerin katı modelleri Altair Inspire yazılımında sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelde üretilcek numunelerde kullanılacak olan Ti-6Al-4V toz malzemesinin mekanik özellikleri kullanılmıştır. Modelde sınır koşulları olarak bütünleşik döner mafsalların deney düzeneğine montajı için eklenen bağlantı ara yüzünden sabitlenmiştir. Millerin alt ve üst noktalarında bulunan deliklerden bağlantı ara yüzüne dik ekseninde 2000 N kuvvet uygulanmıştır (Bkz. Resim 3.8.).



Resim 3.8. Bütünleşik döner mafsallara uygulanan sınır koşulları

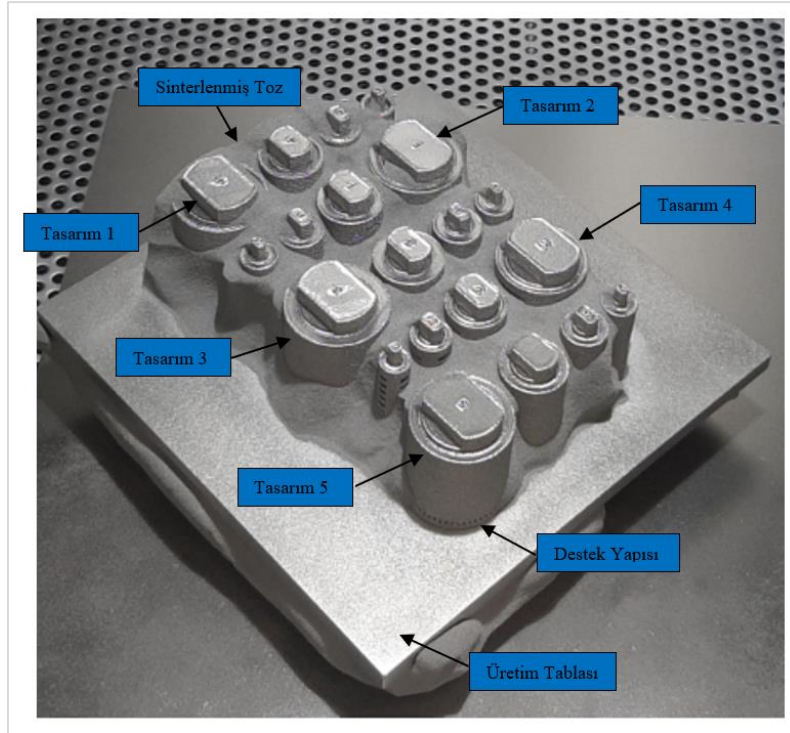
3.4.2. Üretim

Bu çalışmada, tasarımları gerçekleştirilen bütünleşik döner mafsalların EBM ile ISO toleranslarına uygun şekilde üretilebilirliğinin araştırılması planlanmıştır. Tasarımı Siemens NX yazılımında gerçekleştirilen numuneler, Arcam A2X EBM cihazda üretime hazır hale getirilmek üzere stereolitografi (STL) olarak Materialise Magics programına

gönderilmiştir. Bu aşamada her bir numune üretim yönüne paralel bir şekilde yerleştirilmiş ve tabladan 8 mm yükseltilerek numunenin altına destek yapılar eklenmiştir. Üretimi Arcam A2X EBM cihazda gerçekleştirilen ürünlerin üretimi sırasında Çizelge 3.2.'de verilen cihazın standart parametreleri kullanılmıştır. Üretimden sonra numunelerin üretim tablası üzerindeki görüntüleri ise Resim 3.9.'da verilmiştir. Üretimi tamamlanan bütünleşik döner mafsallar tabladan, ıspatula ve çekiç yardımı ile ayrılmış; numunelerin altlarında bulunan 8 mm yükseklikte destek yapılar ise kargaburnu ve pense yardımıyla numunelere zarar vermeden çıkarılmıştır. Numuneler toz yatağı içerisinde üretildiği için üretim sonrası numune içerisinde kalan sinterlenmiş tozlar, toz geri kazanım sistemi (PRS) kullanılarak temizlenmiştir (Bkz. Resim 3.9.).

Çizelge 3.2. ARCAM A2X EBM cihazı standart parametreleri [89]

Parametreler	
Model-parça doğruluk miktarı (Uzun Mesafe)	+/- 0.20 mm (3σ)
Model-parça doğruluk miktarı (Kısa Mesafe)	+/- 0.13 mm (3σ)
Işın gücü	50–3000 W
Işın boyutu	0.2 mm – 1.0 mm
Tarama hızı	8000 m/s



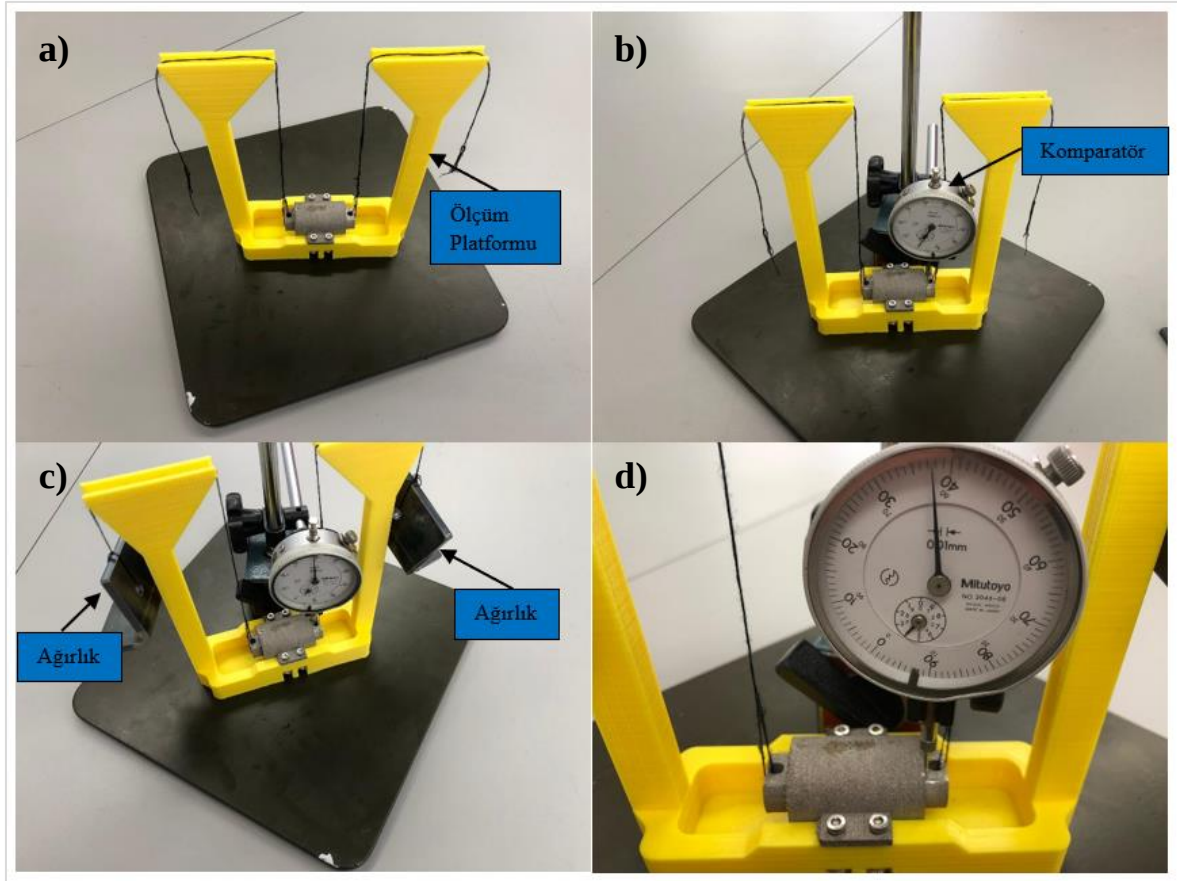
Resim 3.9. Bütünleşik döner mafsalların üretim sonrası toz geri kazanım sistemindeki (PRS) görüntüsü

3.4.3. Üretim sonrası testler ve ölçümler

Bütünleşik döner mafsallarda kullanılacak tolerans aralıklarının belirlenmesi için tasarlanıp üretilen EBM test parçası ölçümleri iki ayrı CMM ve mikrometre yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu test parçasının ölçüm sonuçlarına göre toleranslandırmaları tamamlanan döner mafsallar üretildikten sonra testlere ve ölçümlere tabii tutulmuştur.

Üretimi tamamlanan bütünleşik döner mafsalların tasarımda verilmiş olan boşluk değerleri ile üretilebilirliğinin denetlenmesi için parçalar dış yüzeylerinden mengene ile sabitlenip miller önce el veya gerekli görülen yerlerde el aletleri kullanılarak teker teker döndürülmüştür. Bu aşamada verilen tolerans değerleri ile üretilebilirlikleri denetlenmiştir. Bir diğer yandan yatak boşluk ölçümü için tasarlanan platform, bir FDM cihazında PLA malzemeden üretilmiştir.

Üretilen bütünleşik döner mafsalların 18 mm çap değerindeki numuneleri oda koşullarında 4 adet M4 vida ve somun yardımıyla ölçüm platformuna takılmıştır. Daha sonra millerin üzerinde bulunan deliklerden uygun boyutta, esnemeyen ve yüke dayanıklı ip geçirilerek deney düzeneğinin üstünden aşağıya doğru sarkıtılmıştır. İplerin boşta kalan uçlarına ağırlıklar yerleştirilmeden önce komparatör milin üzerine mil eksenine dik olacak şekilde yerleştirilmiş ve sıfırlanmıştır. Bu işlemden sonra iplerin boşta kalan uçlarına çelik bloklar asılarak millerin yatakları boşlukları boyunca yukarı yönde hareket miktarları ölçülerek kaydedilmiştir. Deneyin güvenilirliğini arttırmak için, mil 90° çevrilerek 4 ayrı açı değerinde ve her açı değerinde 4 kere olacak şekilde ölçülmüş, bu ölçümlerde çıkan değerlerin ortalaması alınmıştır. Milin 4 farklı açığa getirilerek ölçülmesiyle çap boyunca üretim kaynaklı hata payları kaydedilmiştir. Her 90° konumda ardarda 4 ölçüm gerçekleştirilerek hem sonucun doğruluğunun arttırılması amaçlanmış hem de eksen etrafında boşluk değerinin değişken olup olmadığı incelenmiştir. Bu ölçüm platformu Resim 3.10.'da gösterilmiştir.



Resim 3.10. Bütünleşik döner mafsallı ölçüm platformu adım adım ölçüm basamakları a) Milin platforma montajı, b) Komparatörün sıfırlanması, c) Ağırlıkların bağlanması, d) Maksimum boşluk değerinin komparatörden okunması

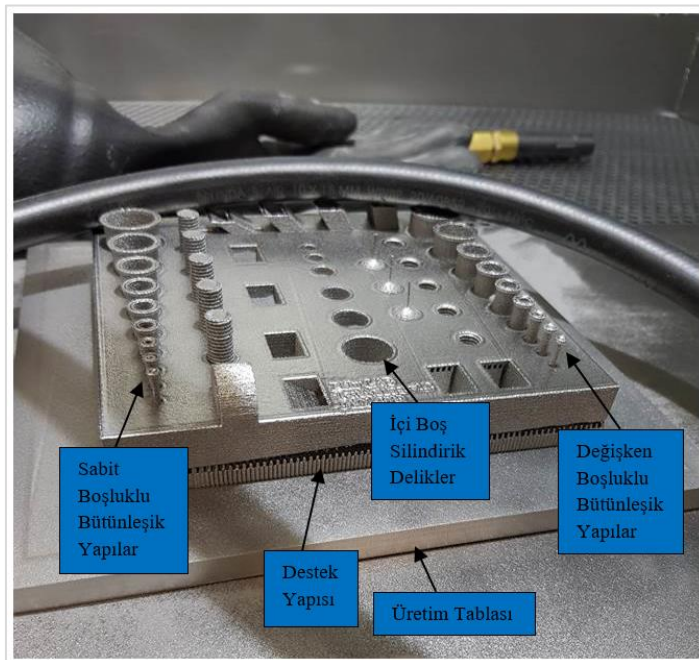
4. TASARIM DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Bu bölümde, bir önceki bölümde yapılan fiziksel ve mekanik testlerin sonuçları verilip literatürdeki bilgiler ile karşılaştırılmıştır. Üretim çıktılarından elde edilen değerler kaydedilerek sonraki çalışmalara yol göstermiştir.

4.1. EBM Test Parçası Ölçüm Sonuçları

Üretim, silindirler üretim yönüne paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Üretim yönünün bu şekilde seçilmesinin sebebi bütünleşik silindirlerin desteksiz üretimini sağlamaktır. Aynı zamanda silindirlerin üretim yönüne paralel yerleştirilmesiyle, daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve merdiven etkisinin olmayışı aradaki boşluk değerinin daha az olmasına imkan sağlayacaktır [73, 90, 91].

Deliklerin içerisinde bulunan silindirler delik girişlerini kapatmayacak şekilde tasarlandığı ve deliklerin derinliği 15 mm olduğu için toz kaçış yollarına ihtiyaç duyulmamıştır. Üretim ARCAM A2X EBM cihazında, Ti6Al4V tozu (40-105 μm) kullanılarak 0,05 mm katman kalınlığı ile 15 saatte gerçekleştirilmiştir. Üretim sonrasında ARCAM PRS’de parça üzerindeki sinterlenmiş tozlar temizlenmiştir (Resim 4.1.).



Resim 4.1. EBM test parçası üretim sonrası PRS görüntüsü

Bütünleşik olarak üretimi gerçekleştirilen döner mafsalların tamamının üretim sonrasında yuvaları içerisinde hareket edebildiği görülmüştür. Tasarım sürecinde verilmiş olan tolerans değerlerinin üretilebilir olduğu anlaşılmıştır. Üretim sonrasında hem delik içlerinin hem de silindirlerin dış çaplarının denetlenebilmesi için silindirlerin üst bölgesi freze ile kesilerek deliklerden çıkartılmıştır. Daha sonrasında tüm delikler 2 farklı CMM ile ölçülmüş, çap ve silindiriklik değerleri kaydedilmiştir. Silindirlerin ise delik içerisinde ve dışarısında kalan bölgelerinden çap ve dairesellik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve değerler kaydedilmiştir. Son olarak içerisinde silindir olan delikler ile içi boş olarak üretilmiş deliklerin yüzey pürüzlülüğünün kıyaslanabilmesi için farklı noktalarından yüzey pürüzlülüğü ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Sol ve sağ bölüme ait sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen ölçüm sonuçlarında nominal çap olarak belirtilen değerler, bütünleşik olarak üretilecek deliklere tasarımda verilmiş değerlerdir. İki ayrı CMM ile ölçülen değerlerin ortalamasının sol bölgede 0,103 mm; sağ bölgede ise 0,113 mm olduğu görülmüştür. Bu değerler Çizelge 4.2.’de verilen içi boş üretilmiş deliklerin ölçüm değerleri ile kıyaslandığında, içerisinde mil bulunan deliklerin ortalama ölçüsel doğruluğunun 85µm yani %55 daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin içerisinde mil bulunan deliklerdeki millerin üretim sırasında destek malzemesi gibi davranıp delik içerisindeki duvarları çökmeye karşı desteklediği düşünülmektedir. Aynı zamanda üretim sonrası soğuma aşamasında yani parçanın ölçüsel olarak küçülmeye çalıştığı anlarda yine millerin destek malzemesi görevi görerek delikleri desteklediği düşünülmektedir.

Çizelge 4.1. Bütünleşik silindirlerin deliklerinin ölçüm değerleri

Ölçüm değerleri	Nominal Çap (mm)							
	20	16	12	10	8	6	4	3
Sol bölüm								
Delik ölçüm 1	19,93	15,92	11,86	9,92	7,94	5,94	3,94	2,97
Fark	0,07	0,08	0,14	0,08	0,06	0,06	0,06	0,03
Delik ölçüm 2	19,84	15,83	11,82	9,85	7,83	5,88	3,94	2,94
Fark	0,16	0,17	0,18	0,15	0,17	0,12	0,06	0,06
Ortalama fark				0,103				
Sağ bölüm								
Delik ölçüm 1	19,95	15,84	11,82	9,92	7,75	5,89	3,9	2,89
Fark	0,05	0,16	0,18	0,08	0,25	0,11	0,1	0,11
Delik ölçüm 2	19,87	15,86	11,83	9,83	7,87	5,87	3,9	2,88
Fark	0,13	0,14	0,17	0,17	0,13	0,13	0,1	0,12
Ortalama Fark				0,113				

Çizelge 4.2. İçi boş olarak üretilmiş deliklerin ölçüm değerleri

Ölçüm değerleri (mm)	Nominal Çap (mm)					
	16	12	10	8	6	5
Ölçüm 1	15,84	11,81	9,79	7,81	5,8	4,8
Fark 1	0,16	0,19	0,21	0,19	0,2	0,2
Ölçüm 2	15,852	11,838	9,795	7,808	5,8	4,797
Fark 2	0,148	0,162	0,205	0,192	0,2	0,203
Ortalama Fark	0,188					

Test parçasının tasarımında bütünleşik millerin delik içerisinde bulunan bölümleri ile delik dışarısında kalan bölümleri arasında ölçüsel farklılıkları incelemek için miller daha uzun üretilmiştir. Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4.'te millerin delik içerisinde kalan alanlarının orta eksenini ile dışarıda kalan bölgenin orta ekseninden alınan ölçüm sonuçları paylaşılmıştır. Değerler incelendiğinde, millerin delik içerisinde kalan bölgelerindeki çap değerlerinin, delik dışarısında bulunan bölgedeki çap değerlerine göre sol bölgede %59, sağ bölgede %34 oranında nominal değere daha yakın bir değerde üretildiği görülmektedir. Yani delik içerisinde bulunan bölgedeki çap değerlerinin, delik üstünde kalan bölgeye göre nominal değere sol bölgede ortalama 0,046 mm, sağ bölgede ise 0,019 mm daha yakın değerde üretilmiştir. Bunun sebebinin delik içerisinde bulunan millerin delik duvarına yakın olması kaynaklı lokal bölgelerde kaynarak birlikte hareket etmeye başladıkları ve bu yüzden çap değerindeki daralmanın az olduğu, fakat delik dışarısında kalan bölgenin büyük kütleli parçadan kısmen bağımsız hareketi sonucu nominal çaptan bir miktar daha fazla uzaklaştığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Bütünleşik olarak üretilen soldaki millerin alt ve üst bölgelerinin ölçüm değerleri

Fark	Nominal Çap (mm)						
	19,85	15,85	11,85	9,85	7,85	5,85	3,85
Üst fark	0,1065	0,08	0,12	0,105	0,055	0,04	0,045
Alt fark	0,055	0,035	0,0525	0,055	0,0225	-0,0125	0,02

Çizelge 4.4. Bütünleşik olarak üretilen sağdaki millerin alt ve üst bölgelerinin ölçüm değerleri

Fark	Nominal Çap (mm)						
	19,87	15,85	11,8	9,75	7,7	5,7	3,65
Üst fark	0,1	0,12	0,07	0,025	0,035	0,06	-0,015
Alt fark	0,08	0,08	0,045	0,015	0,01	0,03	-0,005

Bütünleşik olarak tasarlanmış delik ve millerin arasına farklı boşluk değerleri verilmiştir. Üretim sonrası yapılan ölçümler ile tasarımda verilen boşluk değerleri Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Değerler incelendiğinde tasarım sırasında verilen tolerans değerlerinden daha düşük değerler elde edildiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 4.5.). Daha önceki Çizelge 4.1 ve 4.2'de paylaşılan sonuçlara göre parçaların üretim sonrası geometrik ölçülerinin küçüldüğü saptanmıştır. Bu sonuçlara göre test parçasının üretimi sonrasında deliklerin millere göre çaplarının daha fazla küçüldüğü sonucuna varılmıştır. Test parçasının tasarımında verilen boşluk değerleri ile ölçüm sonuçlarından elde edilen sonuçların farkı sistemin bütünleşik yapı üretimindeki genel hata miktarını verecektir. Bu çalışmada, tasarlanacak olan bütünleşik döner mafsalların toleranslandırma çalışmaları test parçasının ölçüm sonuçlarındaki hata payları dikkate alınarak yapılacaktır. Bu amaçla çizelge 4.5'de paylaşılan sonuçları incelediğimizde 0,15 mm sabit boşluk değerine sahip bütünleşik tasarımda iki CMM ölçümü sonucunun ortalaması alındığında; ortalama hata miktarı 0,079 mm olarak bulunmuştur. Farklı tolerans değerlerindeki bütünleşik tasarımın sonuçları ise çizelge 4.6'da paylaşılmıştır ve ortalama hata payının 0,099 mm olduğu saptanmıştır.

Bu hata miktarını oluşturan bileşenlerin:

- EBM cihazından kaynaklanan ve sürekli olarak aynı değerdeki hatalar
- Ortam şartlarına bağlı olarak oluşan hatalar
- Tozun kalitesine, nem oranına bağlı oluşan hatalar
- Ölçüm cihazlarına bağlı olarak oluşan hatalar

olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak elde edilen bu hata miktarları ölçüm cihazına bağlı hatalarıda içerdiği için tam anlamıyla EBM sisteminin genel hata miktarını yansıtmamaktadır. Bu sebeple sistemin hata miktarının bulunan değerlerden daha düşük olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.5. Sol bölümdeki silindirler ile deliklerin arasındaki boşluk değerleri

Boşluk değeri	Çap Değeri (mm)						
	20	16	12	10	8	6	4
Nominal Boşluk	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Yuva ile silindir arası fark 1	0,135	0,105	0,062	0,125	0,112	0,077	0,11
Yuva ile silindir arası fark 2	0,045	0,015	0,019	0,054	0,001	0,021	0,108
Hata miktarı 1	0,015	0,045	0,087	0,025	0,037	0,072	0,04
Hata miktarı 2	0,105	0,135	0,130	0,096	0,148	0,128	0,042
Ortalama hata miktarı 1				0,046			
Ortalama hata miktarı 2				0,112			

Çizelge 4.6. Sağ bölümdeki silindirler ile deliklerin arasındaki boşluk değerleri

Boşluk Değerleri	Çap Değeri (mm)						
	20	16	12	10	8	6	4
	Nominal Boşluk (mm)						
	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3	0,3	0,35
Yuva ile silindir arası fark 1	0,16	0,07	0,065	0,185	0,06	0,225	0,245
Yuva ile silindir arası fark 2	0,075	0,092	0,07	0,09	0,184	0,203	0,245
Hata miktarı 1	-0,03	0,08	0,135	0,065	0,24	0,075	0,105
Hata miktarı 2	0,055	0,058	0,13	0,16	0,116	0,097	0,105
Ortalama hata miktarı 1				0,096			
Ortalama hata miktarı 2				0,103			

Bütünleşik olarak tasarlanan delikler ile içi boş deliklerin silindiriklik, dairesellik ve yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 4.7., Çizelge 4.8. ve Çizelge 4.9.'da verilmiştir. Değerler karşılaştırıldığında bütünleşik olarak üretimi gerçekleştirilen deliklerin, içi boş deliklere oranla silindiriklik değerleri ortalama %36, dairesellik ortalama %44 ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) ortalama %37 daha iyi elde edilmiştir. Özellikle EBM cihazların ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) literatürde 30-35 μm [92, 93] olarak verilmekirken bu çalışmada hiçbir ardıl işlem uygulanmadan yüzey pürüzlülüğü (Ra) sadece tasarım yöntemiyle 17,53 μm değerine düşürülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu düşüş miktarının; silindir ve deliğin birbirine yakın olması (0,15 mm) ve buna bağlı olarak arada kalan toz miktarının az olması sayesinde sağlandığı düşünülmektedir. Bu sayede ergiyik havuz etrafında bulunan toz miktarı az olacağından, yüzeye yapışarak pürüzlülüğü arttıracak toz miktarının da az olduğu sonucuna varılmıştır. Dairesellik ve silindiriklik değerlerinin iyileşmesinin sebebi ise üretim sonrası soğuma aşamasında yani parçanın ölçüsel olarak küçülmeye çalıştığı anlarda millerin destek malzemesi görevi görerek delikleri desteklediği ve geometrik bozulmaların azaldığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.7. Bütünleşik olarak tasarlanan delikler ile sol bölgedeki içi boş deliklerin silindiriklik, dairesellik ve yüzey pürüzlülük değerleri

Değişken	Nominal Çap (mm)							
	20	16	12	10	8	6	4	3
Silindiriklik (μm)	30	65	78	36	89	45	18	16
Dairesellik (μm)	49	41	36	36	78	70	32	29
Yüzey Pürüzlülük (Ra)	23,3	20,093	21,085					

Çizelge 4.8. Bütünleşik olarak tasarlanan delikler ile sağ bölgedeki içi boş deliklerin silindiriklik, dairesellik ve yüzey pürüzlülük değerleri

Değişken	Nominal Çap (mm)							
	20	16	12	10	8	6	4	3
Silindiriklik (μm)	65	54	60	51	51	58	42	31
Dairesellik (μm)	77	48	72	27	31	45	29	51
Yüzey Pürüzlülük (Ra)	17,53	26,019	23,072					

Çizelge 4.9. Bütünleşik olarak tasarlanan delikler ile orta bölgedeki içi boş deliklerin silindiriklik, dairesellik ve yüzey pürüzlülük değerleri

Değişken	Nominal Çap (mm)					
	16	12	10	8	6	5
Silindiriklik (μm)	105	59	66	71	74	89
Dairesellik (μm)	57	59	106	75	83	127
Yüzey Pürüzlülük (Ra)	35,818	32,963				

Test parçasının ölçüm sonuçları sayesinde farklı tasarımlara sahip bütünleşik döner mafsalların toleranslandırma çalışmalarında kullanılabilecek veriler bulunmuştur. Test parçası sonuçlarına göre üretimi gerçekleştirilen en küçük tasarım boşluğu değerinin 0,13 mm olduğu görülmüş, fakat bu değer üretim sonrası ortalama sonuçlar neticesinde 0,04 mm değerlerine kadar düşebildiği görülmüştür. Bütünleşik döner mafsallarda üretilebilir en düşük boşluk miktarı belirlendikten sonra bu değer çevresindeki ISO fit aralıkları kullanılacaktır. Değerler incelendiğinde sabit tolerans aralığına sahip bütünleşik yapılarda elde edilen 0,079 mm hata miktarı dikkate alınarak bütünleşik döner mafsalların tasarımına devam edilecektir. Bütünleşik döner mafsallardaki bir diğer amaç üretilebilecek en düşük ISO fit aralığı ile üretimi gerçekleştirmektir, bu sebeple değişken tolerans aralığına sahip bölgede boşluk değerleri 0,5 mm ye kadar arttığı için artık mil ve deliğin davranışlarının farklılaştığı bu sebeple geniş toleransların hata miktarında artışa sebep olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple daha doğru sonuç vereceği düşünüldüğü için 0,079 mm hata

miktarı çevresindeki ISO fit toleranslandırmaları kullanılacaktır. Aynı zamanda 0,079 mm hata miktarı değerinin altında verilecek bir boşluk değerinde üretimde tekrarlanabilirliği azaltacağı düşünülmektedir.

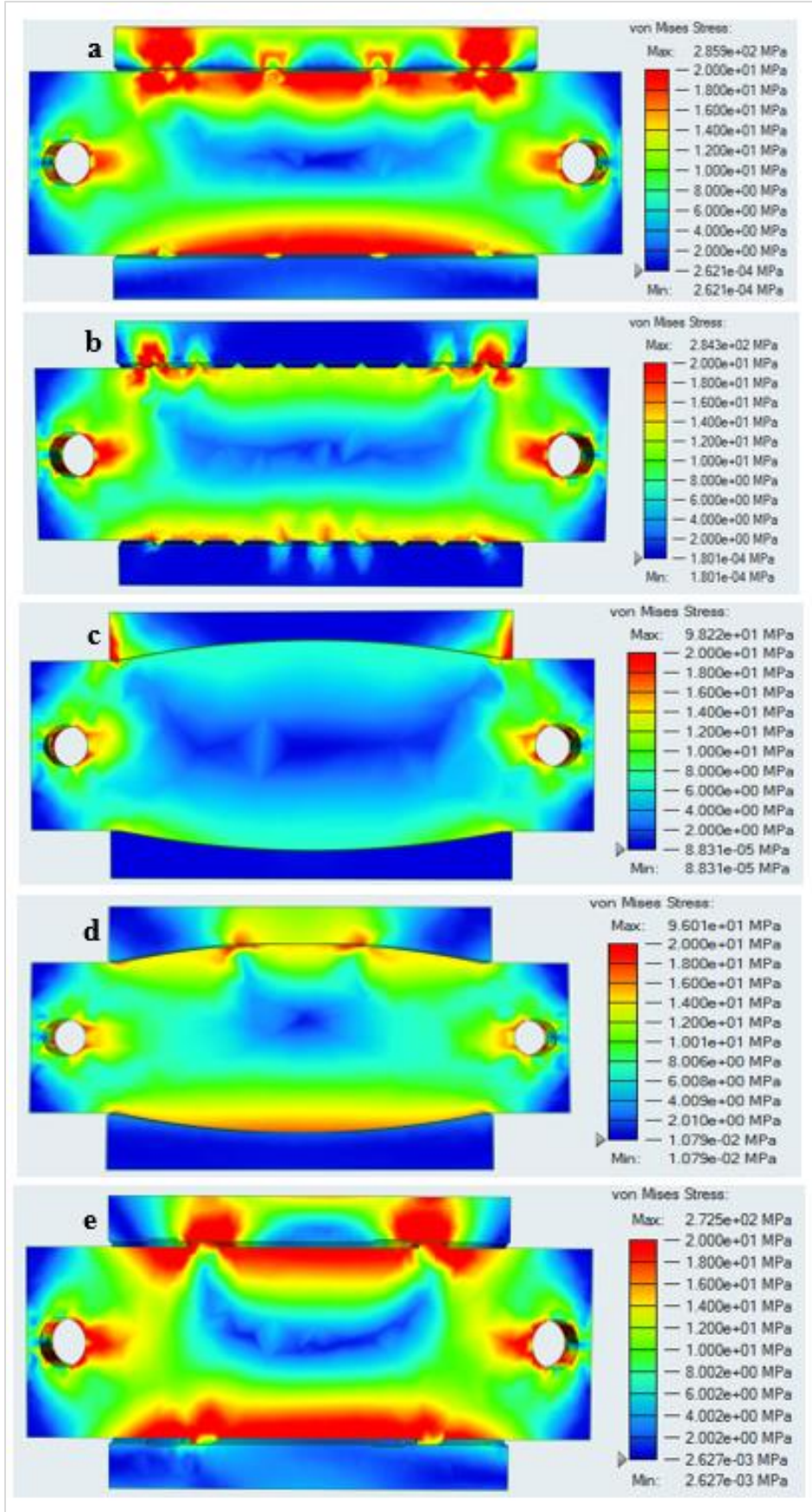
Test parçasının ölçümlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, EBM cihazın yeteneklerinin sadece tasarım yaklaşımları ile iyileştirilebildiği görülmüştür. Bizim bilgimize göre literatürde, böyle bir tasarım yaklaşımı ile EBM cihazın üretim yeteneklerinin iyileştirildiğinden bahsedilmemektedir. Eğer ölçüsel doğruluğu yüksek, geometrik özellikleri kontrollü ve yüzey pürüzlülüğü düşük bir parça ya da parça üzerindeki bir unsur EBM cihaz ile üretilmek isteniyor ise;

- Parçanın ya da parça üzerindeki bir unsurun hassas olması istenilen bölgesine ince duvarlara sahip ve parça ile arasında 0,15 mm boşluk olacak şekilde yapılar modele eklenebilir.

Böylelikle, bu çalışmada üretilen test parçasındaki bütünleşik yapılarda olduğu gibi, geometrik özellikleri iyileştirilmiş yapılar elde edilebilir.

4.1.1. Bütünleşik döner mafsalların yapısal performansları

Bütünleşik döner mafsalların yük taşıma kapasitesi ve stres dağılımının gösterilmesi için sonlu elaman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek von Mises gerilimi T2 ve T5; en düşük von Mises gerilimi ise T3 ve T4 tasarımlarında görülmüştür. Millerin üzerindeki stres dağılımının daha net anlaşılabilmesi için, 20 Mpa'daki von Mises gerilimleri Resim 4.2.'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi gerilim dağılımı T3 tasarımında gözlemlenmiştir. T3 harici tasarımlarda yatak ile mil arasındaki temas eden yüzey alanları tasarım yaklaşımı sebebiyle küçüktür. Bu sebeple bu millerde stresin en yüksek olduğu bölgeler düşük yüzey alanına sahip temas alanlarının etrafında toplanmıştır. Davul şeklinde tasarıma sahip T3 tasarımının temas alanı fazla olduğu için gerilim dağılımı diğerlerine göre daha düzenli olmuştur.



Resim 4.2. Bütünleşik döner mafsalların yapısal analiz sonuçları a) Tasarım 1, b) Tasarım 2, c) Tasarım 3, d) Tasarım 4, e) Tasarım 5

4.2. Tasarım Detayları

Bütünleşik döner mafsalların EBM cihazlar ile üretiminde gerekli tasarım kuralları üretim öncesi öngörüler ve üretim sonrası ölçümlerin karşılaştırılması ile çıkartılmıştır. Çalışmada kullanılan beş ayrı tasarımın (T1, T2, T3, T4 ve T5) üretimi için gerekli toleranslandırmalar ise daha önce yapılmış olan bu EBM test parçasının ölçüm sonuçlarından faydalanılarak yapılmıştır. Test parçasından elde edilen sonuçlar incelendiğinde her bir döner mafsalları için 0,079 mm hata payı dikkate alınarak üretilebilir olduğu düşünülen en düşük boşluk değerine sahip ISO fit tolerans aralığı seçilmiştir. Böylelikle daha önce literatürde EBM’de üretilecek bütünleşik döner mafsalları tasarımında tercih edilmemiş olan bu toleranslandırma aralığında üretim gerçekleştirilmiştir.

Bütünleşik döner mafsalların toleranslandırmalarında kullanılan ISO fit tolerans aralıkları (Serbest döner alıştırma, hafif döner alıştırma, döner alıştırma) ve bu aralıklardaki minimum ve maksimum boşluk değerleri Çizelge 4.10.’da paylaşılmıştır.

Çizelge 4.10. ISO fit tolerans aralıkları ve bu aralıklardaki minimum ve maksimum boşluk değerleri

Nominal Ölçü	Tolerans aralıkları (µm)				
	H9-c9	H8-d9	H7-e7	H6-f6	H8-f7
3-6 mm	70-130	30-68	20-44	10-26	10-40
6-10 mm	80-152	40-98	25-55	13-31	13-50
10-18 mm	95-182	50-120	32-68	16-38	16-61
18-30 mm	110-214	65-150	40-72	20-44	20-74
30-40 mm	120-244	80-181	50-100	25-57	25-89

T1 numunesinin, özellikle 6 mm, 10 mm ve 18 mm çap değerlerinde H8-f7 tolerans aralığının maksimum boşluk değeri test parçasından elde edilen 0,079 mm hata payının altında kalmaktadır. Fakat küçük yüzey alanına sahip küresel çıkıntıların geçici kaynama riski ile üretilebilir olacağı düşünülmüş ve tasarım bu tolerans bandı kullanılarak yapılmıştır. H8-f7 tolerans bandına uygun üretim gerçekleştirilirse, bu banttan daha geniş aralığa sahip toleranslarda da üretim gerçekleştirileceği için, üretilebilir olduğu düşünülen en düşük tolerans bandı seçilerek çalışma gerçekleştirilmiştir.

T2 numunesinin T1 numunesi ile tasarım yaklaşımları benzerdir. T2 numunesinde farklı olarak daha geniş yüzey alanlarına sahip silindirik yüzeyleri bulunmaktadır. T2

numunesinin üretimi içinde geçici kaynama riski ile birlikte H8-f7 tolerans bandına uygun tasarım gerçekleştirilmiştir.

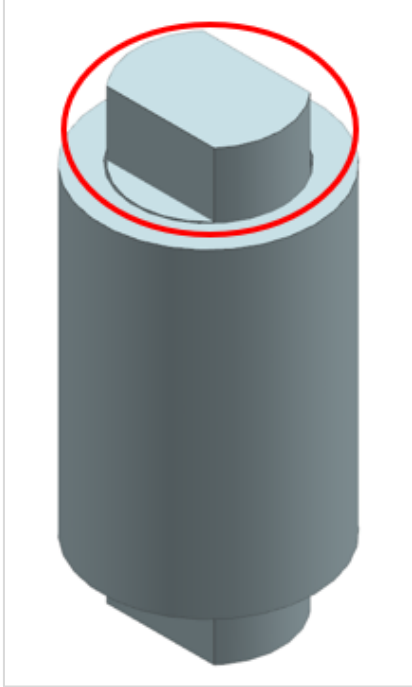
T3 numunesi kavisli yüzeye sahip olduğu için bu yüzeylerde merdiven etkisi görülmektedir. Tasarımda kavisli yüzeyin maksimum açısı 20° ile sınırlandırılmıştır ve bu açı değerinde yüzeylerdeki toplam merdiven etkisinin $32 \mu\text{m}$ hataya sebep olacağı hesaplanmıştır. Test parçasının sonuçlarından elde edilen $79 \mu\text{m}$ hata ile merdiven etkisinden kaynaklı ölçüsel hata toplandığında $111 \mu\text{m}$ toplam hata miktarı bulunmaktadır. Bu değer ile tolerans tablosu kıyaslandığında H8-d9 tolerans bandının maksimum boşluk miktarının, 6 mm çap değerindeki numune hariç, geri kalan numuneler için üretilebilir olacağı düşünülmüş ve tasarım bu tolerans bandında elde edilen maksimum boşluk değeri ile tasarlanmıştır.

T4 numunesi kavisli yüzeye sahiptir, fakat merdiven etkisinin minimum olduğu orta ekseninde milin yatağı silindirik olarak tasarlanmıştır. Böylelikle milin orta eksenindeki merdiven etkisi sıfıra yakın, yatak bölgesinde ise silindirik tasarım kaynaklı sıfır olacağı için T3 numunesine göre daha düşük boşluk miktarına sahip tolerans bandında üretilebilir olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple T4 numunesinde geçici kaynama riski ile birlikte H8-f7 tolerans bandının üretilebilir olacağı düşünülmüş ve tasarım bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

T5 numunesi üretimi ile çalışma toleransı farklı olmasına imkan sağlayan bir tasarıma sahiptir. Bu sayede EBM cihazda üretilebilecek en düşük boşluk miktarından daha düşük bir boşluk ile üretimin gerçekleştirilmesine imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada T1-T2 ve T4 numunelerine geçici kaynama riski göze alınarak H8-f7 tolerans bandı tanımlanmıştır. T5 numunesinin bu tolerans bandından daha düşük değerlerde üretilebileceği düşünülmektedir, fakat diğer numuneler ile karşılaştırılabilmesi için çalışma bölgesine H8-f7 tolerans bandı tanımlanmıştır.

Çalışmada EBM teknolojisi ile Ti-6Al-4V metal tozundan, 6-10-18-30 mm çap değerlerinde ve 40 mm boyunda üretilen bütünleşik döner mafsalların, üretim sonrası ardıl işlemleri tamamlandıktan sonra, her birinin çalışma durumu kontrol edilmiştir. Yapılan kontroller sırasında tasarımda ön görülen geçici kaynama riskine sahip T1, T2 ve T4 numaralı numunelerin tamamında geçici kaynama gerçekleştiği görülmüştür. Bu parçaların

hareket ettirilebilmesi için, mafsallar dışlarından mengene ile sabitlenip, tasarımda eklenen (Bkz. Şekil 4.1.) anahtar ağzı detaylarından el aleti yardımıyla çevrilmiştir.



Şekil 4.1. Bütünleşik döner mafsallı anahtar ağzı detayı

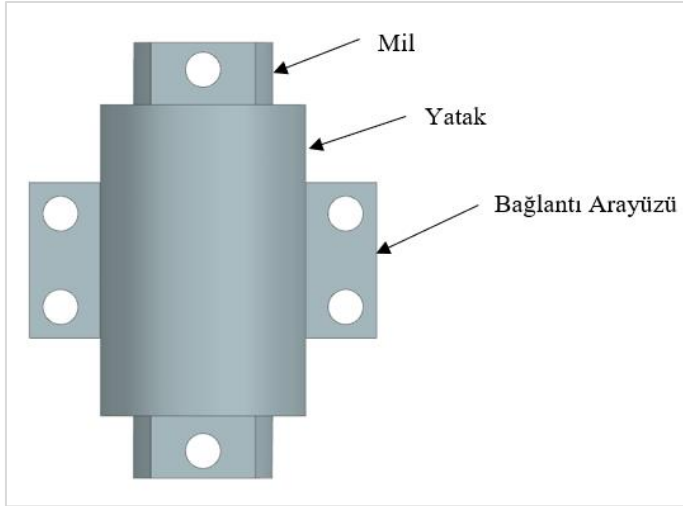
İlk hareket için gerekli olan bu açma torkunun el aleti yardımıyla verilmesinden sonra, millerin yuvalarında dönmeye başlamasına rağmen meydana gelen geçici kaynama problemine bağlı olarak parçaların dönüşleri sırasında takılmalar, sıkışmalar olduğu görülmüştür. Dönüş sırasında meydana gelen bu sıkışmaların sebebinin birbirinden ayrılan yüzeylerin üzerinde kalan ve düzensiz kopma kaynaklı oluşmuş metal parçalar (çapak) olduğu düşünülmektedir. Parçaların bütünleşik olması kaynaklı içeride meydana gelen çapakların temizlenmesi mümkün olmadığı için parçalar alıştırma yöntemi ile belirli bir süre boyunca el aleti yardımıyla sağa ve sola peş peşe bir süre döndürülmüştür. Mili döndürmek için ihtiyaç duyulan tork değerinin her bir turda azaldığı hissedilmiş ve bir süre sonra milin sıkışma olmadan dönmeye başlamıştır. Bu sırada mil ile yatak arasından dışarıya çıkan sinterlenmiş toz ve ufak metal parçaları olduğu görülmüştür. Bu aşamada miller el ile herhangi bir takılma veya sıkışma problemi olmadan dönmeye başlamıştır. Dolayısı ile alıştırma sürecinin T1, T2 ve T4 numunelerinde gerekli olduğu anlaşılmıştır.

T3 numaralı numunelerin hepsinde kaynama meydana gelmiştir ve üretim sonrasında miller yatakları içerisinde döndürülememiştir. Açılı yüzeylere sahip T3 numunelerinin

üretiminde merdiven etkisi meydana gelmektedir. Merdiven etkisi, katman kalınlığı ve yüzeyin üretim tablası ile açısına göre hesaplanmaktadır. Başlangıçta verilen H8-d9 tolerans bandı üretilebilir olarak öngörülen boşluk miktarına çok yakındır. Bu sebeple parçaların kaynadığı düşünülmektedir. Bu sonuç sonrasında T3 numunelerinin bir üst tolerans bandı olan H9-c9 aralığında üretilmesi için tasarım güncellenmiştir.

T5 numaralı numunelerde herhangi bir kaynama problemi meydana gelmeden üretimi gerçekleştirilmiştir. Millerin üretim konumlarından çalışma bölgelerine geçişlerinde bir problem ile karşılaşılmamıştır. Milin çalışma bölgesinde de herhangi bir sıkışma problemi olmadan hareket ettiği görülmüştür.

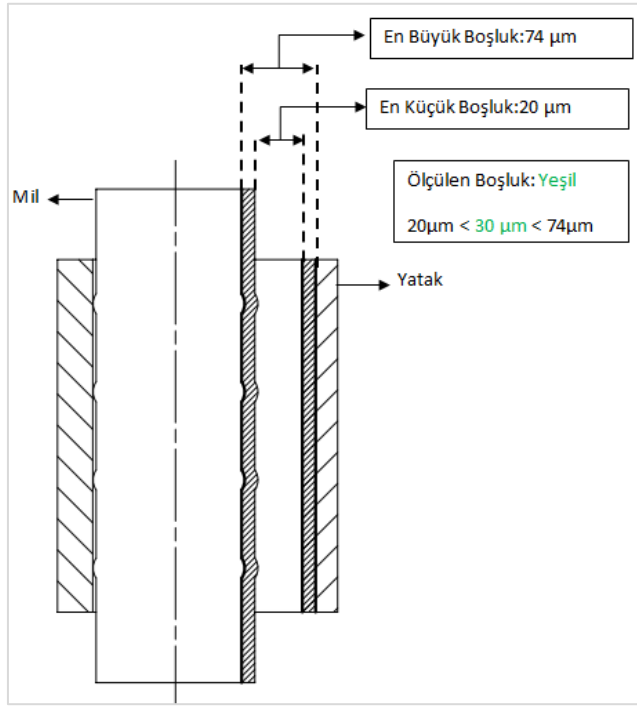
T3 numunelerinin güncel tasarımları ile birlikte geri kalan numunelerin 18 mm çap değerine sahip örnekleri yatak boşluklarının ölçümü için deney düzeneğine uygun bağlantı ara yüzü eklenerek yeniden üretilmiştir (Bkz. Şekil 4.2.). Üretim sonrasında T1, T2 ve T4 numaralı numunelerde geçici kaynama meydana gelmiş ve alıştırma yapılmıştır. T3 numunelerinin yeni toleranslandırması ile üretilebilir olduğu görülmüştür.



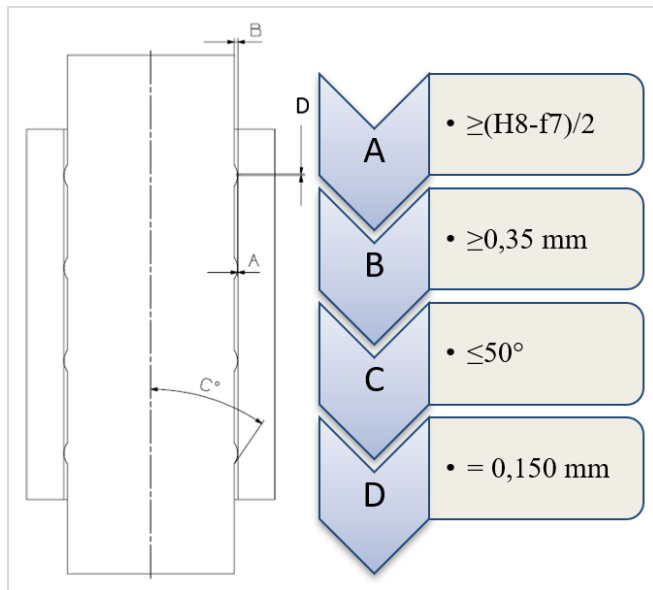
Şekil 4.2. Bütünleşik döner mafsallı deney düzeneği montaj arayüzü

T1 numunesinin, verilmiş olan H8-f7 tolerans bandının maksimum boşluk değeri ile geçici kaynamayla üretilebilir olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre 18 mm çap değerindeki mafsallı yatak ile mil arası boşluk değeri ortalama olarak 30 μm ölçülmüştür. Bu değer H8-f7 tolerans bandı içerisinde bulunmaktadır (Bkz. Şekil 4.3.). T1 tasarımı için boşluk değerinin daha fazla düşürülmesinin riskli olacağı, hali hazırda bu tolerans bandında bile

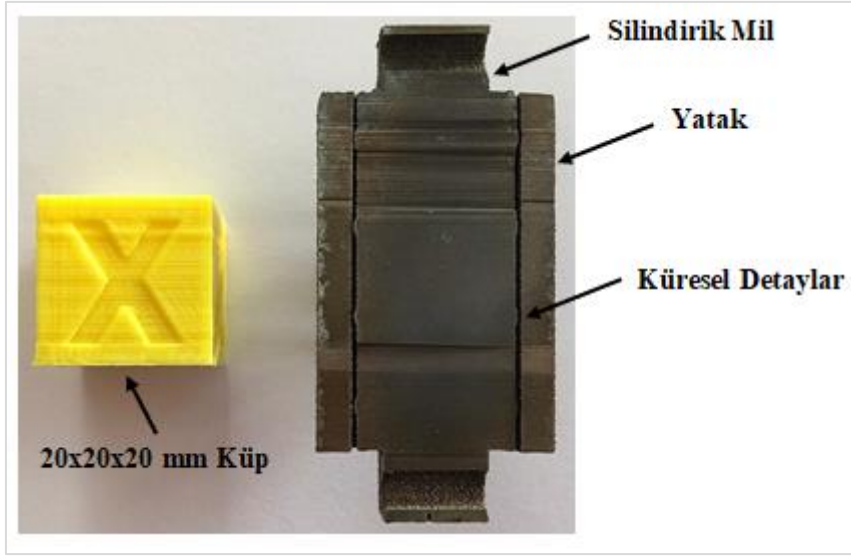
geçici kaynama meydana geldiği için, daha düşük bir toleranslandırma ile tam kaynamanın meydana gelme olasılığının artacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılmış olan T1 bütünlük döner mafsallının ölçüleri ve tasarım kuralları Şekil 4.4.'te, üretim sonrası kesit görüntüsü Resim 4.3.'te verilmiştir.



Şekil 4.3. T1 Bütünlük döner mafsallı 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değerleri

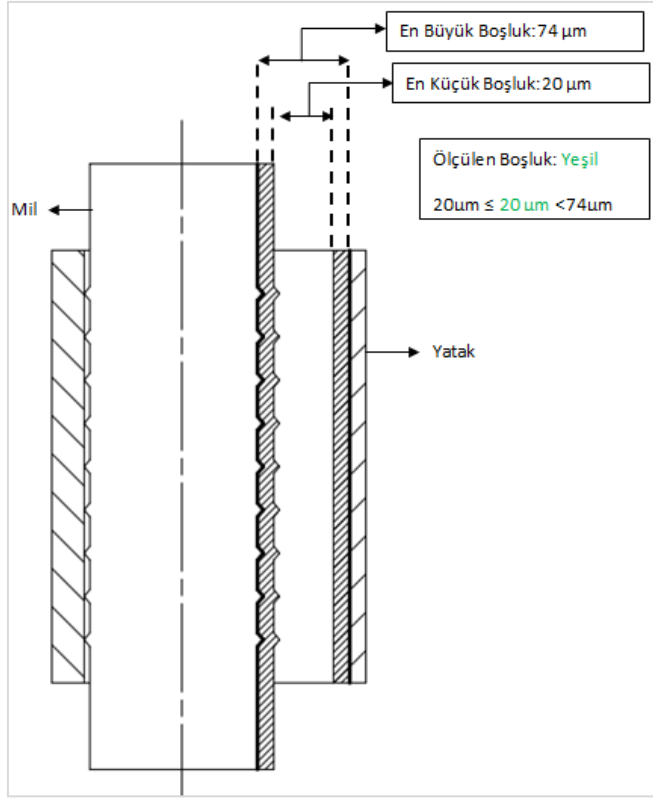


Şekil 4.4. T1 Bütünlük döner mafsallı tasarım kuralları

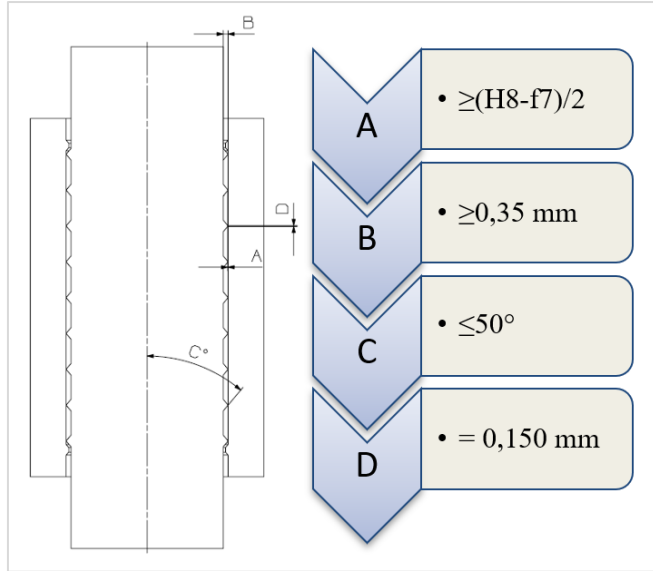


Resim 4.3. T1 Bütünleşik döner mafsalı üretim sonrası kesit görüntüsü

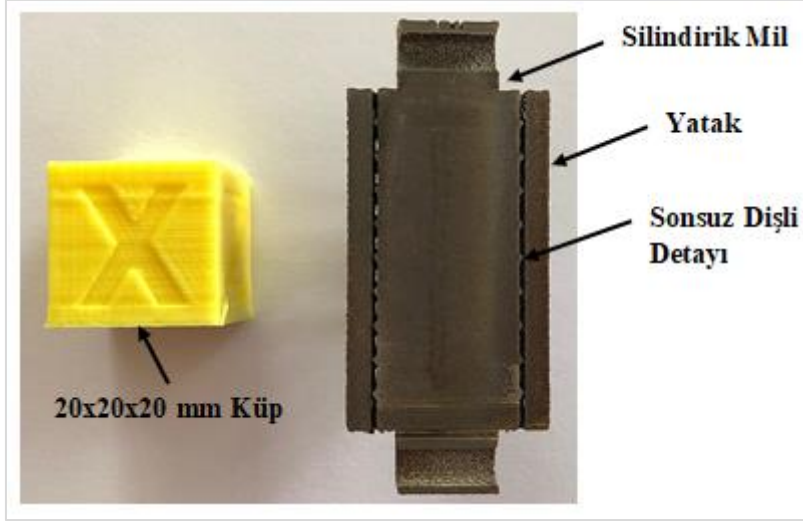
T2 numunesinin, verilmiş olan H8-f7 tolerans bandının maksimum boşluk değeri ile geçici kaynamayla üretilebilir olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre 18 mm çap değerindeki mafsalın yatak ile mil arası boşluk değeri ortalama olarak 20 μ m ölçülmüştür. Bu değer H8-f7 tolerans bandı içerisinde bulunmaktadır (Bkz. Şekil 4.5.). T1 tasarımı ile benzer tasarım mantığına sahip ve aynı tolerans değeri kullanılan T2 tasarımında yatak boşluğu değeri daha düşük bulunmuştur. Bunun sebebinin ise T1 tasarımındaki yüzey alanının T2'deki yüzey alanından daha küçük olmasına bağlı olarak üretim sonrası verilen açma torku sonrası ve alıştırma sırasında küçük yüzey alanına sahip T1 parçasında meydana gelen aşınmalar sonucu olabileceği düşünülmektedir. T2 bütünleşik döner mafsalının ölçüleri ve tasarım kuralları Şekil 4.6.'te, üretim sonrası kesit görüntüsü Resim 4.4.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. T2 Bütünleşik döner mafsalı 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değerleri



Şekil 4.6. T2 Bütünleşik döner mafsalının ölçüleri ve tasarım kuralları

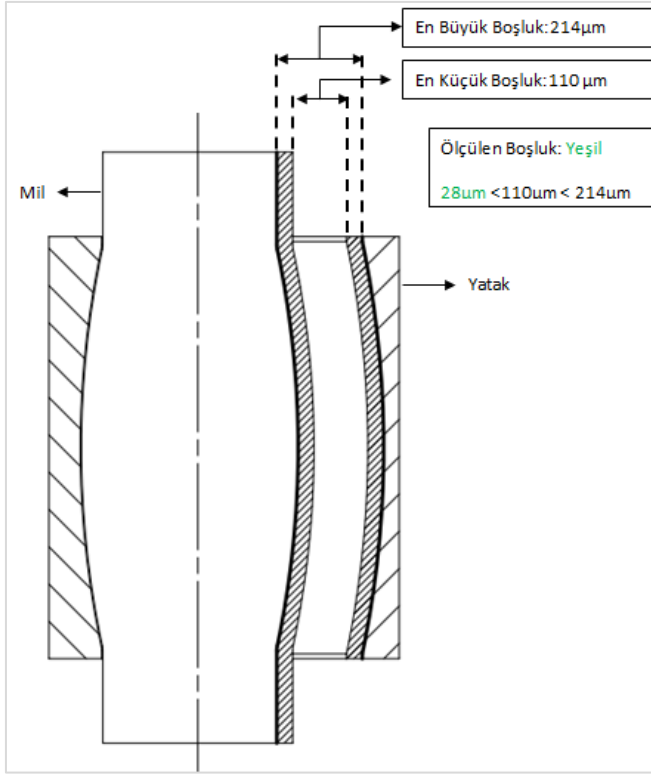


Resim 4.4. T2 Bütünleşik döner mafsali üretim sonrası kesit görüntüsü

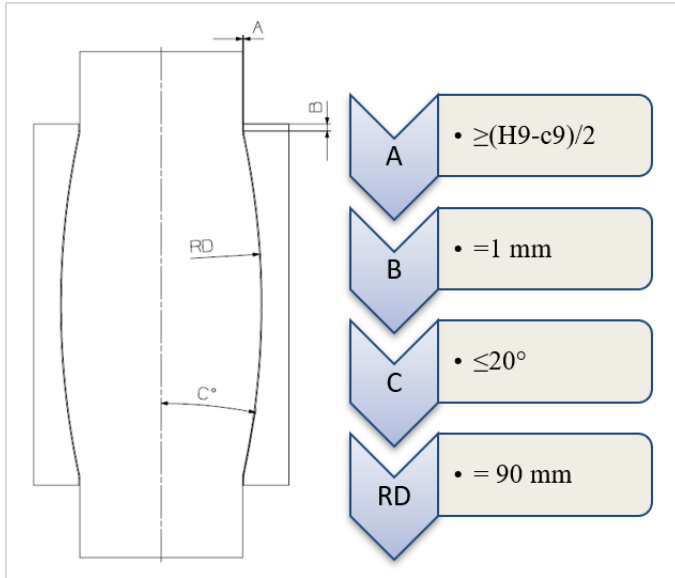
T3 numunesinin üretimi için önce H8-d9 tolerans aralığı denenmiştir fakat merdiven etkisi sebebiyle üretilebilir olmadığı görülmüştür. Yenilenen tasarım ile birlikte H9-c9 tolerans aralığı kullanılmış ve üretim gerçekleştirilmiştir. 18 mm çap değerine sahip numunenin ölçüm sonuçlarına göre ortalama boşluk değeri 28 μm ölçülmüştür (Bkz. Şekil 4.7.). Burada T3 numunelerinde tercih edilen H8-d9 tolerans aralığında kaynama meydana gelmesi ve H9-c9 aralığında verilen boşluk değeri ile ölçüm sonucu arasında farkın yüksek olmasının sebepleri şu şekilde açıklanabilir:

- T3 numunelerinde merdiven etkisi gözükmemektedir. Bu etkinin hesaplanan değerden daha fazla etkisi olduğu düşünülmektedir.
- Açılı gelen yüzeylerde desteksiz üretim için açı değeri 20° den az verilmiş olsalar bile, yüzeylerde sarkmalar meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir.
- Tasarımı sebebiyle mil ve yatağı arasında temizlenemeyen sinterlenmiş tozların kalmış olabileceği düşünülmektedir.

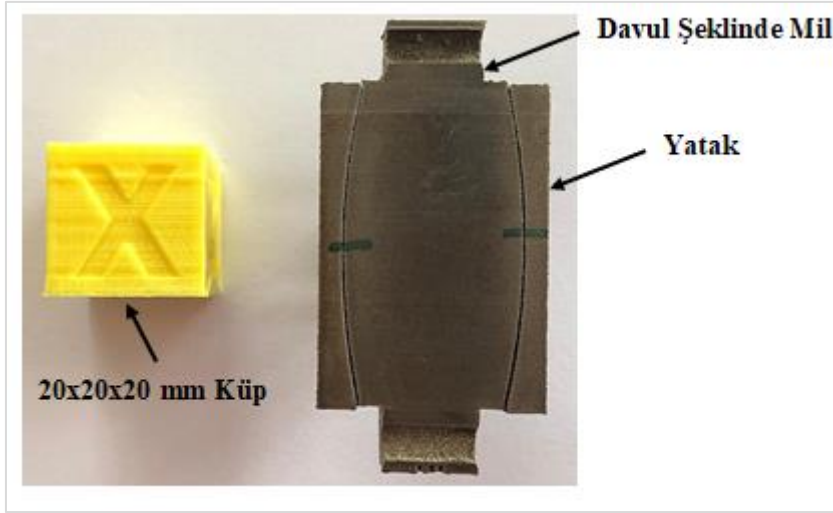
Bu çalışmada kullanılmış olan T3 bütünleşik döner mafsalinın ölçüleri ve tasarım kuralları Şekil 4.8.'te, üretim sonrası kesit görüntüsü Resim 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.7. T3 Bütünleşik döner mafsallı 18-30 mm H9-c9 tolerans aralığı boşluk değerleri

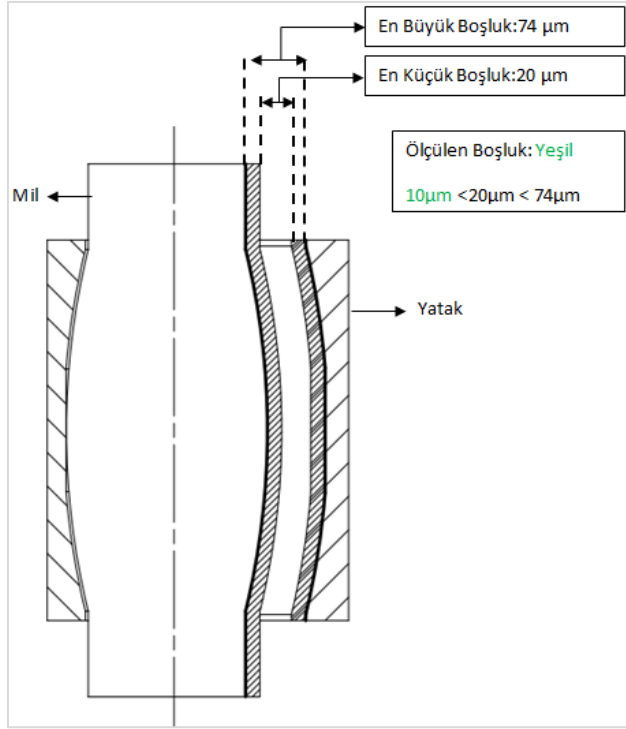


Şekil 4.8. T3 Bütünleşik döner mafsallının ölçüleri ve tasarım kuralları

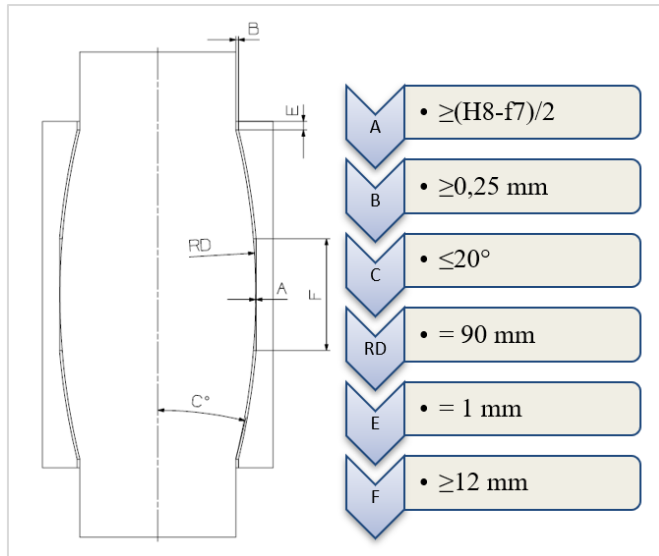


Resim 4.5. T3 Bütünleşik döner mafsali üretim sonrası kesit görüntüsü

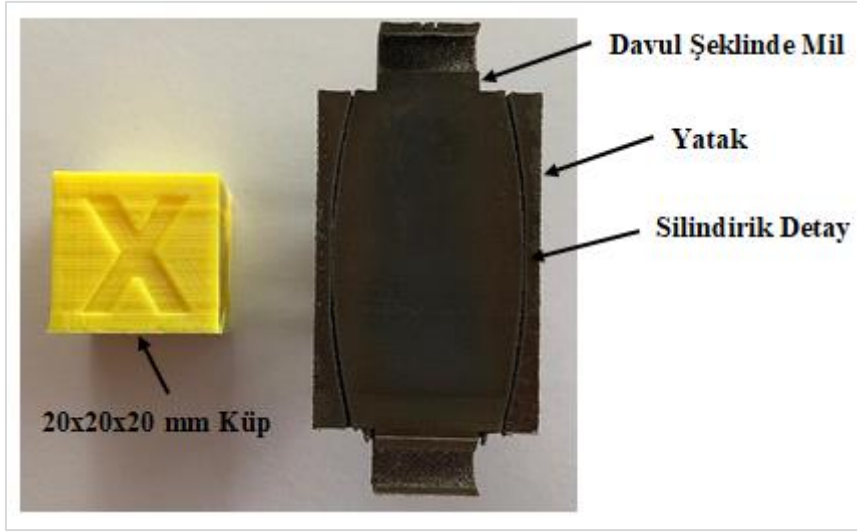
T4 numunesinin, verilmiş olan H8-f7 tolerans bandının maksimum boşluk değeri ile geçici kaynamayla üretilebilir olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre 18 mm çap değerine sahip mafsalin yatak ile mil arası boşluk değeri ortalama olarak 10 μm ölçülmüştür (Bkz. Şekil 4.9.). T4 numunelerinin tasarımı sebebiyle mil ve yatak sadece orta bölgede merdiven etkisinin minimum olduğu yerde küçük bir yüzey alanı ile temas etmektedir. Geri kalan bölgeler ise kaynama riskini azaltmak için 0,25 mm boşluk değeri tanımlanmıştır. Mil ve yatak teması orta ekseninde ve az bir alanda meydana geldiği için, mil küresel mafsali gibi hareket edebilmektedir. Bu yüzden orta ekseni üzerinde olmayan ya da tek taraflı uygulanan kuvvetler doğrultusunda mil boşluğu daha yüksek olmaktadır. Deney düzeneğinde milin tek tarafından kuvvet uygulanarak yatak boşluğu ölçümü yapıldığında ortalama 50 μm boşluk değeri kaydedilmiştir. Bu çalışmada kullanılmış olan T4 bütünleşik döner mafsalinin ölçüleri ve tasarım kuralları Şekil 4.10.'da, üretim sonrası kesit görüntüsü Resim 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.9. T4 Bütünleşik döner mafsalı 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değerleri

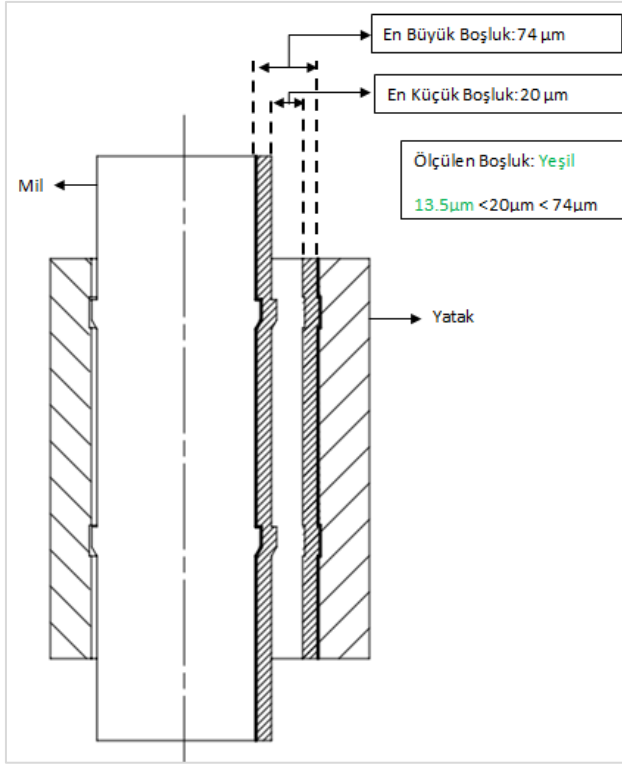


Şekil 4.10. T4 Bütünleşik döner mafsalı ölçüleri ve tasarım kuralları

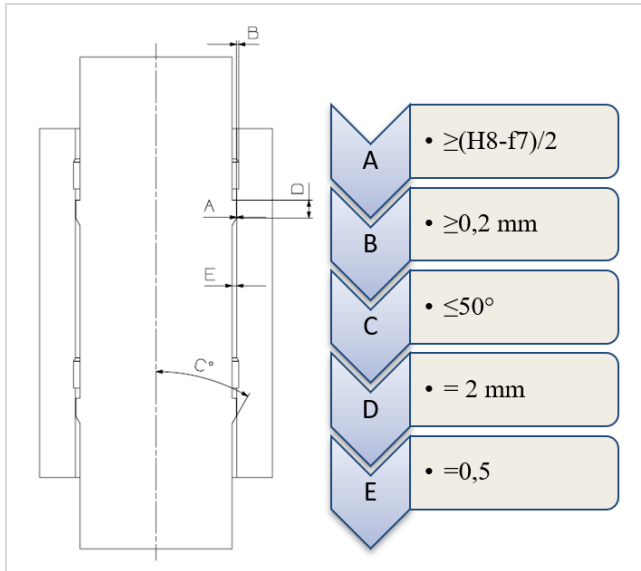


Resim 4.6. T4 Bütünleşik döner mafsali üretim sonrası kesit görüntüsü

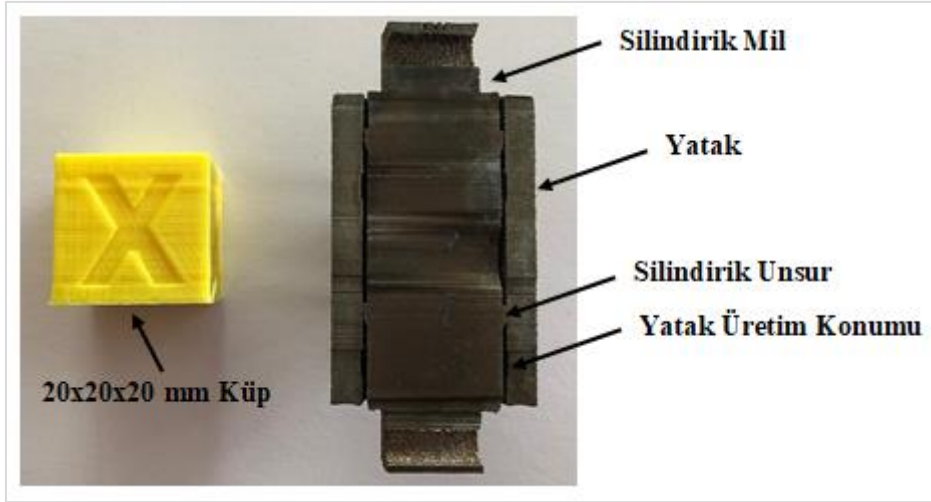
T5 numunesinin üretimi sonrası çalışma aralığı için H8-f7 tolerans boşluğu hedef aralık olarak seçilmiştir. Tasarımı sebebiyle üretim sırasında geçici kaynama riski bulunmayan T5 numunelerinde tolerans aralığı olarak daha düşük değerler seçilebilirdi fakat test parçasında bulunan silindirik bütünleşik parçaların ölçümleri sonucunda elde edilen ortalama hata miktarının 0,079 mm olduğu hesaplanmıştır. Bu sebeple H8-f7 tolerans aralığı altında bir tolerans değeri verilmesi durumunda milin çalışma konumuna geçişi zorlaşacağı ve yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebiyle çevirme torkunun fazla olacağı tahmin edilmektedir. Aynı zamanda H8-f7 tolerans aralığı verilerek, diğer bütünleşik döner mafsalların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılma yapılması planlanmıştır. Sonuçlara göre 18 mm çap değerine sahip mafsalin yatak ile mil arası boşluk değeri ortalama olarak 13,5 μ m ölçülmüştür. Bu değer beklendiği gibi üretimi hedeflenen tolerans bandı dışında kalmaktadır (Bkz. Şekil 4.11.), fakat bu bandın altında kalan boşluk değerlerine sahip tolerans aralıklarında T5 bütünleşik döner mafsalinın üretilebilir olacağı düşünülmektedir. Bir diğer yandan bu değer T1 ve T2 ile kıyaslandığında daha düşüktür. T1 ve T2 mafsallarında meydana gelen geçici kaynamayı kırmak için uygulanan tork sebebiyle yüzeylerin düzensiz kompası sonucu daha fazla boşluk oluştuğu düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılmış olan T5 bütünleşik döner mafsalinın ölçüleri ve tasarım kuralları Şekil 4.12.'de, üretim sonrası kesit görüntüsü Resim 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.11. T5 Bütünleşik döner mafsali 18-30 mm H8-f7 tolerans aralığı boşluk değerleri



Şekil 4.12. T5 bütünleşik döner mafsalinın ölçüleri ve tasarım kuralları



Resim 4.7. T5 Bütünleşik döner mafsallı üretim sonrası kesit görüntüsü

Chen ve Lu (2011) SLE teknolojisini kullanarak yapmış oldukları çalışmada en iyi yük taşıma kapasitesine sahip tasarımın davul şeklinde bütünleşik döner mafsalda olduğu belirtmiş ve takılma, sıkışma olmadan dönebilen bir davul şekilli mafsallı üretmek için 0,2 mm boşluk verilmesi gerektiğini söylemiştir. Bizim yaptığımız çalışma kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi sonucunda en iyi yük taşıma kapasitesine sahip bütünleşik döner mafsallı tasarımın davul şeklinde olduğu bulunmuş olup sonuçların benzer olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu çalışmada tercih edilen davul şeklinde tasarım, bizim çalışmamızda tasarlanan T4 numuneler ile benzerlik göstermektedir. Bizim çalışmamızda H8-f7 tolerans ile 6 mm çap değerindeki numune 0,050 mm tasarım boşluğu ile üretilmiştir. 18 mm çap değerindeki numune ise 0,074 mm tasarım boşluğu ile üretilmiş ve üretim sonrası ortalama 0,010 mm çalışma boşluğu elde edilmiştir. Bu boşluk değerlerinde takılma, sıkışma olmadan milin hareket ettirilebildiği görülmüştür. Dolayısıyla davul şeklinde tasarımda üretilebilir boşluk değerinde iyileşme sağlanmıştır [73].

Wei ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmada davul şeklinde tasarımın ve sonsuz vida şeklinde tasarım ile boşluk değerinin azaltılabileceğinden fakat üretim sonrası geçici kaynaklar olabileceğinden bahsetmiştir. Bizim çalışmamızda da düşük boşluk değerleri davul şeklinde tasarıma sahip T4 numunesi ve sonsuz vida şeklinde tasarıma sahip T2 numunelerinden elde edilmiş fakat üretim sonrası Wei ve diğerleri (2016) tarafından bahsedilen üretim sonrası kaynaklama sorunu ile karşılaşmıştır. Bu çalışmada yapılan davul şeklinde tasarımın temas yüzeyinin az olması kaynaklı serbestlik derecesinin artması sorunu ile bizim çalışmamızda da karşılaşmıştır. T4 tasarımının ölçümleri sırasında milin her iki

tarafından yük asıldığında ortalama yatak boşluğu 0,010 mm ölçülürken tek taraflı yük asıldığı zaman 0,050 mm boşluk değerleri ile karşılaşılmıştır. Bu çalışmadaki öngörüler ve karşılaşılan problemler ile bizim çalışmamızda da karşılaşılmıştır [74].

Liu ve diğerleri (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada mekanizmalarda bulunan döner mafsalların davul şeklinde tasarım ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Bizim çalışmamızda bulunana T3 tasarımına benzeyen tasarımlarda sadece 0,2 mm boşluk miktarı denenmiş ve mafsallar üretim tablasıyla aralarında 45° açı olacak şekilde üretilmiştir, fakat çalışmada kullanılan mafsalların çap bilgileri paylaşılmamıştır. Bizim çalışmamızda T3 numunelerinin en küçük çap değerine sahip olan 6 mm değerindeki numune, H9-c9 tolerans bandının 6 mm çap değeri için sunduğu en yüksek boşluk miktarı olan 0,152 mm tasarım boşluğu ile üretilebilmiştir. Dolayısıyla davul şeklinde tasarımın üretilabilir boşluk değerinde iyileşme sağlanmıştır[78].

Cali ve diğerleri (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bütünleşik küresel mafsallar üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışma sonucunda kullanımı tercih edilen üretim konumu ile çalışma konumunun farklı boşluk değerlerinde olduğu bütünleşik küresel mafsal tasarımından esinlenerek T5 tasarımı oluşturulmuştur. T5 tasarımı bu yöntemin döner mafsala uygulanmış versiyonudur ve toleranslandırma çalışmalarında, T1, T2 ve T4 numuneleri ile aynı tolerans bandı tercih edilmiş olsa bile kaynama sorunu olamadan üretimi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda T4 numunesinden sonra en düşük yatak boşluğu T5 numunesi ile sağlanmıştır [79].

Boschetto ve Bottini (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada davul şeklinde tasarımdan esinlenerek tasarlanan yeni bir tasarım karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada üretim yönüne paralel ve açılı üretimin üretilabilirliğe etkisini, kavisli yüzeylerin üretilabilirliğe etkisini incelemiştir. Çalışmada üretim yönüne paralel olarak üretilip, üretim sonrası testlerde kaynama problemi görülen parçaların, açılı olarak üretilen varyasyonlarında kaynama problemi olmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise kavisli yüzeylerin üretim yönüne paralel olarak oryante edildiklerinde merdiven etkisinin daha fazla oluşması ile açıklamışlardır. Bizim yaptığımız çalışmada T3 numunelerine verilmiş olduğumuz H8-c8 tolerans aralığında kaynama sorununun üretim yönüne açılı olarak millerin oryante edilmesiyle çözülebileceği düşünülmektedir [77].

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında bütünleşik döner mafsalları tasarım kurallarının çıkarılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Tasarımların EBM teknolojisi ile üretilebilirliği, üretilen numunelerin hedeflenen tasarımlara uyumluluğu, geometrik toleranslandırmanın karakterizasyonunu belirlemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada geliştirilen yenilikçi ve özgün bütünleşik döner mafsalları akademik ve ticari çalışmalar için altyapı oluşturması hedeflenmiştir. Aynı zamanda test parçasının ölçümleri sırasında EBM teknolojisinin yeteneklerinin, tasarım yaklaşımlarıyla iyileştirilebildiği keşfedilmiştir.

- EBM test parçasının ölçümleri sonuçlarına göre, bütünleşik olarak üretilen deliklerin, içi boş deliklere göre ortalama ölçüsel doğruluğunun $85\ \mu\text{m}$; yani %55 daha iyi olduğu görülmüştür.
- EBM test parçası ölçümleri sonuçlarına göre, bütünleşik olarak üretilen millerin, delik içerisinde kalan çapları ile delik dışarısında kalan çapları kıyaslandığında $0,15\ \text{mm}$ boşluk değerindeki millerde %59, $0,13\ \text{mm}$ ile $0,5\ \text{mm}$ boşluk değerine sahip millerde %34 oranında daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.
- EBM test parçası ölçümleri sonuçlarına göre, Bütünleşik döner mafsalların üretiminde sistem toplam ölçüsel hata miktarı olarak $0,079\ \text{mm}$ bulunmuştur.
- EBM test parçası ölçümleri sonuçlarına göre, bütünleşik olarak üretilen delikler ile içi boş üretilen deliklerin iç yüzeylerinden alınan ölçümlerde, bütünleşik olarak üretilen deliklerin ortalama silindiriklik değeri %36 daha iyi sonuç vermiştir.
- EBM test parçası ölçümleri sonuçlarına göre, bütünleşik olarak üretilen delikler ile içi boş üretilen deliklerin iç yüzeylerinden alınan ölçümlerde, bütünleşik olarak üretilen deliklerin ortalama dairesellik değeri %44 daha iyi sonuç vermiştir.
- EBM test parçası ölçümleri sonuçlarına göre, bütünleşik olarak üretilen delikler ile içi boş üretilen deliklerin iç yüzeylerinden alınan ölçümlerde, bütünleşik olarak üretilen deliklerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) %37 daha iyi sonuç vermiştir.
- EBM test parçası ölçümleri sonuçlarına göre, $0,15\ \text{mm}$ boşluk değeri ile üretilen bütünleşik döner mafsalları iç yüzeyinde yüzey pürüzlülüğü (R_a) $17,53\ \mu\text{m}$ ölçülmüştür.

- Bütünleşik tasarımları gerçekleştirilen millerin sonlu eleman analizleri sonuçlarına göre; en yüksek von Mises gerilimi T2 ve T5 tasarımlarında, en düşük von Mises gerilimi ise T3 ve T4 tasarımlarında görülmüştür; Bütünleşiken iyi gerilim dağılımı T3 tasarımında gözlemlenmiştir.
- Bütünleşik döner mafsalların üretim sonuçlarına göre; T1, T2 ve T4 tasarımlarına ait numunelerin, H8-f7 tolerans bandının 6-10-18-30 mm değerlerindeki maksimum boşluk koşulu değeri kullanılarak geçici kaynama ile, BütünleşikT3 tasarımına ait numunelerin H9-c9 tolerans bandının maksimum boşluk koşulu değeri kullanılarak kaynama olmadan, Bütünleşik T5 tasarımına ait numunelerin, H8-f7 tolerans bandının maksimum boşluk koşulu değeri kullanılarak üretilebilir olduğu görülmüştür.
- Bütünleşik döner mafsalların 18 mm çap değerindeki numunelerin ölçüm sonuçlarına göre; T1 tasarımına verilmiş olan H8-f7 (0,074 mm) tolerans boşluğu üretim sonrasında ortalama olarak 30 μ m, BütünleşikT2 tasarımına verilmiş olan H8-f7 (0,074 mm) tolerans boşluğu üretim sonrasında ortalama olarak 20 μ m ölçülmüştür, BütünleşikT3 tasarımına verilmiş olan H9-c9 (0,214 mm) tolerans boşluğu üretim sonrasında ortalama olarak 28 μ m, BütünleşikT4 tasarımına verilmiş olan H8-f7 (0,074 mm) tolerans boşluğu üretim sonrasında ortalama olarak 10 μ m, Bütünleşik T5 tasarımına verilmiş olan H8-f7 (0,074 mm) tolerans boşluğu üretim sonrasında ortalama olarak 13,5 μ m ölçülmüştür

5.2. Öneriler

Sonraki çalışmalarda bütünleşik döner mafsallar üretim yönüne dik ya da farklı açılarda üretilip, toleranslandırmanın değişimi ve millerin geometrik özelliklerindeki değişimler incelenebilir. Bu çalışmada tasarlanan bütünleşik döner mafsallara ait tasarım yaklaşımları, küresel mafsallara ve diğer bağlantı türlerine uygulanabilirliği değerlendirilebilir. Bütünleşik döner mafsal numunelerinin dinamik yükler altında nasıl davranış sergileyeceği ve dinamik yüklerin etkileri incelenebilir. Eklemeli imalat üretim simülasyonları kullanılarak üretim parametrelerinin etkileri simüle edilerek, tasarım yaklaşımları geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Gibson, I., Rosen, D. W. and Stucker, B. (2014). *Additive manufacturing technologies*. New York: Springer, 17.
2. Kruth, J. P. (1991). Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques. *Annals of the International Institution for Production Engineering Research*, 40(2), 603-614.
3. Ashley, S. (1991). Rapid prototyping systems. *Mechanical Engineering*, 113(4), 34.
4. Cozmei, C. and Caloian, F. (2012). Additive manufacturing flickering at the beginning of existence. *Procedia Economics and Finance*, 3, 457-462.
5. İnternet: International Organization for Standardization (ISO) and American Society for Testing and Materials (ASTM). (2015). Additive manufacturing - General principles –Terminology. Web: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:dis:ed-2:v1:en>, Son Erişim Tarihi: 10/06/2020.
6. Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., Hinkson, S., Steelman, T., Silverman, E. and Dorey, J. (2011). Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(2), 203-212.
7. İnternet: Beaman, J. J. Japanese and World Technology Evaluation Centers Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan. Web: <https://www.cs.cmu.edu/~lew/PUBLICATION%20PDFs/RP/JTEC%201997.pdf> Son Erişim Tarihi: 8.05.2020
8. Beaman, J. J., Leu, M. C., Rosen, D. A., Bourrell, D. and Bourrell, D. L. (2009 September). *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*. RapidTech 2009: US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies Konferansı, Türkiye.
9. Pham, D. and Dimov, S. S. (2012). *Rapid manufacturing: the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling*. London: Springer, 84-98.
10. Wohlers, T. and Gornet, T. (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24(2014), 110-118.
11. Nakagawa, T. (1979). Blanking tool by stacked bainite steel plates. *Press Technique*, 93-101.
12. Shellabear, M. and Nyrhilä, O. (2004 September). *DMLS-Development history and state of the art*. LANE 2004 Konferansı. Erlangen, Germany.
13. İnternet: ARCAM. Arcam History. Web: <http://www.arcam.com/company/about-arcam/history/>, Son Erişim Tarihi: 10.05.2020.

14. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I. and Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *Annals of the International Institution for Production Engineering Research*, 65(2), 737-760.
15. İnternet: American Society for Testing and Materials (ASTM). 7 Families of Additive Manufacturing. Web: https://www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/7_families_print_version.pdf, Son Erişim Tarihi: 12.05.2020.
16. Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R. and Babu, S. S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 61(5), 315-360.
17. Yalçın, B. ve Ergene, B. (20174). Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.
18. Poprawe, R. (2005). *Lasertechnik für die Fertigung*. Berlin: Springer, 4, 220-240.
19. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. and Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
20. Li, Z., Kuai, Z., Bai, P., Nie, Y., Fu, G., Liu, W. and Yang, S. (2019). Microstructure and Tensile Properties of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Multi-Laser Beam Selective Laser Melting (SLM). *Metals*, 9(12), 1337.
21. Kaş, O. (2019). *Geçişli Gözenekli Yapılar İçin Seçici Lazerle Ergitme Yöntemine Yönelik Geometri Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu* Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
22. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6), 1917-1928.
23. Wong, K. V. and Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing, *International Scholarly Research Notice Mechanical Engineering*, 1, 1-10.
24. Park, J. S., Lee, M. G., Cho, Y. J., Sung, J. H., Jeong, M. S., Lee, S. K. and Kim, D. H. (2016). Effect of heat treatment on the characteristics of tool steel deposited by the directed energy deposition process. *Metals and Materials International*, 22(1), 143-147.
25. Gokuldoss, P. K., Kolla, S. and Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—Selection guidelines. *Materials*, 10(6), 672.
26. Xu, X., Meteyer, S., Perry, N. and Zhao, Y. F. (2015). Energy consumption model of Binder-jetting additive manufacturing processes. *International Journal of Production Research*, 53(23), 7005-7015.
27. Gonzalez, J. A., Mireles, J., Lin, Y. and Wicker, R. B. (2016). Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 42(9), 10559-10564.

28. Noorani, R. (2006). *Rapid prototyping: principles and applications*. California: John Wiley & Sons Incorporated, 82.
29. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C. ve Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 53-70.
30. Mohd Yusuf, S., Cutler, S. and Gao, N. (2019). The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. *Metals*, 9(12), 1286.
31. Vayre, B., Vignat, F. and Villeneuve, F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13(2), 89-96.
32. Uriondo, A., Esperon-Miguez, M. and Perinpanayagam, S. (2015). The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 229(11), 2132-2147.
33. Zäh, M. F. and Lutzmann, S. (2010). Modelling and simulation of electron beam melting. *Production Engineering*, 4(1), 15-23.
34. Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N. and Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.
35. Romero, C., Yang, F. and Bolzoni, L. (2018). Fatigue and fracture properties of Ti alloys from powder-based processes—A review. *International Journal of Fatigue*, 117, 407-419.
36. Watson, J. K. and Taminger, K. M. B. (2018). A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1316-1322.
37. Suard, M., Lhuissier, P., Dendievel, R., Blandin, J. J., Vignat, F. and Villeneuve, F. (2014). Towards stiffness prediction of cellular structures made by electron beam melting (EBM). *Powder Metallurgy*, 57(3), 190-195.
38. Lancaster, R., Davies, G., Illsley, H., Jeffs, S. and Baxter, G. (2016). Structural integrity of an electron beam melted titanium alloy. *Materials*, 9(6), 470.
39. Gong, X., Anderson, T. and Chou, K. (2014). Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology. *Manufacturing Review*, 1,2.
40. Lutzmann, S. (2011). *Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens*. München: Herbert Utz Verlag, 245.
41. Antonyamy, A. A., Meyer, J. and Prangnell, P. B. (2013). Effect of build geometry on the β -grain structure and texture in additive manufacture of Ti6Al4V by selective electron beam melting. *Materials Characterization*, 84, 153-168.

42. Niinomi, M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1(1), 30-42.
43. Edwards, P. and Ramulu, M. (2014). Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 598, 327-337.
44. Banerjee, D. and Williams, J. C. (2013). Perspectives on titanium science and technology. *Acta Materialia*, 61(3), 844-879.
45. Fousová, M., Vojtěch, D., Doubrava, K., Daniel, M. and 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.
46. Ramosoou, M. K. E., Booysen, G., Ngonda, T. N. and Chikwanda, H. K. (2011, October). *Mechanical properties of direct laser sintered Ti-6Al-V4*. Materials Science and Technology Conference, U.S.A.
47. Rengers, S. (2012, November). *Electron beam melting [EBM] vs. direct metal laser sintering [DMLS]*. SAMPE Midwest Chapter, Direct Part Manufacturing Workshop, U.S.A.
48. Semetay, C. (2007). *Laser Engineered Net Shaping (LENS) modeling using welding simulation concepts*. Master's Thesis, Leigh University, U.S.A.
49. Gebisa, A. W. and Lemu, H. G. (2017). Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability. *Procedia Manufacturing*, 13, 724-731.
50. Dieter, G.E. and Schmidt, L.C. (2009). *Engineering design*. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 58.
51. Lemu, H. G. (2016, November). Beyond Rapid Prototyping: *Study of prospects and challenges of 3D printing in functional part fabrication*. 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation, Manchester.
52. Petrick, I. J. and Simpson, T. W. (2013). 3D printing disrupts manufacturing: how economies of one create new rules of competition. *Research-Technology Management*, 56(6), 12-16.
53. Yadroitsev, I., Shishkovsky, I., Bertrand, P. and Smurov, I. (2009). Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting. *Applied Surface Science*, 255(10), 5523-5527.
54. Yadroitsev, I., Thivillon, L., Bertrand, P. and Smurov, I. (2007). Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder. *Applied Surface Science*, 254(4), 980-983.
55. Muller, P., Mognol, P. and Hascoet, J. Y. (2013). Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5), 685-692.

56. İnternet: Direct Manufacturing Research Center (DMRC). (2011). Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing. Future Applications. Son Erişim Tarihi: 15.09.2020.
57. Spalt, P. and Bauernhansl, T. (2016). A framework for integration of additive manufacturing technologies in production networks. *Procedia- International Institution for Production Engineering Research*, 57, 716-721.
58. Adam, G. A. and Zimmer, D. (2014). Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(1), 20-28.
59. Yang, S. and Zhao, Y. F. (2015). Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1-4), 327-342.
60. Kumke, M., Watschke, H. and Vietor, T. (2016). A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(1), 3-19.
61. Cooke, A. L. and Soons, J. A. (2010, August). *Variability in the geometric accuracy of additively manufactured test parts*. Proceedings of 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin.
62. Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurens, K. and Donmez, M. A. (2014). An additive manufacturing test artifact. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, 429.
63. Campanelli, S. L., Cardano, G., Giannoccaro, R., Ludovico, A. D. and Bohez, E. L. (2007). Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy. *Computer-Aided Design*, 39(1), 80-86.
64. Byun, H. S. and Lee, K. H. (2003, May). *Design of a new test part for benchmarking the accuracy and surface finish of rapid prototyping processes*. International Conference on Computational Science and Its Applications, Berlin.
65. Ippolito, R., Iuliano, L. and Gatto, A. (1995). Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish. *Annals of the International Institution for Production Engineering Research Annals*, 44(1), 157-160.
66. Xu, F., Wong, Y. S. and Loh, H. T. (2001). Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(5), 283-296.
67. Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H. and Loh, H. T. (2004). Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes. *Rapid Prototyping Journal*, 10 (2), 123-135.
68. Kruth, J. P., Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J. and Mercelis, P. (2005, April). *Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques*. Proceedings of the International Conference Polymers & Moulds Innovations PMI, Gent.

69. Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K. and Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), 1459-1468.
70. Delgado, J., Ciurana, J., Reguant, C. and Cavallini, B. (2009). Studying the repeatability in DMLS technology using a complete geometry test part. *Innovative Developments in Design and Manufacturing*. CRC Press, 367-372.
71. Johnson, W. M., Rowell, M., Deason, B. and Eubanks, M. (2011, August). *Benchmarking evaluation of an open source fused deposition modeling additive manufacturing system*. Proceeding of the 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin.
72. Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurrens, K. and Donmez, M. A. (2012, August). *Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes*. Proceedings of the 2012 annual international solid freeform fabrication symposium, Austin.
73. Chen, Y. and Lu, J. (2011). Minimise joint clearance in rapid fabrication of non-assembly mechanisms. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(8), 726-734.
74. Wei, X., Tian, Y. and Joneja, A. (2016). A study on revolute joints in 3D-printed non-assembly mechanisms. *Rapid Prototyping Journal*, 22(6), 901-933.
75. Liu, Y., Zhang, J., Yang, Y., Li, J. and Chen, J. (2017). Study on the influence of process parameters on the clearance feature in non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, 98-107.
76. Su, X., Yang, Y., Wang, D. and Chen, Y. (2013). Digital assembly and direct fabrication of mechanism based on selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 19 (3), 166-172.
77. Boschetto, A. and Bottini, L. (2019). Manufacturability of non-assembly joints fabricated in AlSi10Mg by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 425-437.
78. Liu, Y., Yang, Y., Yang, X., Wang, D. and Xiao, Z. (2014). Direct Manufacture of Non-Assembly Mechanism by Selective Laser Melting. *Proceedings of the 1st International Conference Progress in Additive Manufacturing*, 346-351.
79. Cali, J., Calian, D. A., Amati, C., Kleinberger, R., Steed, A., Kautz, J. and Weyrich, T. (2012). 3D-printing of non-assembly, articulated models. *Association for Computing Machinery Transactions on Graphics*, 31(6), 1-8.
80. Myers, K., Cortes, P., Conner, B., Wagner, T., Hetzel, B. and Peters, K. M. (2015). Structure property relationship of metal matrix syntactic foams manufactured by a binder jet printing process. *Additive Manufacturing*, 5, 54-59.
81. Doyle, M., Agarwal, K., Sealy, W. and Schull, K. (2015). Effect of layer thickness and orientation on mechanical behavior of binder jet stainless steel 420+ bronze parts. *Procedia Manufacturing*, 1, 251-262.

82. Gaytan, S. M., Cadena, M. A., Karim, H., Delfin, D., Lin, Y., Espalin, D. and Wicker, R. B. (2015). Fabrication of barium titanate by binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 41(5), 6610-6619.
83. Hrabe, N., Gnäupel-Herold, T. and Quinn, T. (2017). Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International Journal of Fatigue*, 94, 202-210.
84. Seifi, M., Salem, A., Satko, D., Shaffer, J. and Lewandowski, J. J. (2017). Defect distribution and microstructure heterogeneity effects on fracture resistance and fatigue behavior of EBM Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 94, 263-287.
85. Phillips, S. D. (1995). *Coordinate Measuring Machines and Systems: Performance Evaluations*, New York: Marcel Dekker Inc, 202-205.
86. İnternet: ZEISS. *Coordinate Measuring Machines*. Web: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuringmachines/bridge-type-cmms/accura.html>, Son Erişim Tarihi: 06 .06.2020.
87. Lipson, H., Moon, F. C., Hai, J. and Paventi, C. (2005). 3-D printing the history of mechanisms. *Journal of Mechanical Design*, 127(5): 1029-1033
88. Chen, Y. and Zhezheng, C. (2011). Joint analysis in rapid fabrication of non-assembly mechanisms. *Rapid Prototyping Journal*, 17(6), 408-417.
89. İnternet:ARCAM AB, Arcam A2X. Web: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcam-a2x.pdf>, Son Erişim Tarihi:06/06/2020.
90. Majhi, J., Janardan, R., Smid, M. and Gupta, P. (1999). On some geometric optimization problems in layered manufacturing. *Computational Geometry*, 12(3-4), 219-239.
91. Chen, Y. H. and Chen, Z. Z. (2010). Major factors in rapid prototyping of mechanisms. In *Key Engineering Materials*, 443, 516-521.
92. Wang, P., Nai, M. L. S., Tan, X., Vastola, G., Srinivasan, R., Sin, W. J. and Wei, J. (2016, August). *Recent progress of additive manufactured Ti-6Al-4V by electron beam melting*. 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference, Austin.
93. Triantaphyllou, A., Giusca, C. L., Macaulay, G. D., Roerig, F., Hoebel, M., Leach, R. K. and Milne, K. A. (2015). Surface texture measurement for additive manufacturing. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(2), 128-135.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÖVEZ, Umut
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 09.05.2020, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : (505) 862 98 30
 e-mail : umuttgovez@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı	2017
Lise	Ümitköy Anadolu Lisesi	2013

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-halen	ASELSAN	Mekanik Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce
 Almanca

Yayınlar

1. Gövez, U., Yılmaz, O., Tan, E. ve Gümüş, B. (2020, Ekim). *On The Improvement of Geometrical Outcomes of EBM Parts with a Novel Design Approach*. The 3rd International Conference for Electron Beam Additive Manufacturing Konferansında sunuldu, Erlangen.

Hobiler

Freestyle Drone pilotluğu, Rc araçlar, 3D baskı, Fitness



GAZİ GELECEKTİR..