

**BİR ROBOT KOL TUTUCUNUN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE
ALSİ10MG ALAŞIMI İLE HİBRİT ÜRETİMİ**

Kağan Murat PÜRLÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANA BİLİM DALI**

**SİVAS BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

Kağan Murat PÜRLÜ tarafından hazırlanan “BİR ROBOT KOL TUTUCUNUN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ALSİ10MG ALAŞIMI İLE HİBRİT ÜRETİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Nazım BABACAN

Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

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

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Emre AKÇAY

Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

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

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt Yunus KAYACAN

Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 29/07/2024

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

.....
Dr. Öğr. Üyesi Ali Suat YILDIZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim 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.

.....
Kağan Murat PÜRLÜ
29/07/2024

BİR ROBOT KOL TUTUCUNUN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ALSİ10MG ALAŞIMI İLE HİBRİT ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kağan Murat PÜRLÜ

SİVAS BİLİM ve TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Robot teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, otomasyon hemen hemen her endüstriye yayılmıştır. Sanayi sektöründe robotlu üretimlere artan talep, robotik kol yapılarının iyileştirilmesi ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Robot kol bağlantılarının geliştirilmesi için ana kriterler, maliyet ve üretimde harcanan zamanı azaltmanın yanı sıra yeterli mukavemeti sağlayacak şekilde kütle azaltımı gerçekleştirmektir. Bu doğrultuda, bu çalışmada, topoloji optimizasyonu kullanarak bir robotik kol tutucu hafifletilmiş ve eklemeli imalatla üretilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen sütunlu matkapla delme ve zımparalama işlemleri ile eklemeli ve eksiltmeli imalatın birlikte kullanıldığı hibrit üretimden de faydalanılmıştır. Topoloji optimizasyonu ANSYS programında katı izotropik malzeme ile cezalandırma (SIMP) yöntemi ile gerçekleştirilirken, optimizasyon öncesi ve sonrasında, parçanın çalışma koşullarındaki yüklemelerin benzetimi yapılarak gerçekleştirilen statik analiz sonuçları yorumlanmıştır. Eklemeli imalatta ise seçici lazer ergitme (SLM) teknolojisi kullanılarak AlSi10Mg alaşımından parça üretimi gerçekleştirilmiştir. İmalat gerçekleştirilmeden önce parçada üretimden kaynaklanan kalıcı bir deformasyonun oluşmasını önlemek için Simufact Additive ile kalıntı gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretimden sonra yine aynı amaçla parçaya ısıl tavlama uygulanmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen parçanın çalışma koşulları altında 36 MPa eşdeğer gerilme ve 0.0109 mm toplam deformasyona maruz kalacağı simüle edilmiş olup bu değerler parçanın statik olarak hasara uğramayacağı göstermiştir. Optimizasyon sonucunda geleneksel üretim teknikleri ile üretilen parçaya kıyas ile %65 oranında kütle azaltımı uygulanmış parça başarılı bir şekilde üretilmiştir.

Bilim Kodu : 91433-91438-91439

Anahtar Kelimeler : Eklemeli İmalat, Seçici Lazer Ergitme, Topoloji Optimizasyonu, AlSi10Mg, Hibrit Üretim, Robot Kol Tutucu

Sayfa Adedi : 79

Danışman : Doç. Dr. Nazım BABACAN

TOPOLOGY OPTIMIZASTION AND HYBRID PRODUCTION OF A ROBOTIC ARM
GRIPPER WITH ALSI10MG ALLOY

(M. Sc. Thesis)

Kağan Murat PÜRLÜ

SİVAS UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

July 2024

ABSTRACT

Automation has spread to almost every industry with the developments in robot technology. The increasing demand for robotic production in the industrial sector brings with it the need to improve robotic arm structures. The main criteria for the development of robotic arm connections are to reduce the cost and time spent in production as well as to reduce the mass in a way that provides sufficient strength. Therefore, in this study, a robotic arm gripper was lightened using topology optimization and manufactured with additive manufacturing. Then, column drilling and grinding processes were utilized as hybrid production, where additive and subtractive manufacturing were used together. While topology optimization was performed with the solid isotropic material with penalisation (SIMP) method in the ANSYS program, the static analysis results performed by simulating the loadings in the working conditions of the part before and after the optimization were interpreted. In additive manufacturing, parts were manufactured from AlSi10Mg alloy using selective laser melting (SLM) technology. Before manufacturing, residual stress analyses were performed with Simufact Additive to prevent permanent deformation in the part due to manufacturing. After production, annealing was applied to the part for the same purpose. As a result of optimization, it was simulated that the obtained part would be exposed to 36 MPa equivalent stress and 0.0109 mm total deformation under working conditions, and these values showed that the part would not be failed statically. As a result of optimization, the part with a 65% mass reduction compared to the part produced with traditional production techniques was successfully produced.

Science Code : 91433-91438-91439

Key Words : Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Topology Optimization, AlSi10Mg Hybrid Producion, Robotic Arm Gripper

Page Number : 79

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nazım BABACAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca bana rehberlik eden, bilimsel vizyonumun gelişimine katkıda bulunan, çalışmanın planlanması, araştırılması, yürütülmesi ve şekillendirilmesi aşamalarında bilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Nazım BABACAN'a en derin şükranlarımı sunarım. Ayrıca, yüksek lisans tez jürimde yer alan ve tezime sağladığı katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Emre AKÇAY'a teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak akademik gelişimime önemli ölçüde katkıda bulunan kıymetli hocam Prof. Dr. Sabit HOROZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, yalnızca akademik yolculuğumda değil, aynı zamanda kariyerimde de bana yol gösterici olmuştur. Bu süreçte gösterdiği sabır, destek ve mentorluk için teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca birlikte çalıştığımız süreçte bilgi ve deneyimlerini paylaşarak çalışmalarımın ilerlemesine katkıda bulunan kıymetli meslektaşım Arş. Gör. Muhammed Taha YILDIZ'a özel olarak teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, AMASMA araştırma grubunda yer alan ve birlikte çalıştığımız tüm arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tezi hazırlamam için Simufact Additive analizlerinin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı ERMAKSAN'da çalışan Enes Furkan SEVİNÇ'e teşekkür ederim.

Tezi gerçekleştirmeme olanak tanıyan TEZMAKSAN Robot Teknolojileri'ne ve özellikle Genel Müdür Sayın Serhat Volkan YILMAZ'a ve Aslı AKKUŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Verdikleri destek ve sağladıkları imkanlar sayesinde, çalışmamı başarıyla tamamlayabilme fırsatını buldum. Çalışmalarım sırasında gösterdikleri anlayış ve sağladıkları değerli katkılar için kendilerine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini benden asla esirgemeyen, karşılaştığım zorluklar karşısında bana daima güç ve cesaret veren, bu hayattaki en büyük destekçilerimden biri olan annem Döne İLBEOĞLU'na teşekkürü borç bilirim. Sonsuz sevgisi, sabrı ve fedakarlıkları sayesinde bugünlere gelebilmemi sağlayan kendisine minnettarlığımı en içten duygularıyla ifade etmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
TEŞEKKÜR.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Robot Teknolojisi.....	6
2.2. Robot Kol Tutucusu	9
2.3. Eklemeli İmalat	10
2.3.1. Eklemeli İmalat (Eİ) Teknolojisi	11
2.3.2. Eklemeli İmalatın Faydaları.....	15
2.3.3. Toz Yataklı Ergitme.....	17
2.3.4. Seçici Lazer Ergitme (SLM)	17
2.3.5. SLM’de Kullanılan Alaşımlar.....	21
2.3.6. Eklemeli İmalat İçin Tasarım.....	22
2.3.7. Topoloji Optimizasyonu	24
2.3.8. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Analizi	29
2.3.9. Eklemeli İmalat Kısıtlamaları	31
2.3.10. Hibrit Üretim.....	32

3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	35
3.1. CAD Tasarımı	36
3.2. Ansys Topoloji Optimizasyonu.....	37
3.3. Parça Geometrisinin Eklemeli İmalata Uygun Hale Getirilmesi	45
3.4. Destek Yapılarının ve Oryantasyon Düzeni.....	46
3.5. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Analizi	46
3.6. Metal Eklemeli İmalat.....	47
3.7. Üretim Sonrası Isıl İşlem	49
3.8. İkincil İşlem Hazırlığı	51
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	52
4.1. Ansys Topoloji Optimizasyonu.....	52
4.2. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Parçanın Analizi	55
4.3. Üretim Sırasındaki Kalıntı Gerilme Analizinin Sonuçları	60
4.4. SLM ile Üretim ve Isıl İşlem	64
4.5. Yüzey Temizleme ve Delik Delme	65
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	70

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1 Ağ örgüsü kalitesi parametreleri.....	39
Çizelge 3.2 Üretim parametrelerine ait bilgiler	48



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Yaygın endüstriyel robot sınıfları [15]	8
Şekil 2.2 Robot doğruluğu ve tekrarlına bilirlüğünün görselleştirilmiş durumu	9
Şekil 2.3 Katman katman birleştirme tekniği şeması.....	11
Şekil 2.4 Standart Eİ prosesi.....	13
Şekil 2.5 ISO/ASTM 52900:2015'e göre Eİ süreçlerinin sınıflandırılması [40]	14
Şekil 2.6 Çeşitli kafes yapıları Gyroid, Primitive, Diamond, iWP, Lidinoid, Neovius, Octo, Spilt [43].....	15
Şekil 2.7 Topology yazılımıyla üretilen değişken kafes yapısı [44].....	16
Şekil 2.8 SLM sürecinin şematik gösterimi [52].	18
Şekil 2.9 SLM işlem parametrelerinin özeti [52].....	19
Şekil 2.10 SLM ile üretilen parçalarda genellikle incelenen özellikler [52].	20
Şekil 2.11 Tipik SLM süreci kusurları [52].	20
Şekil 2.12 Topoloji optimizasyonunun temel prensibi [61].....	25
Şekil 2.13 Jet motoru braketi örneğinin TO süreci [62]	25
Şekil 2.14 Parça örneği, parçanın eşdeğer gerilme renklendirmesi ve parçanın çarpılma renklendirmesi.....	31
Şekil 3.1 Üretilmesi planlanan robot kol parmak tutucularının hibrit üretim yaklaşımı	35
Şekil 3.2 Robot kol parmak tutucusu, robot kol parmak tutucusunun bazı unsurlarının kaldırılıp elde edilmesi.....	37
Şekil 3.3 ANSYS ile gerçekleştirilen TO çalışmalarında takip edilen analiz akış şeması	38
Şekil 3.4 ANSYS 2 mm elemanlı oluşturulmuş ağ görünümü	39
Şekil 3.5 Robot parmak tutucunun sınır koşulları ve yüklerin eklenmesi	41
Şekil 3.6 Herbir bağlantı noktalarında oluşan yüklerin hesaplanması.....	42
Şekil 3.7 Optimizasyon bölgeleri ve optimizasyondan hariç tutulan bölgeler	43

Şekil	Sayfa
Şekil 3.8 Topoloji optimizasyonu amacı	44
Şekil 3.9 Yanıt kısıtlamasının konumu.....	45
Şekil 3.10 Destek yapıları ve oryantasyon çalışması.....	46
Şekil 3.11 Simufact additive analiz çalışması.....	47
Şekil 3.12 Tarama modeli ve tarama parametreleri gösterimi.....	48
Şekil 3.13 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi ERMAKSAN EnaVision 130 SLM	49
Şekil 3.14 Isıl tavlama işlemi	50
Şekil 3.15 Robot kol parmak tutucusunun destek yapılarının temizlenmesi.....	50
Şekil 3.16 İkincil işlem için tasarlanan tutucular.....	51
Şekil 4.1 Topoloji optimizasyonunun yineleme sayısı	52
Şekil 4.2 Topoloji optimizasyonu yapılmayan parça görünümü, optimizasyon sonucu parça görünümü, optimizasyon sonucu kütle değerleri	54
Şekil 4.3 SpaceClaim ile parça düzenlenmesi	54
Şekil 4.5 Optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası toplam deformasyon değerleri....	59
Şekil 4.6 Robot kol parmak tutucusunun toplam yer değiştirme dağılımı	60
Şekil 4.7 Robot kol parmak tutucusunun üretim sonrası ve ısıl işlem sonrası eşdeğer gerilme dağılımı	62
Şekil 4.8 Robot kol parmak tutucusunun katmanlar arası ayrılma dağılımı.....	63
Şekil 4.9 Robot kol parmak tutucusunun SLM ile üretim sonucu ve ısıl işlem için fırına yerleştirilmesi.....	64
Şekil 4.10 Üretim ve ısıl işlem sonucunda elde edilen robot kol parmak tutucusu.....	65
Şekil 4.11 Sütun matkap ile bağlantı noktalarının oluşturulması sonrasında vida girişlerinin açılması. Sonrasında bağlantı yüzeyi temizlenmesi sonucu elde edilen hibrit bileşen gösterimi	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

K_o	Temel malzemenin sertliği
MPa	Megapaskal
mm	Minimetre
N	Newton
µm	Mikrometre
ρ_j	j'inci elemanın yoğunluğu
ρ_o	Temel malzemenin yoğunluğu
x_j	j'inci elemanın sözde yoğunluğu

Kısaltmalar

Açıklamalar

ANSYS	Sistemlerin analizi
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CMM	Kordinat ölçme makinesi
CNC	Bilgisayarlı sayısal kontrol
DFM	Üretim için tasarım
DFMA	İmalat ve montaj için tasarım
DMLS	Doğrudan metal lazer sinterleme
EBM	Elektron ışın ergitme
EOAT	End of Arm Tooling
Eİ	Eklemeli İmalat
FDM	Erimiş Biriktirme Modellemesi
HIP	Sıcak izostatik presleme
LCA	Düşük maliyetli otomasyon
LPBF	Lazer toz yatağı füzyonu
SIMP	Katı izotropik malzeme ile cezalandırma
SLM	Seçici lazer ergitme
SLS	Seçici lazer sinterleme

STL

StereoLithography

TO

Topoloji Optimizasyonu

3D

3 Boyut



1. GİRİŞ

Otomasyonun faydaları, üretkenliğin artması, ürün maliyetlerinin azalması, üretim süreci üzerinde daha etkili kontrol ve iyileştirilmiş kaliteye sahip daha homojen ürünlerin sağlanması ve kazaların azaltılmasıdır. Robot teknolojisindeki ilerlemelerle birleştirilmiş olan otomasyonun hemen hemen her endüstriye yayılması, robotlar için artan sayıda özel kavrama sistemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kavrama cihazları, hala robotlarda en çok kullanılan araçlardır ve ticari olarak bulunan çözümlerin geniş olmasına rağmen, genellikle uygulamaya özgü olarak tasarlanmaları gerekmektedir.

Bu tezin amacı, bir kavrama cihazı tutucusunun tasarımındaki en önemli yönleri bulmak ve simülasyon araçlarının tasarımında nasıl kullanılabileceğini incelemektir. Ayrıca, kavrama cihazı tutucusunun tasarımında eklemeli imalatın (Eİ) nasıl kullanılabileceği ve Eİ ile üretilen kavrama cihazlarının tutucusunun piyasada bulunan genel çözümlerle karşılaştırıldığında ne tür avantajlara sahip olabileceği incelenmiştir. Araştırma sorusu, "Robotik kavrama cihazlarının tutucusunun eklemeli imalat için nasıl tasarlanabileceği ve bu yöntemin ne gibi faydalar sunabileceği" olarak özetlenmiştir.

Bu araştırmada, topoloji optimizasyonu (TO) ile robot kol parmak tutucusu tasarlanmış ve Eİ ve geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiştir.

Bu tez çalışması ile sağlanan ana faydalar, özellikle karmaşık bir kavrama cihazı tasarlanırken maliyet tasarrufu ve teslimat sürelerinin kısalması gibi durumlardır. Diğer faydalar arasında parça sayısının azaltılması ve kavrama cihazına hava hortumlarının entegre edilme olasılığı bulunmaktadır. Bulunan temel dezavantaj ise basit kavrama cihazlarında muhtemelen daha yüksek maliyetlerin ortaya çıkacak olmasıdır.

Endüstriyel robotlar, malzeme taşıma, kalite kontrol, kaynak ve montaja kadar üretim ortamlarındaki çok çeşitli işleri yerine getirmek üzere üretilmektedir. Bu robotlar, endüstriyel süreçlerde üretkenliği, doğruluğu ve verimliliği artırmak için insanlarla birlikte çalışmaktadır. Son teknoloji sensörler ve hassas kontrollerle donatılmıştır ve böylece robotlar neredeyse her endüstride üretim ve iş yapma maliyetlerini düşürmektedir.

Endüstriyel robotlardaki ilerlemeler, güvenilirliklerini ve hassasiyetlerini artırmış, bu da endüstriyel robotların çeşitli olağandışı görevlerde kullanılmasına neden olmuştur. Otomasyona yönelik artan çabalarla birleştirildiğinde, endüstriyel robotlara olan talep son 10 yılda büyük ölçüde artmış ve 2023'te 10 milyar ABD doları işletme birimi olan

endüstriyel robotların toplam miktarının 2030 yılına kadar %56.57'lik bir bileşik büyüme oranı ile 110.24 milyar ABD dolarına artması öngörülmektedir [1].

Robotlar, çevreleriyle End of Arm Tooling (EOAT) ile etkileşime girerler, bu da otomasyon görevinin küçük ancak hayati bir parçasıdır. EOAT, robotun yaptırılmak istenilen görevine göre seçilir. En çok kullanılan EOAT'lerden biri, farklı kavrama mekanizmaları olan kavrayıcılarıdır ki bunlar, tarım, tıp ve otomatik endüstriler gibi belirli endüstrilerde robotların kullanışlı olmasını sağlamak için gereklidir [2, 3].

Kavrama sürecinin otomatikleştirilmesi çok karmaşıktır. Pazarda birçok farklı kavrayıcı bulunmasına rağmen, kavrama cihazının genellikle uygulamaya özgü olarak tasarlanması gerekir. Bu durum da kavrayan nesnelere, yapılan görevi ve robotun çalıştığı ortamı dikkate alınmasını gerektirmektedir [2,4,5].

Endüstriyel robotların güvenilirliği ile ilgili en önemli faktörler, yük, kavrama yöntemi, erişilebilirlik ve bakım özellikleridir. Birçok robot, insanlarla aynı ortamda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tip işbirlikçi robotlar veya cobot'lar olarak bilinir ve cobotların gereksinimleri daha çok güvenilirlik ve güvenlik yönündedir. Bu yönler, genellikle daha küçük robotlar kullanılarak artırılabilir ancak küçük robotlarla, yük yalnızca gram cinsinden olabilir ve kavrama cihazının ağırlığı doğrudan robotun maksimum yük taşıma kapasitesini ve hızlanmasını etkiler [2, 6].

Topoloji optimizasyonu (TO), belirlenmiş yükler ve sınır koşulları ile verilen bir tasarım alanındaki malzemenin dağılımını optimize etmenin matematiksel bir yöntemidir ve istenilen performans hedeflerini daha az malzeme kullanarak karşılamaya çalışır. TO, parçaların ağırlığını optimize etmenin, fonksiyonlarını veya yapısal bütünlüklerini tehlikeye atmadan, gerçekleştirebileceğini göstermektedir. Ancak, TO'dan elde edilen optimize edilmiş parça şekilleri genellikle geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmeyecek kadar karmaşıktır.

Eklemeli imalat (Eİ), genellikle 3D baskı olarak adlandırılan, geleneksel yöntemlerle imalatı imkânsız olacak kadar karmaşık şekilli parçaları üretme yeteneğini kanıtlamıştır. Eİ kullanıldığında, bu karmaşıklık bir sorun teşkil etmekten çıkmaktadır. İlk Eİ tekniği olan stereolitografi, 30 yılı aşkın bir süre önce tanımlandı ancak 2009'da ergiyik birleştirme modelleme (FDM) ile ilgili kritik patentlerin süresinin dolmasıyla yüzlerce şirket Eİ endüstrisine yönelmiştir. O zamandan itibaren, eklemeli imalat ve 3D baskıya olan ilgi sürekli artmaktadır [7, 8].

Bugün, Eİ'nin kullanımı hızlı prototipleme ve özel takım üretiminden son kullanıma kadar geçmiştir ve farklı endüstrilerden yüzlerce örnek, Eİ teknolojisinin yeteneklerini kanıtlamıştır [9].



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Otomasyon, az ya da hiç insan emeği kullanmadan belirlenmiş bir dizi işlemi gerçekleştirme sürecini ifade eder. Bu, manuel bir sürecin otomatik bir sürece dönüştürülmesi anlamına gelir. Otomasyonun temel amaçları, çeşitli üretim operasyonlarını entegre ederek ürün kalitesini ve homojenliğini artırmak, işgücü maliyetlerini en aza indirmek, insan hatalarının olasılığını ve çevrim sürelerini azaltmaktır [10].

Otomasyon, neredeyse her endüstride üretkenlikte hızlı artışlara, üretim maliyetlerinde azalmaya, gereken zemin alanında azalmaya, üretim süreci üzerinde daha etkili kontrol sağlamaya, iyileştirilmiş kaliteye sahip daha homojen ürünlere ve neredeyse her endüstride kazaların azalmasına neden olmuştur. Otomasyonun bir alt kategorisi, düşük maliyetli otomasyon (LCA) olarak adlandırılır, burada mevcut ekipmanlar, araçlar, yöntemler vb. pazarda bulunan mevcut ekipmanlar ve bileşenler kullanılarak otomatik hale getirilir. LCA'da temel süreç aynı kalır, ancak manuel içerik azaltılarak basitleştirilir. LCA'nın temel faydaları düşük yatırım, artan üretkenlik, malzemenin daha iyi kullanımı ve daha iyi işlem tutarlılığıdır. Düşük maliyetli otomasyon, besleme, kelepçeleme ve kaynak yapma gibi bir dizi etkinlikte kullanılabilir [10].

TO kullanıcılara optimizasyon tasarım yanıtları dahil olmak üzere çeşitli amaç fonksiyonu terimleri ve kısıtlamaları sunar: hacim, kütle, uyum, yer değiştirmeler, dönmeler, reaksiyon kuvvetleri, reaksiyon momentleri, iç kuvvetler, doğal frekanslar, ağırlık merkezi, eylemsizlik momentleri, frekans tepkisi analizi (genlikler, fazlar, hızlar ve ivmeler) ve akustik ölçümler (yüzey hızları, ses basıncı). M. Sugavaneswaran ve ark. [11], çeşitli uygulama için endüstriyel robot, benzersiz tasarımlı, sınırlı hacimli, kısa açıklıklı ve en düşük maliyetli tutucuya ihtiyaç duymuş ve bu kapsamda çalışma yapmışlardır. Çalışmaları için düşünülen robot tutucu statik yapıda olduğundan hacim kısıtlarına göre optimizasyon yapılmıştır. Sonlu eleman analizi destekli TO'nın, sınırlı hacimli bileşenler için daha iyi tasarım alanı elde etmede büyük potansiyel gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, TO kullanılarak paketleme işlemi için 100 g'lık bileşeni kaldıracak bir mini robotun tutucusu tasarlanmıştır. Ancak karmaşık optimize edilmiş tasarımın geleneksel imalat prosesi kullanılarak üretilmesi açısından sınırlamalar olduğunu belirtmişlerdir [11].

TO, robot yakalayıcı sınır koşullarını göz önünde bulundurarak %25, 50 ve 70 hacim kısıtlamalarıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı hacim kısıtlamaları için tasarım tepkisi, amaç fonksiyonu olarak minimum gerinim enerjisi cinsinden ölçülmüştür. Sonuç olarak ise özel olarak hazırlanmış uygulamalara yönelik robot tutucu, bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknikleriyle tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca çalışmalarında TO'un Eİ entegrasyonunun avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Önerilen metodoloji, ağırlığın 7 g azalmasıyla sonuçlanmış ve maliyette %39 azalma sağlandığı bildirilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada bildirilen çerçevenin imalat süresini kısalttığı, kullanılan malzemenin hacmini azaldığı ve daha uygun maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada sunulan yaklaşım, özel uygulamalara yönelik ürünlerin optimum tasarımı ve imalatı için alternatif bir yöntem olarak görüldüğü bildirilmiştir [11].

A. Loyda ve ark. [12], bir Ti6Al4V havacılık bileşeni üretmek için seçici lazer ergitme (SLM) prosesi ile 5 eksenli frezeleme yoluyla proses sonrası operasyonları birleştiren hibrit bir yaklaşım kullanmıştır. Tasarım aşamasından itibaren Hibrit Eİ sürecinin tüm aşamalarındaki gereksinimler ve ihtiyaçlar dikkate alınmıştır. Malzeme payını dikkate almak için, Eİ sırasında artık gerilimlerin neden olduğu çarpıklıkların sayısal bir simülasyonu yapılmıştır. Yapım aşamasındaki ve işlem sonrası bileşenin durumu, koordinat ölçme makinası (CMM) incelemesi ve pürüzlülük ölçümleri yoluyla analiz edilmiştir. SLM ile üretilen bileşenin 3 boyutlu taranmış modeli, bileşenin distorsiyon davranışını anlamak için kullanılmış ve sayısal simülasyonla karşılaştırılmıştır. Son olarak, son aşamada bileşenin yüzey kalitesini ve boyutsal doğruluğunu iyileştirmek amacıyla bazı kritik yüzeylerde 5 eksenli frezeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapım aşamasındaki ve işlem sonrası bileşenlerin incelenmesi, önerilen hibrit yaklaşımla elde edilen iyileşmeyi gösterdiği bildirilmiştir. Çalışma, yüksek hassasiyetli işleme operasyonlarının işlem sonrası tekniklerle entegre edilmesiyle, zorunlu hassasiyetin gerektiği karmaşık geometrilere sahip bileşenlerin metal hibrit eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesini mümkün kılmak için gerekli temel bilgileri sağlamaktadır [12].

N. Lappalainen [13], robot kol tutucu tasarımında Eİ'den nasıl yararlanılabileceği ve Eİ ile üretilen tutucuların piyasadaki genel çözümlerle üretilen tutuculara göre ne gibi avantaj ve dezavantajlara sahip olabileceği araştırmıştır. Araştırmasında Eİ ile TO edilmiş bir vakumlu tutucu tasarlanarak üretilmiş ve bir otomasyon projesi için geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak tasarlanan bir referans tutucuyla karşılaştırmıştır. Eİ parçası için, daha hafif tasarımlar elde etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi destekli TO

yapılmıştır. Parçaların mekanik dayanıklılığını doğrulamak ve malzeme seçimini değerlendirmek için Creo Simulite kullanılarak sonlu eleman simülasyonları yapılmıştır. Eİ ile üretilen tutucu, sekiz adet 20 mm'lik vantuzla 226,2 N'lik maksimum teorik kaldırma kuvveti üretebildiğini bildirmiştir. Tutucuların hareketini ve gücünü değerlendirmek için simülasyon araçları kullanmıştır. Son Eİ tutucusunun ağırlığı, CAD modelinin ağırlığı hesaplandığında 2009 g ve üretilen parça ağırlığı 800 ±100 g olduğu; bunun referans tutucunun ağırlığının yarısı kadar olduğu bildirilmiştir. Referans tutucu için 3050 Euro'ya kıyasla SLM ile üretilen Eİ tutucu için alınan teklifin 550 Euro olduğunu bildirilmiştir. Eİ tutucunun ana avantajlarının, özellikle karmaşık bir tutucu tasarlanırken maliyet tasarrufu, teslimat süreleri ve azaltılmış parça sayısı ve hava hortumlarını tutucuya entegre etme olanağının yer aldığını bildirmiştir. Bulunan ana dezavantajların ise basit tutucularda olası daha yüksek maliyet ve üretimden sonra tasarım değişikliklerinin gerçekleştirilmesinin zorluğu olduğunu bildirmiştir [13].

2.1. Robot Teknolojisi

Uluslararası ISO 8373:2012 standardı, endüstriyel robotu 'Otomatik olarak kontrol edilen, yeniden programlanabilir ve üç veya daha fazla ekseninde çok yönlü manipülasyon sağlayabilen bir cihaz' olarak tanımlar. Bu robotlar, sabit veya endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanılabileceği gibi mobil olarak da konumlandırılabilir. Bu tanım, el ile yönlendirilen robotları, mobil robotların bölümlerini manipüle eden robotları ve işbirlikçi robotları (cobots) içerir [14].

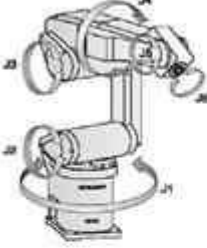
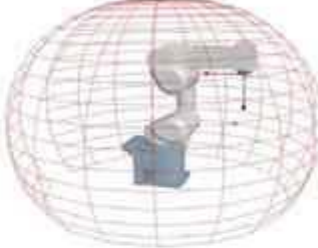




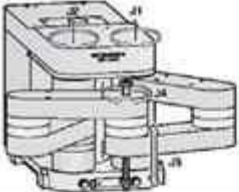








En basit haliyle, endüstriyel bir robot, kolunu önceden belirlenmiş bir yol boyunca hareket ettiren bir makine olabilir. Bu yol, tamamen önceden programlanmış olabilir, robotun çevresi tarafından etkilenebilir veya robotun sensörleri tarafından sağlanan bilgilere bağlı olabilir.

Mekanik olarak, bir endüstriyel robot bir el, bilek, kol ve taban içerir, el, robotu manipüle edilen nesneye bağlayan robotun bir parçasıdır. Bilek, eli üç hareketle hareket ettirir: pitch (yukarı ve aşağı hareket), yaw (yan hareket) ve roll (döndürme hareketi). Kol, dirsek ve omuz eklemlerinde dönerek eli manipüle edilen nesneye ulaştırmak için kullanılır. Taban, aynı zamanda omuz olarak da adlandırılır, tüm kolu destekler, ona destek sağlar ve dönebilir [10].

Uluslararası Robotik Federasyonu (IFR) tarafından, robotların mekanik yapılarına göre yedi sınıfa ayrılması gerektiği belirtilmektedir [15]:

- Doğrusal robotlar (cartesian ve portallı robotlar dahil)
- SCARA robotlar
- Artiküle robotlar
- Paralel/delta robotlar
- Silindirik robotlar
- Diğer
- Sınıflandırılmamış

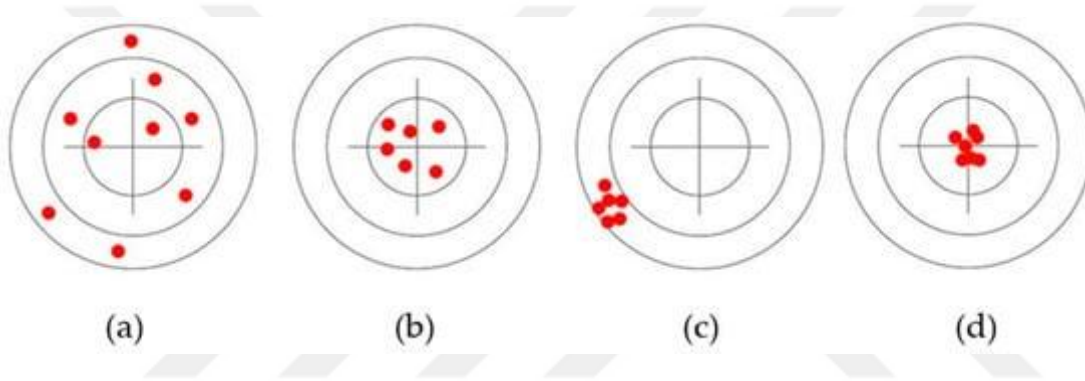
Doğrusal robotlar, esneklikleri ve büyük bir alanda bile X, Y ve Z eksenleri boyunca doğru bir şekilde hareket etme yetenekleri nedeniyle popüler, basit bir tercihtir ve genellikle CNC makinelerinde ve 3D yazıcılarında kullanılırlar. Ancak, daha az hareket özgürlüğüne sahiptirler. Araç döner hareketi gerektiğinde SCARA robotlar iyi bir seçenek olabilir. Genellikle montaj ve paketleme için kullanılırlar. Daha talepkâr görevler için, artiküle robotlar, geniş hareket aralıkları nedeniyle en uygun olanlardır. Genellikle montaj, kaynak uygulamaları, malzeme taşıma ve paketleme işlemlerinde kullanılırlar. Farklı robotlar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan parça artiküle robota ait bir parçadır. Artiküle robotlar, endüstriyel otomasyonun bel kemiğini oluşturan, çok yönlü ve yüksek hassasiyetli makineler olarak tanımlanmaktadır. Bu robotlar, insan kolunun hareket kabiliyetini taklit eden ve genellikle üç ila altı serbestlik derecesine sahip olan çok sayıda eklem ve döner bağlantıya sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, geniş bir hareket yelpazesine ve yüksek esneklik düzeyine sahiptirler.

Principle	Kinematic Structure	Photo
Articulated Robot 		
SCARA Robot 		
SCARA Robot 		
Cartesian Robot 		
Parallel Robot 		

Şekil 2.1 Yaygın endüstriyel robot sınıfları [15]

Robot doğruluğu, aracını ne kadar hedefe yakın bir şekilde hareket ettirebileceğini ifade eder. Tekrarlanabilirlik ise hareket tekrarlandığında aynı konuma ne kadar doğru bir şekilde ulaşılabilirliğini gösterir.

Robot doğruluğu ve tekrarlanabilirliği Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilmiştir [10]. Cobotlar, ortamlarını insanlarla paylaşırlar ve tipik endüstriyel robotlardan biraz farklı gereksinimleri karşılamaları gerekir. Cobotlar için genellikle doğruluk gereksinimleri endüstriyel robotlara göre daha azdır, ancak güvenlik ve güvenilirlik gereksinimleri çok daha önemlidir. Bu güvenlik gereksinimleri çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir, ancak yazılım güvenilirliği ve olası mekanik arızalara karşı hazırlıklı olma gibi unsurlardan insanların makineye müdahale etme hatalarına kadar uzanır [6].



Şekil 2.2 Robot doğruluğu ve tekrarlanabilirliğinin görselleştirilmiş durumu

2.2. Robot Kol Tutucusu

Artiküle robotlar, eklemler aracılığıyla çeşitli eksenlerde hareket etmeye dayanır. Her bir eklemler, bağımsız olarak hareket edebilme yeteneğine sahip motorlar veya aktüatörlerle donatılmıştır. Bu motorlar, robotun istenen yöne ve pozisyona hareket etmesini sağlamak için hassas şekilde kontrol edilir. Bu kontrol mekanizması sayesinde, artiküle robotlar karmaşık görevleri büyük bir hassasiyet ve tekrarlanabilirlik ile yerine getirebilirler. Robotların çok yönlülüğü onlar için uygun hazırlanmış parmak tutucuları gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Nesnelere kavrama ve manipüle etme yeteneği, robotların ilerlemesinde merkezi bir rol oynamıştır [16-25]. Üreticiler, hassasiyet, performans ve üretkenliğin avantajlarından yararlanmak için tutucu teknolojisindeki gelişmeleri kullanarak nesnelere toplamak, yerleştirmek ve paketlemek için uç efektör takımlarını kullanabilirler [26]. Tutucular tasarımlarına, nasıl çalıştırıldıklarına ve uygulamalarına bağlı olarak sınıflandırılır. Örneğin, endüstriyel tutucular dikkate alındığında en basit

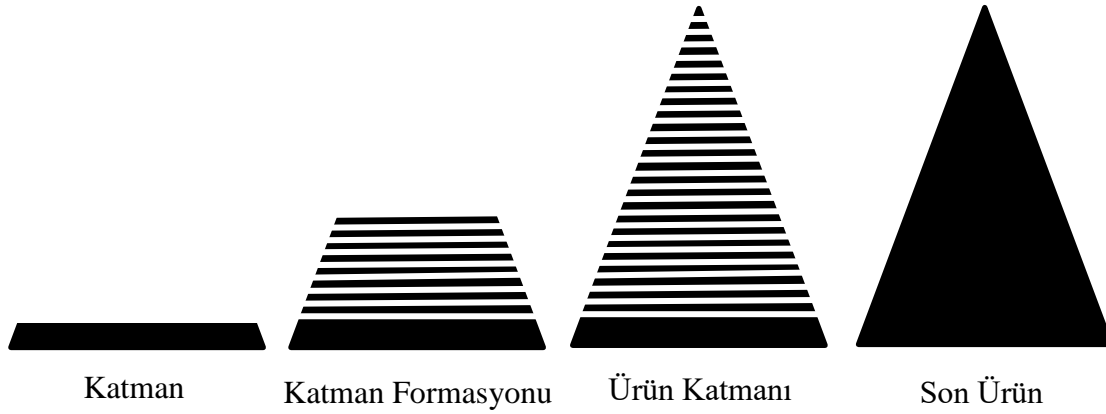
tasarımlardan biri, genellikle nesneleri kaldırmak için kullanılan paralel hareketli iki çeneli tutucudur [27-30]. Diğer bazı tasarım tipleri O-halka tutucuyu ve iğne tutucuyu içerir. Endüstriyel tutucular, uygulama gerekliliklerine bağlı olarak hidrolik, pnömatik veya elektrikli olabilir [24, 31, 32]. Ancak her ne kadar piyasada mevcut olan tutucuların sayısı yıllar geçtikçe artıyor olsa da bu durum, robotların hala başaramadığı pek çok karmaşık görevin olduğu gerçeğini değiştirmemektedir. Robot teknolojisindeki son gelişmeler, robotların geleneksel zorlukların üstesinden gelmesine ve yeni alanlara yayılmasına olanak tanır [33, 34]. Tasarımın işlevsel ve başarılı olması için karmaşık geometriler oluşturması, bir nesnenin şekline mekanik olarak uyum sağlaması, ultra hassas dokunmatik sensörlerle kavrama ve yönlendirme konusunda uzmanlaşması ve insana yakın benzerlik elde etmek için düşük darbe enerjisine sahip olması gerekmektedir [35]. Birçok farklı model tutucuların geliştirilmesi aynı zamanda karmaşık tasarıma sahip olması beraberinde robot kol tutucularının da gelişmesini gerektirmektedir. Robot kollarının genel olarak kaldıracabileceği bir ağırlık limiti bulunmaktadır. Bu limitlerin aşılması farklı türdeki robotların kullanımını gerektirmektedir. Hem maliyet hem de kullanılabilirlik bakımından bu engellerin aşılması için hareketli parçaların ağırlığının azaltılması gerekmektedir. Hareketli donanımların optimizasyonu içinde robot kol tutucularının kullanıma özel bir şekilde ve sistematik olarak ağırlığının azaltılması gerekilebilir. Robotların sahip olduğu belirli hareket imkanını kısıtlamadan daha da rahatlatılacak tutucuların geliştirilmesi robotun hareket kabiliyetini artırmak artıracaktır. Hızlandırılmış makine bileşenlerinin hafifletilmesi hızının artmasını, çevrim süresinin kısılmasını ve genel üretkenliğinin artmasını sağlayacaktır. Ek olarak azaltılmış kütle doğrudan gelişmiş konumlandırma doğruluğu, daha az enerji tüketimi ve genel olarak daha sürdürülebilir üretim ile sonuçlanır.

2.3. Eklemeli İmalat

Bir ürünün işlevselliği, geometrisinden ve özelliklerinden kaynaklanır ve bu özellikler bir dizi üretim operasyonu ile elde edilir. Eİ, geleneksel üretim yöntemleri olan çıkartma ve şekillendirme üretim yöntemlerinin yanında temel bir üretim yöntemi olarak tanınmıştır. Eİ teknolojisi, prototipleme yönteminden son ürünlerin üretim yöntemine hızla dönüşmüştür. Özellikle tasarım ile kütle azaltımı yapılmış parçaların üretimi konusunda geleneksel üretime kıyasla daha avantajlı olarak bilinmektedir.

2.3.1. Eklemeli İmalat (Eİ) Teknolojisi

Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla Eİ teknolojisi, bir parçanın tasarımı tamamlanana kadar malzeme eklenerek üretilir. Eİ, genellikle bir parçadan malzeme çıkarılarak yapılan geleneksel üretim yöntemlerinden farklıdır. Eİ, çeşitli teknolojilere dayanmasına rağmen, mevcut Eİ yöntemleri genellikle malzemenin katman katman birleştirildiği bir teknik kullanır. Malzeme, karmaşık üç boyutlu parçaları üretmek için 3D bilgisayar destekli tasarım (CAD) kullanılarak üretilen parçaları katman katman birleştirmek için kullanılır. Katman katman birleştirme tekniği, şematik olarak Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Katman katman birleştirme tekniği şeması

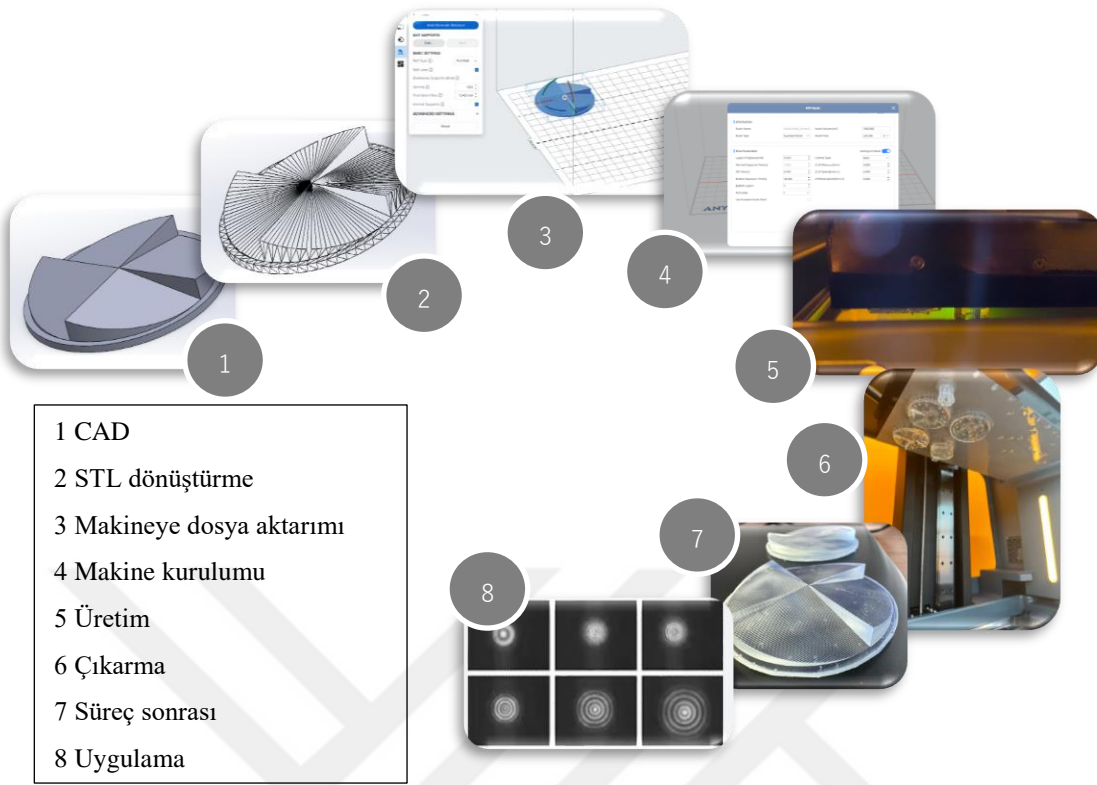
Eİ için tasarlama süreci genellikle aşağıdaki sekiz adımdan oluşur ve tüm Eİ teknolojilerine uygulanabilir, ancak önemleri kullanılan Eİ teknolojisine bağlıdır [36].

1. Kavramsal Tasarım ve CAD
2. STL'ye Dönüştürme
3. Eİ makinesine transfer ve üretim dosyası oluşturma
4. Makine Kurulumu
5. İmalat
6. Parça Çıkarma ve Temizlik
7. Son İşlemler
8. Uygulama

Tipik bir Eİ süreci, kavramsal tasarımla başlar, ancak geleneksel tasarım süreçlerine kıyasla, Eİ sürecinde 3D CAD bilgileri gereklidir. 3D CAD verileri, 3D CAD yazılımı ile veya tersine mühendislik teknolojileri (örneğin, 3D tarama) aracılığıyla oluşturulabilir. Tipik bir 3D parça dosyası, Eİ süreçleri için gereksiz olan inşa verileri, modelleme geçmişi vb. içerir. Çoğu Eİ teknolojisi, yalnızca modelin yüzeylerinden oluşan ve onları bir dizi üçgen yüzeyle temsil eden STL dosya formatını (StereoLithography) kullanır. Üçgenlerin boyutu, 3D CAD dosyasının STL dosyasına dönüştürülürken manuel olarak seçilebilir ve üçgenlerin boyutu, STL dosyasının doğruluğuyla ilişkilidir. Genel kural ise minimum üçgenin, kullanılacak Eİ makinesinin çözünürlüğünden daha küçük olması gerektiğidir [36].

Sonrasında, STL dosyası, kullanıcının parçada gerekli ise son düzenlemelerin yapılmasını, hangi parçaların basılacağını seçmesini ve üretim parametrelerini belirlemesini sağlayan bir Eİ sistem yazılımına aktarılır. Kullanılabilir üretim parametreleri, kullanılan makineye bağlı olarak değişir ve yüzlerce olası parametre olabilir, ancak genellikle çoğu parametre için varsayılan ayarlar veya önceden tanımlanmış ayarlar kullanılır ve mevcut parametrelerin yalnızca bir kısmı değiştirilir [36].

İmalat parametreleri ayarlandıktan sonra, parça dilimlenir (katman kalınlığına göre xy düzlemi 2D görüntülere bölünür) ve Eİ makinesi başlatılır. Belirlenen parametrelere göre parçayı imal etmeye başlar. Makine, parça tamamlanana kadar, hammadde toz kalmayana kadar, kritik bir hata meydana gelene kadar veya kullanıcı manuel olarak makineyi durdurana kadar parçayı üretmeye devam eder. İmalat tamamlandıktan sonra, parça temizlenmeli ve son işlemler yapılmalıdır. Parçanın temizlenmesi, parçanın imalat platformundan çıkarılmasını, bazen gerilme giderme işleminin uygulanmasını ve destek malzemesinin çıkarılmasını içerir. Son işlemler, parçayı nihai haline getirmek için yapılması gereken tüm işlemleri içerir. Bu, kuşlama veya diğer aşındırıcı işlemler, işleme, yüzey kaplama veya ısıl işlemi içerebilir [36]. Şekil 2.4'de tipik olarak Eİ prosesi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Standart Eİ prosesi

Yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleri Şekil 2.5’de gösterildiği gibi yedi sınıfa ayrılabilir. Bu yöntemlerin her birinin, maksimum parça boyutu, baskı hızı, çözünürlük ve yüzey kalitesi gibi belirli kısıtlamaları ve yetenekleri vardır. Yöntemler şu şekilde özetlenebilir [37];

Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting): Toz malzemenin katmanlar halinde düzenlenmesi ve bir bağlayıcı maddenin püskürtülmesiyle parçaların oluşturulduğu bir Eİ yöntemidir. Bu yöntemde polimerler, metaller veya seramiklerden parçalar oluşturulur. Bağlayıcı püskürtme ile üretilen metal parçalar nispeten ucuzdur ve destek gerektirmezler. Sonuçlanan parçalar genellikle baskıdan sonra yapılması gereken sinterleme işlemi nedeniyle %3-5 oranında gözenekliliğe sahiptir [13].

Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition): Genellikle metal toz ve tellerinin bir enerji kaynağı tarafından katman katman biriktirilmesi sürecini ifade eden Eİ yöntemidir.

Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion): Malzemenin bir nozül aracılığıyla katmanlar halinde bir platforma eklenmesiyle parçaların oluşturulduğu bir Eİ yöntemidir. Üretim süreci görece basittir ve üretilen parçalar destek çıkarılması dışında herhangi bir

işleme ihtiyacı duymazlar. Bu yöntem genellikle polimerlerde kullanılabilir ve parçaların çözünürlüğü, erimiş polimeri etkili bir şekilde işlemek için gereken büyük boyuttaki birikim başlıklarının varlığından dolayı çok büyük değildir [38].

Malzeme Püskürtme (Material Jetting): Malzemenin bir nozül aracılığıyla sıvı veya toz halinde katmanlar bir platforma eklenmesiyle parçaların oluşturulduğu bir yöntemdir. Yapım malzemesi polimer parçaya malzeme eklemek için damlacıklar halinde biriktirilir.

Levha Laminasyonu (Sheet Lamination): Katmanlar halindeki levhaların bir araya getirilmesiyle parçaların oluşturulduğu bir Eİ yöntemidir.

Havuz Biriktirme Fotopolimerleşme (Vat Photopolymerization): UV ışığının kullanılmasıyla sıvı bir reçinenin katman katman polimerize edilerek parçanın oluşturulduğu bir yöntemdir.

Toz Yataklı Ergitme (Powder Bed Fusion): Toz halindeki malzemenin bir lazer veya elektron demetiyle ergitilerek katmanlar halinde bir araya getirilmesiyle parçaların oluşturulduğu bir Eİ yöntemidir [39].

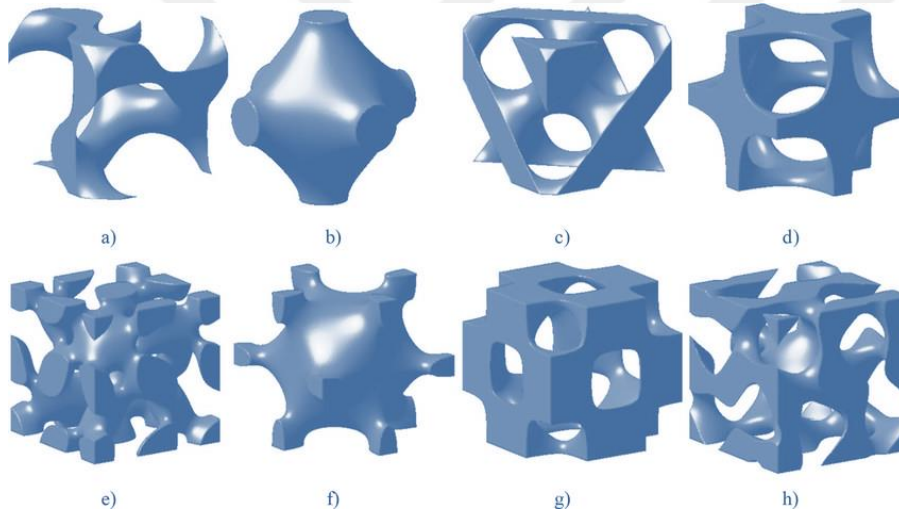


Şekil 2.5 ISO/ASTM 52900:2015'e göre Eİ süreçlerinin sınıflandırılması [40]

2.3.2. Eklemeli İmalatın Faydaları

Eİ teknolojisi, geleneksel, çıkartmalı imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında benzersiz faydalar sunar. Eİ'den en iyi faydaları elde etmek için, tasarımın seçilen imalat yöntemine özel olarak yapılması önemlidir [41].

Gelişmiş 3D modelleme, Eİ tarafından sunulan tasarım özgürlüğünden daha fazla fayda elde etmek için kullanılabilir. Örneğin, örgü, hücresel veya kafes yapılarına sahip parçalar bu metotla üretilebilir. Kafes yapıları için farklı örnekler Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Bu yapılar ayrıca, farklı yoğunlukta, yalnızca iş parçasının bir kısmına dahil edilebilir; iş parçasının sadece bir kısmında kullanılan değişen örgü yapısının bir örneği ise Şekil 2.7'de görülebilir [36, 42].



Şekil 2.6 Çeşitli kafes yapıları a) Gyroid, b) Primitive, c) Diamond, d) iWP, e) Lidinoid, f) Neovius, g) Octo, h) Spilt [43]



Şekil 2.7 Topology yazılımıyla üretilen değişken kafes yapısı [44]

Geleneksel imalat yöntemlerinde, genellikle daha basit ve tekrar edilebilir işlemlere odaklanmaktadır. Karmaşık yapıdaki parça üretimleri farklı türdeki işleme araçları gerektirdiğinden zordur. Eİ’de ise her üretim özel olarak tasarlanabilir ve tek bir parçanın imalatı ekonomik olarak uygulanabilir hale gelir. Ek olarak, takım gereksinimi olmadığından ve karmaşıklığın artması imalat süresini artırmadığından, bu ek karmaşıklık daha fazla maliyete neden olmaz [36].

Daha karmaşık şekillerin imal edilme olasılıkları nedeniyle, Eİ ayrıca, geleneksel imalat yöntemleriyle birden fazla parça montajı gerektirebilecek geometrik şekillerin üretilmesini sağlar. Üretimle ilgili bu faydaların yanı sıra Eİ, özel olarak hazırlanmış yedek parçaların talep üzerine üretimine olanak tanır. Bu da depolama, taşıma gereksinimlerini azaltır ve tedarik zincirini kısaltır [38, 45].

Eİ farklı faydaları sayesinde farklı endüstrilere hitap edebilmektedir. Örneğin, havacılık endüstrisi aynı mekanik özelliklere sahip karmaşık parçaları düşük maliyetle ve azaltılmış ağırlıkla elde edilebilir. Öte yandan, tıbbi endüstrilerde, özel olarak hazırlanmış parçaların maliyeti daha etkin olur. Otomotiv endüstrisinde Eİ fazla parçaları azaltmaya, pazara giriş süresini hızlandırmaya ve stokları azaltarak onarımların maliyetini önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olabilir [45]. Aynı şekilde robot kolları gibi ağırlık azaltımının faydalı olacağı parçalarda da Eİ önemli bir potansiyele sahiptir.

2.3.3. Toz Yataklı Ergitme

Toz yataklı lazer ergitmeli veya sinterlemeli sistemler, toz malzemeyi lazer veya elektron ışınlarıyla işlemektedir. Sistemlerde kullanılan enerji kaynaklarının çapı genellikle 20 ile 200 μm arasındadır. Tozlar, imalat platformuna serildikten sonra istenilen üç boyutlu tasarım, katman oluşturma ilkesiyle taranır. İlk katman oluşturulduktan sonra, imalat platformu bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilir ve yeni toz tabakası serilir. Bu işlem, üç boyutlu cisim elde edilene kadar tekrarlanır. Toz yataklı Eİ yöntemlerinden yaygın olanlar arasında Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Lazer Ergitme (SLM) ve Elektron Işın Ergitme (EBM) bulunur [46].

2.3.4. Seçici Lazer Ergitme (SLM)

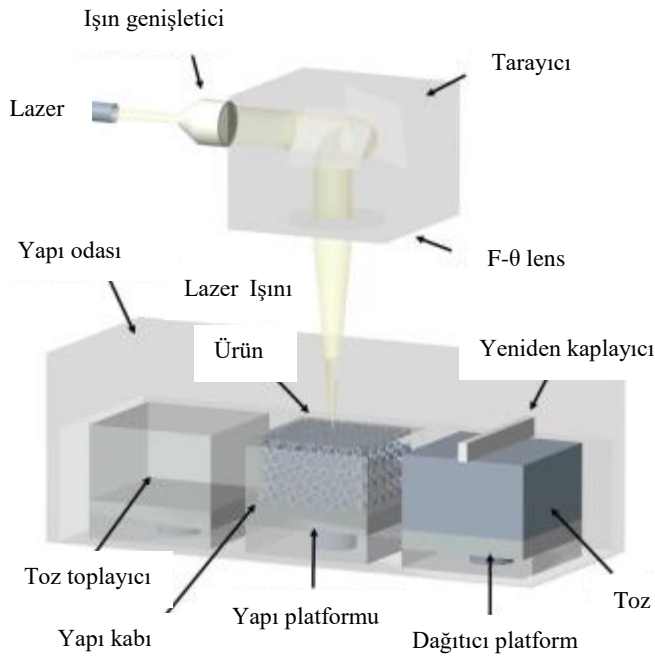
SLM, aynı zamanda lazer toz yatak füzyonu (LPBF) veya doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) olarak da adlandırılan bir Eİ tekniğidir. Bu işlem, yüksek güç yoğunluğuna sahip bir lazer ile metal tozların ergitilip birleştirilmesi için geliştirilmiştir. SLM işleminin prensibi, çok ince katmanlar halinde uygulanan metal tozlarıyla kaplanmış bir yapı platformu ile başlar, bu tozlar daha sonra bir veya birkaç lazer ışınının indüklediği termal enerji ile tamamen ergitilir. Tasarlanan 3D parçanın kesit alanı, her katmanda metal tozlarının seçilerek ergitilmesi ve yeniden katılmasıyla oluşturulur. Yapı platformu daha sonra küçük katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve yeni bir toz tabakası bir serici tarafından düzeltilerek yerleştirilir. Lazer ışını (ışınları), dikkatle tasarlanmış tarayıcı optikler aracılığıyla bilgisayar tarafından üretilen bir desene göre yönlendirilip odaklanabilir. Bu nedenle, toz partikülleri toz yatağında seçici olarak ergitilip, CAD tasarımına göre 3D nesnelerin şeklini oluştururlar [47].

SLM işlemiyle üretilen malzemeler arasında alüminyum, titanyum, bakır, krom, kobalt krom alaşımları, paslanmaz çelik, takım çeliği ve süper alaşımlar bulunmaktadır. Kullanılmayan tozların çoğu genellikle daha fazla Eİ işlemi için geri dönüştürülebilir. Tozların ergitilme sürecinde kirlenmesi veya oksitlenmesi durumunda belirli bir miktar malzeme kaybı meydana gelir ve dolayısıyla geri dönüşümsüz hale gelirler. SLM işlemi ayrıca keyfi olarak tasarlanmış şekillerin oluşturulmasında bazı sınırlamalara sahiptir. Yeni

katılmış tozların hemen altındaki toz yatağında ısı iletiminin zayıf olması nedeniyle, asılı geometrilerin veya yatay çubukların üretilmesi zordur [47].

Çoğu ticari SLM sistemleri genellikle 20 ila 50 μm arasında parçacık boyutuna sahip tozları kullanır ve katman kalınlığı tipik olarak 20-100 μm kalınlığında belirlenir. Geleneksel SLM'nin özellikle çözünürlüğünü artırmak için yapılan araştırma ve geliştirmeler, genellikle üç faktöre odaklanmaktadır: toz parçacık boyutu, lazer ışın çapı ve katman kalınlığı. Mikro SLM sistemlerinde sürekli ve atımlı lazerlerin her ikisi de kullanılmakta olup bu sistemlerde 20 ila 30 μm arasında değişen lazer nokta boyutu kullanılmaktadır. Böylece, çözünürlük artmaktadır [48].

SLM işleminin şematik gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir. SLM ve SLS'de, öncelikle bir toz tabakası inşa alt tabakaya serilir. Lazer ışını, gereken geometriye göre tozu ergitir veya sinterler. Sonrasında serici, katılmış parçanın üzerine bir sonraki toz tabakasını uygular, ardından lazer ile ergitme/sinterleme işlemi tekrarlanır. SLM işlemi sırasında ısınma ve soğuma hızları, lazer kaynağı ile toz arasındaki kısa etkileşim süresi nedeniyle çok yüksektir. Sonuç olarak, elde edilen ergiyik havuz geometrisi mikroyapı özelliklerini önemli ölçüde etkilediğinden, üretilen parçanın mekanik özellikleri geleneksel işlemlerden farklılık gösterir [49-51].



Şekil 2.8 SLM sürecinin şematik gösterimi [52].

SLM parçalarının nihai kalitesi, karmaşık sistem ve mekanizmalar nedeniyle birçok işlem parametresi tarafından etkilenir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi SLM işlem parametreleri özelliklere göre tozla, lazerle ve toz yatağı ile ilgili değişkenlere göre kabaca sınıflandırılabilir. Gerçek üretim ortamında, kimyasal bileşim, parçacık boyutu ve şekli ile morfolojisi gibi çoğu tozla ilgili işlem parametresi değişmezdir. SLM işlemini etkileyen lazer sistemleri ile ilgili parametreler arasında lazer tipi (yani, sürekli dalga (CW) veya atımlı), lazer gücü ve spot boyutu bulunur. Tarama parametreleri (tarama stratejisi, tarama mesafesi ve tarama hızı gibi) SLM ile üretilen parça özelliklerini önemli ölçüde etkiler. SLM işlem parametrelerinin üçüncü sınıflandırması toz yatağı özellikleridir. Çoğu toz yatağı işleminde, toz inşa platformuna bir serici mekanizması aracılığıyla serilir. Toz serim sisteminin verimliliği, serici tipi, serici geçiş sayısı, her geçişte alınan toz miktarı ve toz özellikleri de dahil olmak üzere bir dizi parametre tarafından etkilenir. Serici katmanının kalınlığı, parça özelliklerini kontrol eden önemli bir işlem parametresidir. Katman kalınlığı, parçacık boyut dağılımı ve lazer parametreleri, lazer-malzeme etkileşimini ve dolayısıyla ergiyik havuz özelliklerini etkiler.



Şekil 2.9 SLM işlem parametrelerinin özeti [52].

Şekil 2.10'da SLM ile üretilen parçaların bazı önemli özelliklerini özetlemektedir. Herhangi bir geleneksel işlemde olduğu gibi, çözünürlük, yüzey pürüzlülüğü, mekanik özellikler ve mikroyapı, nihai üretilmiş parçanın kalitesini ve dolayısıyla SLM işlemini değerlendirmek için karakterize edilir. Şekil 2.11 SLM'de meydana gelebilecek farklı olası kusurları göstermektedir. Kusurların oluşumu, kusursuz parçaların üretimi için optimize edilmesi gereken süreç değişkenlerine bağlıdır.



Şekil 2.10 SLM ile üretilen parçalarda genellikle incelenen özellikler [52].



Şekil 2.11 Tipik SLM süreci kusurları [52].

2.3.5. SLM'de Kullanılan Alaşımlar

Metallerden polimerlere, seramiklere ve kompozitlere kadar çeşitli türlerde malzemelerin kullanılmasını sağlar. Bununla birlikte, metal Eİ, son kullanım ürünleri açısından en ilginç alanlardan biridir. Metal Eİ son yıllarda büyük ilerleme kaydetmiş olup çelik, alüminyum, kobalt, nikel, bakır ve titanyum alaşımları gibi malzemelerden üstün özelliklere sahip tamamen yoğun metal parçaların imalatı gerçekleştirilebilmektedir.

Metal Eİ'de genellikle, malzeme besleme tozu veya telinin, katman katman tekniği kullanılarak 20 µm ile 1 mm arasında katman kalınlığı ile bir lazer veya elektron ışını enerjisi ile ergitilir.

Metallerin özellikleri, doğrudan mikro yapılarından etkilenir ve bu da üretim yöntemi tarafından kontrol edilmektedir. Özellikle yüksek performanslı uygulamalarda, metallerin mikro yapısını kontrol etmek, parçanın özelliklerini tahmin edebilmek için hayati öneme sahiptir. Eİ ile üretilen metal parçaların mikro yapısını tahmin etmek, genellikle üretim sırasındaki malzemenin karmaşık termal döngüsü nedeniyle oldukça zor olmaktadır. Bu durum bazı zamanlarda kararlı olmayan mikro yapılar ve kontrol edilemeyen kompozisyonlarla sonuçlanabilmektedir. Eİ'de malzemenin hızlı soğuması ise ince taneli mikro yapıların oluşmasına neden olmaktadır.

Mühendislik malzemelerinin en yaygın olanı olan çelik, Eİ için geniş çapta araştırılmaktadır. Şu anda, östenitik paslanmaz çelik kaliteleri AISI 316L, maraging çelik 18Ni-300 ve sertleştirilebilir paslanmaz çelik AISI 630 ve 15-5 gibi çeşitli çelik dereceleri, SLM ile üretilmektedir ve martensitik çelik AISI 420, SLM ile kullanım için araştırılmaktadır. Bu alaşımların Eİ ile elde edilen malzeme özellikleri genel amaçlı uygulamalar ve yüksek dayanım ve sertlik gerektiren uygulamalar için yeterlidir [39].

Titanyum, metal Eİ için en ilginç malzemelerdendir. Olağanüstü performansa sahip bir malzeme olmasına rağmen, geleneksel imalat yöntemlerinde yüksek işleme maliyetleri ve uzun teslim süreleri bulunmaktadır. SLM'de yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci, yüksek sıcaklıklarda performans, ısıl işlenebilme ve biyo uyumluluk gibi birçok avantajlı özelliği nedeniyle Ti6Al4V'ye odaklanmıştır [53, 54]. Bununla birlikte, rakip malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek maliyeti nedeniyle kullanımını büyük ölçüde havacılık ve biyomedikal uygulamalarla sınırlı kalmıştır [55].

Eİ için kullanılan diğer yaygın malzeme grubu alüminyumdur. AlSi10Mg, iyi kaynaklanabilirlik ve yüksek termal iletkenlik ile sertleşme özelliğine sahip yaygın olarak kullanılan bir alaşımdır. Bu özellikleri nedeniyle SLM uygulamalarında en çok kullanılan alüminyum alaşımıdır [56, 57]. AlSi10Mg alaşımı aynı zamanda, basınçlı döküm için kullanılan geleneksel bir döküm alaşımıdır. Yüksek mukavemeti ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle bu alaşım otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Al ve Si'nin ötektik bileşimine yakın olması nedeniyle iyi kaynaklanabilirliğe sahiptir. Mg yaşlandırma sertleşmesi sonrasında β' ve Mg₂Si (β -fazı) olarak önemli bir rol oynar [58]. Son zamanlarda, SLM ile üretilmiş AlSi10Mg 'nin üretim parametrelerinin mikro yapılar ve mekanik özellikler üzerine etkisinin inceleye birçok çalışma yayınlanmıştır [56, 59]. Hammadde malzemesi özellikleri (toz boyutu, morfoloji ve boyut dağılımı) dahil olmak üzere, SLM numunelerinin nihai kalitesini etkileyen birçok faktör vardır. Lazer ısı girişi, toz parçacıklarının konsolidasyon derecesini kontrol ettiğinden veya aşırı koşullarda anahtar deliği benzeri bir kusur oluşturabilen ergiyik havuzunda türbülanslar yaratarak kusur oluşumunu potansiyel olarak kötüleştirebildiğinden, önemli bir parametredir. Literatürde şu an AlSi10Mg alaşımı SLM'de çalışılan aktif bir konudur.

2.3.6. Eklemeli İmalat İçin Tasarım

Eİ, faydaları nedeniyle önemli ilgi görmesine rağmen, henüz kapsamlı bir tasarım prensipleri setine, üretim yönergelerine ve en iyi uygulamaların standartlaştırılmasına sahip değildir. Özellikle toz yatağı füzyonu gibi yüksek maliyetli Eİ teknolojilerinde, parçanın Eİ için tasarlanması kapsamlı Eİ bilgisi gerektirir. Eğer parça yöntem için iyi tasarlanmamışsa, başarısız bir baskı nedeniyle kaybedilen zaman ve para ortaya çıkabilir [38, 60].

İmalat ve Montaj için Tasarım (DFMA), tasarım sürecinde imalat ve montaj zorluklarını azaltmayı ve en aza indirmeyi amaçlayan bir uygulamadır. DFMA'nın geliştirilmesindeki temel fikir, ürün geliştirme sürecindeki problemleri mümkün olan en erken aşamada belirlemek ve yeniden tasarlama ihtiyacını azaltmaktır. DFMA'nın kullanılması, geleneksel imalat yöntemlerinin yetenekleri ve kısıtlamaları hakkında geniş bir bilgi birikimine yol açmış ve tasarım kültürü, bu kısıtlamalara dayanarak tasarım alanını sınırlamıştır. Eİ ile

aynı kısıtlamalar artık geçerli değildir ve Eİ için Tasarım (DFAM), Eİ'nin imkanlarını ve kısıtlamalarını dikkate alarak ürün performansını maksimize etmeyi amaçlar [36].

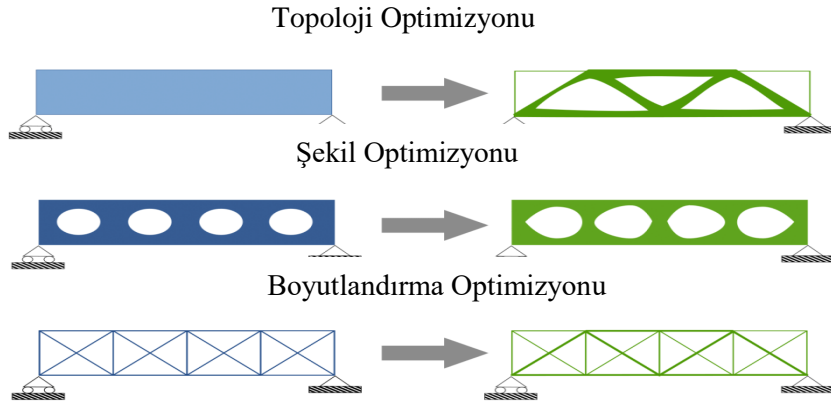
Eİ için tasarım çalışmasının akışı, geleneksel mekanik tasarımdan çok farklı değildir. Ana fark genellikle imalat yönteminin kısıtlamalarından gelir. Eİ ile üretilmesi planlanan bir bileşen tasarlanırken, dikkate alınması gereken birçok imalatla ilgili faktör bulunmaktadır.

- Parça yönelimi: Parça doğruluğu, parçanın baskı yöneliminden etkilenir. Örneğin, bir boş silindirin dairesel ucu üzerine basılırsa, üst üste bir dizi dairesel katman halinde basılacak ve sonuçta yuvarlak bir silindir elde edilecektir. Silindir yan tarafına basılırsa, silindirin kesit alanı aşağı sarkmalardan dolayı artık dairesel olmayabilir ve silindirin yanlarında belirgin katman desenlemesi olabilir, bu da parçanın orijinal CAD verilerinin daha az doğru bir yeniden üretimini ve daha kötü yüzey kalitesini sağlar. Genellikle parçalar, birden fazla eksen boyunca karmaşık özelliklere sahiptir ve parçanın basılması için optimal bir yönlendirme olmayabilir. Bu durumda, geometrisini koruması gereken en önemli özellikleri seçmek önemlidir. Tüm en önemli özelliklerin optimal baskı yöneliminde olması imkansız olabilir, bu durumda bazı özelliklerin sonradan işlenmesi gerekebilir. Bazen, destekler nedeniyle, kalite, baskı süresi ve yüzey kalitesi arasında denge kurmak gereklidir.
- Parça destekleri: Çoğu Eİ tekniğiyle imal edilirken aşağıya bakan yüzeyler, yukarıya bakan yüzeylere göre daha kötü yüzey kalitesine sahip olacaktır. Destekleri olan yüzeyler daha da kötü olacaktır ve desteklerin yüzeye geldiği yerlerde, destek ayırımından sonra küçük izler olacaktır. Destek miktarını azaltmak, yüzey kalitesini artırır ve son işlemi azaltır. Ancak bazı yüzeylerin yüzey kalitesi o kadar önemli olmayabilir ve bu nedenle, bu yüzeyler, daha hızlı baskı süresinde imal edilebilir. Ancak, Eİ teknolojisindeki gelişmeler, daha iyi optimize edilmiş destek yapılarını getirmiş ve bunları çıkarması daha kolay olmakta ve makul bir yüzey kalitesi bırakabilmektedirler.
- Üretim kısıtlama özelliklerinin dahil edilmesi: Geleneksel imalat kısıtlamaları Eİ için geçerli olmamasına rağmen, Eİ'nin kendi kısıtlamalarını tasarım sırasında göz önünde bulundurmamak gerekir.
- Parça sayısını azaltma: Geleneksel imalat yöntemlerinin kısıtlamaları nedeniyle birleşimler, bazı durumlarda Eİ kullanılarak tek bir parçaya basılabilmektedir.

- İşaretler: Parti takibini tutmak ve malzeme, üretim zamanı vb. belirten işaretlerin bulunması genellikle gereklidir. Tanımlayıcı özellikler eklemek basit bir süreçtir ve hatta üçüncü taraflardan gelen pratik olmayan formatlarda gelen CAD modellerine bile kolayca eklenir.
- Boşluklu yapıların kolayca üretilmesi: Eİ ile, parçanın ek maliyet olmadan boş bölgelere veya deliklere sahip olması mümkündür. Eğer parçanın kalın duvarları varsa, işlevselliği etkilemeden içi boş özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilir. Daha az yoğun iç yapılar, parçaya destek sağlarken daha az malzeme kullanılmasını ve baskı süresinin azalmasını sağlar. Ekleme imalatının bu esnekliği, yalnızca içi boş yapılar ve deliklerin kolayca üretilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda topoloji optimizasyonu için de ideal bir zemin hazırlar. Bu sayede, parçaların malzeme kullanımını en aza indirirken, mekanik dayanıklılığını ve işlevselliğini en üst düzeye çıkaran daha verimli tasarımlar elde edilebilir.

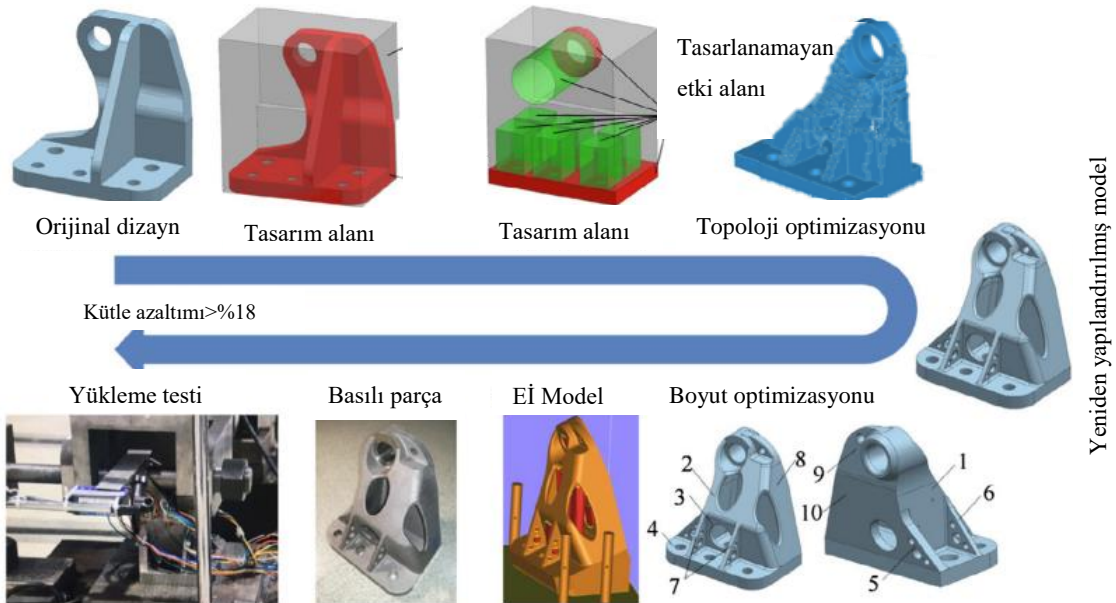
2.3.7. Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu (TO), belirli bir tasarım alanı içindeki boşlukların bağlantısını, şeklini ve konumunu belirleme sürecidir. Bu, yapısal elemanların kalınlıkları, kesit alanları (boyutlandırma) ve önceden tanımlanmış yapısal konfigürasyonların geometrik özellikleri (şekil) gibi değişkenlerle ilgilenen boyut ve şekil optimizasyonundan daha fazla tasarım özgürlüğü sağlar. Bu nedenle TO tasarım değişikliklerinin nihai yapının performansını önemli ölçüde etkilediği erken kavramsal ve ön tasarım aşamalarında büyük etkilere sahiptir. Şekil 2.12’de TO temel prensibi gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Topoloji optimizasyonunun temel prensibi [61]

Uygulama, TO'nu malzemenin uygulanabileceği tüm alanları (tasarım alanı), malzemenin olması gereken tüm alanları (örneğin, deliklerin etrafındaki alanlar) ve tüm yük taşıyan yüzeyleri belirten bir CAD modeli oluşturularak başlar. Bu CAD modeli daha sonra TO yazılımına aktarılır, burada destekler ve yükler uygulanır. Yazılım, uygulanan yükleri sonlu elemanlar analizi yapmak için kullanılır. Daha sonra, seçilen amaç fonksiyonuyla TO çalıştırılır. Yazılım daha sonra tasarım alanını değiştirerek optimize edilmiş bir parça yapısı oluşturur. Bu optimize edilmiş yapı, istenen CAD programına olduğu gibi aktarılabilir veya doğrudan da üretilebilir veya üretilen özellikler yazılım içinde değiştirilerek daha sonra CAD yazılımına aktarılabilir. TO uygulamasına örnek olarak Şekil 2.13'de jet motoru braketi için gerçekleştirilen bir süreç gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Jet motoru braketi örneğinin TO süreci [62]

Günümüzde birçok farklı TO yazılımı bulunmaktadır ve çeşitli CAD yazılımı şirketleri, yazılımlarına yerleşik TO fonksiyonlarını eklemeye başlamıştır.

Karmaşık şekiller üretme yeteneğine sahip olmasına rağmen, Eİ'nin kendi kısıtlamaları vardır. Belirli konsol özelliklerini veya kapalı boşlukları üretmek imkansızdır. Bu yeni imalat kısıtlamaları, TO' na uygulanacak şekilde araştırılmış ve TO ile üretilen imal edilebilir şekilleri sağlamak için kısıtlamalar olarak uygulanmıştır.

Parça optimize edildikten sonra, bir baskı süreci simülasyon yazılımı, parçanın “stl” dosyasını kullanarak baskı sürecini simüle etmek için kullanılabilir. Baskı süreci simülasyonu, parça için en uygun yönelimi bulmaya, destek yapılarını oluşturup optimize etmeye, üretim hatalarını tahmin etmeye ve nihai ürünlerdeki bozulmaları ve gerilmeleri tahmin etmeye yardımcı olur. Bu konu hakkında daha detaylı bilgi bölüm 2.3.8'de verilmektedir.

ANSYS Kullanarak Topoloji Optimizasyonu

TO'nun amacı, belirli kısıtlamalar (örneğin, hacim azalması) altında, nesnel bir kriterin (örneğin, küresel sertlik, doğal frekans vb.) maksimum veya minimum değere ulaşmasını sağlayacak şekilde bir gövde için malzemenin en iyi kullanımını bulmaktır. Aynı zamanda bu süreç, yapının uyumunun en aza indirilmesi olarak da ifade edilebilir. Uyum, uygulanan yükün yapı üzerinde yaptığı iş olarak tanımlanır. Daha az uyum, yapıya etki eden yükün daha az iş yapması anlamına gelir; bu da yapıda daha az enerji depolanmasına ve dolayısıyla yapının daha sert olmasına yol açar [63]. Matematiksel olarak:

$$Uyum = \int_V fu \, dV + \int_S tu \, DS + \sum_i^n F_i u_i \quad 2.1$$

Burada,

u = Yer değiştirme alanı

f = Dağıtılmış gövde kuvveti (yerçekimi yükü vb.)

F_i = i 'inci düğümdeki nokta yükü

u_i = i 'inci yer değiştirme serbestlik derecesi

t = Çekiş kuvveti

S = Sürekliliğin yüzey alanı

V = Sürekliliğin hacmi

ANSYS, TO'da sürekli olan ve ayrık olmayan tasarım değişkenlerini kullanan gradyan tabanlı yöntemleri kullanır. Bu tür yöntemler, gerçek malzeme ve boşluk topolojilerinin evrimini sağlamak için bir cezalandırma şeması gerektirir. En yaygın cezalandırma şeması olan Katı İzotropik Malzeme ile Cezalandırma (SIMP) yöntemidir. Bu yöntem, gradyan tabanlı yöntemlerde 0-1 topolojisinin evriminin temelini oluşturan bir cezalandırma şeması veya güç yasasıdır. SIMP yönteminde, ANSYS'te ağ oluşturma sonucu oluşan her sonlu eleman, malzemenin sertlik özelliklerini değiştiren x_j $0 < x_j < 1$ arasında bir sahte yoğunluk özelliği ile donatılır [63].

$$x_j = \frac{\rho_j}{\rho_o} \quad 2.2$$

Burada,

ρ_j = j'inci elemanın yoğunluğu

ρ_o = Temel malzemenin yoğunluğu

x_j = j'inci elemanın sözde yoğunluğu

Her sonlu elemanın sahte yoğunluğu, TO probleminin tasarım değişkeni olarak kullanılır. j'inci elemanın sahte yoğunluğu K_j , x_j sahte yoğunluğuna bağlıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$K_j = x_j^p K_o \quad 2.3$$

Burada,

K_o = Temel malzemenin sertliği

p = Cezalandırma gücü

Denklem 2.3'ten açıkça görüldüğü gibi,

$x_j = 0$ için,

$K_o = 0$ yani madde yok demektir.

$x_j = 1$ için,

$K_j = 1$, malzemenin var olduğu anlamına gelir.

SIMP yönteminde, p değeri 1'den büyük alınır. Bu, ara yoğunlukların istenmeyen hale gelmesini sağlar; çünkü bu durumda elde edilen sertlik, malzeme hacmine göre küçüktür. Başka bir deyişle, p değerinin 1'den büyük olması, optimal tasarımda ara yoğunlukların

ekonomik olmamasına yol açar. Hacim kısıtlamasının aktif olduğu problemler için, deneyimler p yeterince büyük seçildiğinde optimizasyonun gerçekten de böyle tasarımlarla sonuçlandığını göstermektedir (tam 0-1 tasarımlar elde etmek için genellikle $p > 1$ gereklidir).

ANSYS'te, TO probleminin standart formülasyonu, yapısal sertliğin en aza indirilmesi ve temel frekansın maksimize edilmesi ile yapının hacmine bir kısıtlama getirilmesi olarak tanımlanır. Diğer bir problem ise, dinamik yüke maruz kalan yapının doğal frekansının maksimize edilmesi ve yine yapının hacmine bir kısıtlama getirilmesidir. TO'da minimize edilmesi gereken amaç fonksiyonu genellikle yapının uyumudur. Yapıya uygulanabilir hacim üzerinde bir kısıtlama getirilir. Hacim azaldıkça, yapının sertliği de azalır. Bu nedenle, hacim kısıtlaması zıt bir doğaya sahiptir. Ayrıklaştırılmış bir sonlu elemanın uyumu şu şekilde ifade edilir [63]:

$$c(x) = F^T u \quad 2.4$$

Kuvvet vektörü (x_j tasarım değişkenlerinin bir fonksiyonudur) şu şekilde verilir:

$$K(x)u = F \quad 2.5$$

Bu nedenle $c(x)$ şu şekilde yazılabilir:

$$c(x) = u^T K u = \sum_{j=1}^n u_j^T K_j(x_j) u_j \quad 2.6$$

Böylece aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\sum_{j=1}^n x_j v_j \leq V_0 \quad 2.7$$

$$0 < x_{\min} \leq x_j \leq 1 \quad j = 1, 2, 3 \dots \dots \dots n$$

Tasarım değişkenlerine, sertlik matrisinde tekillikten kaçınmak için bir alt sınır uygulanmaktadır. Çalışmada kullanılan TO'da bu yöntem kullanılmıştır.

Ağ Örgüsü Kalitesi Önemi

TO'da ağ örgüsü kalitesi, doğruluk, hassasiyet, verimlilik ve stabilite açısından kritik bir öneme sahiptir. Yüksek kaliteli bir ağ, yapıdaki gerilim, deformasyon ve diğer fiziksel özelliklerin doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar ve böylece daha doğru ve hassas analizler yapılmasına olanak tanır. Bu durum, özellikle karmaşık geometrilerin ve yerel gerilim yoğunluklarının doğru temsil edilmesi açısından önemlidir. Ayrıca, yüksek kaliteli ağlar, optimizasyon algoritmalarının yapısal bileşenlerin performansını daha iyi değerlendirmesine yardımcı olur ve sürecin daha verimli ve hızlı olmasını sağlar. İyi bir

ağ, optimizasyon sürecinin kararlılığını ve konverjansını artırır ve düşük kaliteli ağların neden olabileceği sayısal stabilite sorunlarını önler. Bunun yanı sıra, yüksek kaliteli ağlar, malzeme dağılımının daha etkin bir şekilde optimize edilmesini sağlayarak gereksiz malzeme kullanımını azaltır ve ekonomik tasarımlar elde edilmesine katkıda bulunur. TO'da ağ örgüsü kalitesi, analizlerin doğruluğunu, optimizasyon sürecinin etkinliğini ve nihai tasarımın ekonomik verimliliğini doğrudan etkileyen temel bir faktördür. Geometri ve ağ örgüsü hazırlığı çalışmaları, ağ örgüsü kalitesi nedeniyle kendi içinde yinelemeli süreçlerdir. Bu çalışmada takip edilen ağ kalitesi değerleri eğrilik, boyut oranı ve ortogonal kalitedir. Eğrilik, temel olarak dörtyüzlü ağ örgüsündeki açıların orantısına göre ağ hücrelerinin sapmasından hesaplanır ve 0 ile 1 arasında bir değer alır. Sapma oranı 1 olduğunda en kötü, 0 olduğunda ise en iyidir. Eğrilik, Eşitlik 2.8 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Eğrilik = \left[\left(\frac{Q_{max} - Q_e}{180} \right), \left(\frac{Q_e - Q_{min}}{Q_e} \right) \right] \quad 2.8$$

Q_{max} , Q_{min} , Q_e sırasıyla maksimum, minimum ve ideal eş açılı açığı ifade eder. Dikdörtgen hücreler için Q_e 90° , üçgen hücreler için ise Q_e 60° 'dir. Boyut oranı, 2D'de hücrenin yüksekliğinin uzunluğuna oranı olarak tanımlanır. Ortogonal kalite ise, kenarları paylaşan hücrelerin paylaştıkları açıların oranıdır. Bu değeri 0 ile 1 arasında olup, 1 en iyi durumu ifade eder.

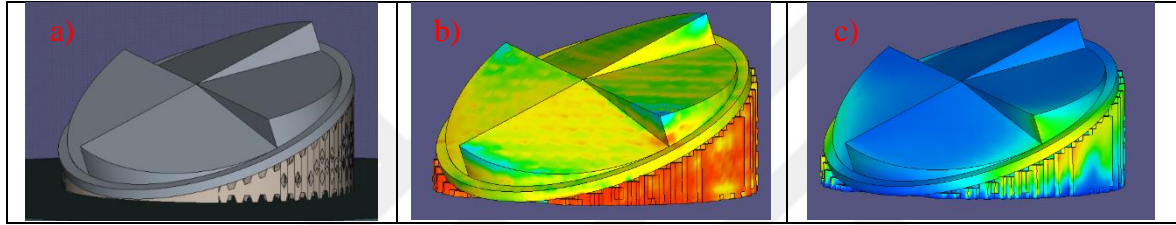
2.3.8. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Analizi

SLM süreci sırasında yüksek ısı gradyanları ve hızlı soğuma oranları nedeniyle parçalar üzerinde kalıntı gerilmeler ve çarpılmalar meydana gelebilir. Bu gerilmeler ve çarpılmalar, üretilen parçanın boyutsal doğruluğunu ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Dolayısıyla, SLM ile üretim öncesinde kalıntı gerilme ve çarpılma analizlerinin yapılması hem üretim sürecinin optimizasyonu hem de nihai ürün kalitesinin artırılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu analizler, üretim parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesini ve potansiyel sorunların önceden tespit edilerek minimize edilmesini sağlar. Bu bağlamda, kalıntı gerilmeler ve çarpılmaların mekanizmalarının anlaşılması ve uygun analiz yöntemlerinin kullanılması, SLM sürecinin başarısı için kritik bir rol oynamaktadır.

Simufact Additive analiz programı, sürecin ilk seferinde doğru sonucu elde etmek için bir süreç çözümüdür. Parçadaki çarpıklıkları ve kalıntı gerilmeleri doğru bir şekilde tahmin etmek için sonlu eleman yöntemini kullanır. Sonlu eleman analizi çalışmalarında en önemli kısım, kullanılan eleman boyutunun ve dolayısıyla eleman sayısının analiz için yeterli olup olmadığıdır. Eğer eleman ağ yapısı yeterince iyiye, tüm diğer model girişlerinin doğru olduğunu varsayarak analiz sonuçlarının kabul edilebilir olduğunu söylenebilir. Baskı ve üretim sürecindeki parçaların bozulması, ek üretim sürecinin tüm faydalarını görmeyen kuruluşlar için önemli bir engel oluşturur. Deneme yanılma yöntemiyle çok fazla verimsiz zaman ve para harcanır. Simufact Additive, bir parçayı makineye göndermeden önce baskı, ısıl işlem, kesme ve HIP süreci boyunca meydana gelen hasarı öngörme ve çözme çözümüne yönelik bir çözümdür. Simufact Additive ile Seçici Lazer Eritme (SLM), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), LaserCUSING (Concept Laser) ve Elektron Işın Eritme (EBM) gibi üretim yöntemleri analiz edilebilir [64]. Birleştirilmiş üretim simülasyonları ile Analiz sonunda parçadaki çarpıklıklar ve kalıntı gerilmeler hesaplanabilir. Kalıntı gerilmeler, en uygun parça yönelimi ve optimize edilmiş destek elemanları ile azaltılabilir [65-69].

Simufact Additive programında simülasyonun ön işleme sürecini tamamlamak için, voxel adı verilen bir elemanın boyutunu belirlemek gereklidir. Voxel, üç boyutlu bir alanda düzenli bir ağ üzerindeki bir değeri temsil eder ve bu ağın hacimsel yapısını ifade eder. Başka bir deyişle, bir voxel, belirli bir hacim birimindeki veriyi temsil eden küçük bir küptür. Metal tozunun katmanlarının sayısını temsil eden voxel boyutu, simülasyonun doğruluğu ve hesaplama süresi açısından kritik öneme sahiptir. Voxel ağının temel amacı, simülasyon sürecinde meydana gelecek deformasyonları ve partiküllerin hacimsel ayrışmasını analiz etmektir. Bu analiz, üretim sürecindeki potansiyel hataları öngörmeye ve önlemeye yardımcı olur. Genel olarak, daha küçük eleman boyutları kullanmak daha doğru ve ayrıntılı çözümler elde edilmesini sağlar. Bu, yazılımın parçanın iç yapısını ve hacimsel doluluk oranını daha net bir şekilde göstermesine olanak tanır, böylece simülasyonun kalitesini artırır ve üretim sürecinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. Şekil 2.14'a parçanın temel geometrisini sunmaktadır. Bu şekil, parçanın genel yapısını ve dış hatlarını detaylandırır. Şekil 2.14'b parçanın etkin gerilim dağılımını göstermektedir. Etkin gerilim dağılımı, parçanın içindeki gerilme ve deformasyonların dağılımını ortaya koyar. Bu görüntüde, parçanın yüzey ve iç bölgelerinde meydana gelen gerilmeler renk skalası ile belirtilmiştir. Yüksek gerilim bölgeleri, parçanın üretim sırasında veya kullanım esnasında

potansiyel kırılma veya deformasyon riski taşıyan alanları işaret eder. Şekil 2.14’c ise parçanın bozulma dağılımını göstermektedir. Çarpılma dağılımı, üretim sürecinde ve sonrasında parçanın geometrisinin ne kadar değiştiğini ve bu değişikliklerin nerelerde yoğunlaştığını gösterir. Bu bilgi, parçanın tasarım doğrulaması, üretim sürecinin optimize edilmesi ve nihai performansın değerlendirilmesi açısından kritiktir. Özellikle, yüksek bozulma bölgeleri, üretim sürecinde dikkat edilmesi ve mümkünse minimize edilmesi gereken alanlardır. Renk skalası, bozulmaların şiddetini ve yerlerini görselleştirir. Bu bilgi, parçanın nihai performansını değerlendirmek ve üretim sürecini optimize etmek için kritiktir. Bu simülasyon sonuçları, parçanın tasarım doğrulaması ve üretim sürecinin iyileştirilmesi açısından önemli verilere ışık tutar.



Şekil 2.14 a) Parça örneği b) parçanın eşdeğer gerilme renklendirmesi c) parçanın çarpılma renklendirmesi

2.3.9. Eklemeli İmalat Kısıtlamaları

Eİ birçok faydasına rağmen, kullanımını etkileyen çeşitli kısıtlamalar bulunmaktadır. Bu kısıtlamalardan bazıları teknolojinin kaçınılmaz gelişimiyle çözülebilirken, bazıları o kadar temeldir ki mevcut teknolojilerle tamamen üstesinden gelinmesi mümkün değildir.

Eİ ile üretilen parçaların mikro-ölçekli kontrol özellikleriyle ilgili bazı sorunlar vardır. Bu sorunlar, istenmeyen gözeneklilik ve anizotropi nedeniyle mekanik özellikleri etkiler. Ayrıca, imalatla ilgili kısıtlamalar tasarım aşamasında dikkate alınmazsa baskının başarısız olmasına yol açabilir [70].

3D yazdırılan parçaların benzersiz yapısal özellikleri nedeniyle, geleneksel kalite kontrol yöntemleri yeterli değildir, çünkü Eİ bileşenleri geleneksel olarak imal edilen bileşenlerden farklı şekillerde kırılma eğiliminde olabilir. Ayrıca, havacılık ve tıbbi gibi belirli endüstrilerde, kullanılan tüm bileşenler için sıkı sertifikalar gerektirir ancak kalite testi zorlukları nedeniyle 3D yazdırılan parçalar için sertifikalar almak zordur.

Eİ parçalarının imalat süresi, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilenlerden çok daha uzun olabilir. Bu süre, daha karmaşık parçalarla artabilir, çünkü beklenmedik çarpılma ve/veya destek yapı başarısızlıkları olabilir, bu da tasarım optimizasyonunun birden fazla yapılmasını gerektirebilir.

Eİ'nin başlangıç dönemlerinde, Eİ genellikle prototipleme için kullanıldığından, orijinal dijital model ile bitmiş model arasındaki boyutsal doğruluk o kadar önemli değildi. Ancak, Eİ'nin son ürünler için artan kullanımıyla, Eİ için standart toleranslara artan bir ihtiyaç vardır. Bu nedenle, genellikle Eİ ile üretilen parçalar daha sonra ikincil bir işlemeyle istenilen boyutsal toleranslara getirilirler [38].

Eİ teknolojisiyle işlenen bir parçada genellikle kalıntı gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler, yüksek sıcaklık gradyanları, ısıl genişleme ve soğutma döngüsü sırasında oluşan homojen olmayan plastik deformasyonlar nedeniyle meydana gelir.

Aslında, metallerdeki kalıntı gerilmeler, kimyasal, termal ve mekanik üretim yöntemlerinden kaynaklanan homojen olmayan plastik deformasyonlardan kaynaklanır. Eİ teknolojilerindeki kalıntı gerilmelerin gelişme mekanizmaları, malzeme dayanımının lazer ışınının tarama katmanı boyunca aniden azalması ve ergimiş üst katmanların soğuma aşamasına bağlı olarak meydana gelir [71, 72]. Dolayısıyla, etkilenen bölgeyi çevreleyen homojen olmayan termal genişleme ve büzülmesi indükleyen sıcaklık gradyanları ek gerilmelere neden olurken, ikinci mekanizma, altta yatan malzemenin termal büzülmesinden dolayı daraltma eğiliminde olmasıdır. Kalıntı gerilmeleri ölçmek için yaygın yöntemlerin bir incelemesi Huang ve ark. [73] tarafından özetlenirken, SLM işlemi için kalıntı gerilmeleri tahmin etmek için sayısal teknikler tartışılmıştır [73-77].

Diğer yandan, SLM tarafından üretilen parçaların mekanik performansını etkileyen istenmeyen kalıntı gerilme etkilerini azaltmak için bilyalı sertleştirme, taşlama, ısıl işlem, yaşlandırma sertleştirme veya cilalama gibi son işlemler kullanılmaktadır [78]. Bunlar, malzeme dövülebilirliğini artırır, çatlak başlatma için kırılma dayanımı eşiğini artırır ve yorgunluk performansını etkileyen yüzey pürüzlülüğünü azaltır [79].

2.3.10. Hibrit Üretim

Hibrit üretim yöntemi, geleneksel üretim teknikleri ile eklemeli üretim yöntemlerinin birleşiminden oluşan yenilikçi bir üretim sürecidir. Bu yöntem, her iki üretim tekniğinin

avantajlarını bir araya getirerek, karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Hibrit üretim, özellikle havacılık, otomotiv ve medikal gibi sektörlerde önemli uygulamalara sahiptir ve bu alanlarda verimlilik, maliyet etkinliği ve ürün kalitesini artırmayı hedeflemektedir.

Literatürde, SLM işlemiyle imal edilen parçalarda deliklerin başarılı bir şekilde üretilebildiği birçok çalışma bulunmaktadır [47]. SLM yöntemi, toz metal malzemelerin lazer ışını ile ergitilerek katman katman birleştirilmesi prensibine dayanır. Bu yöntem, karmaşık geometrilerin ve ince detayların üretiminde oldukça etkilidir. Ancak, SLM işlemi sırasında destek malzemelerinin kullanılması gerekmekte olup, bu malzemelere erişim ve sonrasında çıkarma işlemi oldukça zor olabilmektedir. Destek malzemelerinin çıkarılması sürecinde parçanın yüzeyinde çapak kalması, ek temizleme işlemlerini zorunlu kılmaktadır. Bu tür olumsuzluklar, üretim sürecinin karmaşıklığını ve maliyetini artırmaktadır.

SLM yöntemiyle üretilen parçaların, bazı durumlarda iç yapılarında ve zor erişilen bölgelerinde destek malzemesi kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. Destek malzemeleri, parçanın stabilitesini sağlamakta ve istenilen geometrik özelliklerin elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Ancak, destek malzemelerinin çıkarılması süreci genellikle zahmetli olup, parça yüzeyinde istenmeyen pürüzler ve çapakların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durum, üretilen parçanın kalitesini ve estetik görünümünü olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, destek malzemelerinin çıkarılması için kullanılan yöntemler, parça yüzeyine zarar verebilir ve ek işleme gereksinimini artırabilir.

Hibrit üretim yöntemi, bu tür olumsuzlukların üstesinden gelmek için etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu yöntemde, SLM işlemi sonrasında delik delme ve yüzey temizleme gibi ikincil işlemler entegre edilmektedir. Deliklerin ve yüzeylerin istenilen doğrulukta ve kalitede olmasını sağlamak amacıyla, ikincil işlemler büyük bir öneme sahiptir. Özellikle cıvata deliklerinin sınır yüzeylerine dik olması, taşıyıcı yapılar için kritik bir gereksinimdir. SLM yöntemi ile elde edilen parçaların yüzey kalitesi ve geometrik doğruluğu, yalnızca bu yöntemle sağlanamayabilir. Bu nedenle, ikincil işleme süreçleri ile deliklerin ve yüzeylerin hassasiyeti artırılmaktadır.

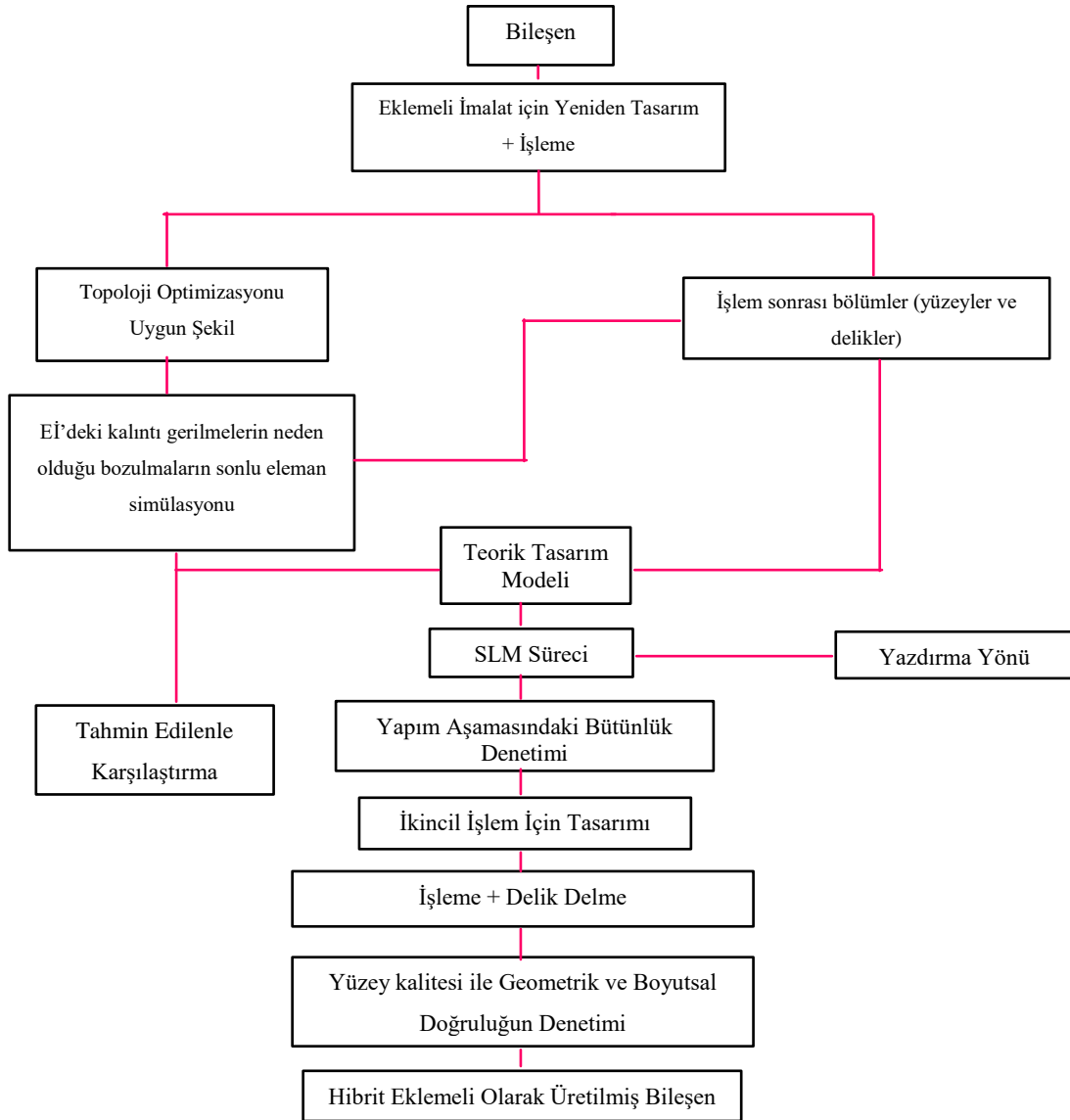
Eİ yöntemlerinde, ikincil işleme süreçlerinin entegrasyonu, parçaların nihai performansını ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırmaktadır. Delik delme işlemi, SLM yöntemiyle üretilen parçaların belirli bölgelerinde yüksek hassasiyet gerektiren bir işlem olarak öne çıkmaktadır. Bu işlem, parçanın mekanik özelliklerini ve montaj uyumluluğunu doğrudan

etkileyebilir. Yüzey temizleme işlemi ise, parça yüzeyindeki istenmeyen pürüzlerin ve çapakların giderilmesi için kritik bir adımdır. Yüzey temizleme işlemi sayesinde, parçanın estetik görünümü ve işlevselliği artırılmaktadır.

Sonuç olarak, hibrit üretim yöntemi, SLM işleminin avantajlarını ve ikincil işleme süreçlerinin sağladığı hassasiyeti birleştirerek, kompleks geometrilere sahip parçaların üretiminde verimliliği ve kaliteyi artırmaktadır. Bu yöntem, özellikle ulaşılması zor bölgelerde ve kritik yüzey özelliklerine sahip deliklerin üretiminde etkili bir çözüm sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, hibrit üretim yönteminin mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu yöntem sayesinde, daha yüksek kaliteli, dayanıklı ve karmaşık yapılar üretmek mümkün hale gelmektedir. Hibrit üretim yöntemi, endüstriyel üretimde verimliliği artırmakta ve yeni nesil ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Maleki ve ark. [80], Eİ ile üretilen parçalar için yüzey sonrası işleme yöntemlerini incelemiştir. Bazı işlemler sonrasında çekme kalıntı gerilmeleri ve geometrik görünümde aşırı değişiklik gibi çelişkili etkileri tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, eksiltmeli imalat yöntemlerinin pürüzlülük azaltımında daha etkili olduğu ve yüzeyde bulunan gözeneklerin kaldırılabilirdiği gösterilmiştir. Pakkanen ve ark. [81], AlSi10Mg iç kanallarının yüzey pürüzlülüğünün eklemeli imalatta üretim açısına bağlı olarak değiştiğini bildirdiler. Ancak bu tür kusurları azaltmak için farklı yönelimler önerilmiş olsa da istenilen hassasiyete ulaşılmasının zor olduğu belirtilmiştir. Bu ihtiyaçlar da hibrit eklemeli imalat ihtiyacını beraberinde getirmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında bir robot kol tutucunun Eİ ile üretilmesi için çeşitli yaklaşımlar oluşturulmuş olup bu çalışmada önerilen yaklaşımı özetleyen iş akışı Şekil 3.1'de özetlenmiştir. Burada, hibrit yaklaşımda hem Eİ hem de yüzey parlatma ve delik delme gibi gereksinimlere sonraki bölümlerde gösterileceği gibi, bileşen tasarımı aşamasından itibaren dikkat etmek önemlidir.

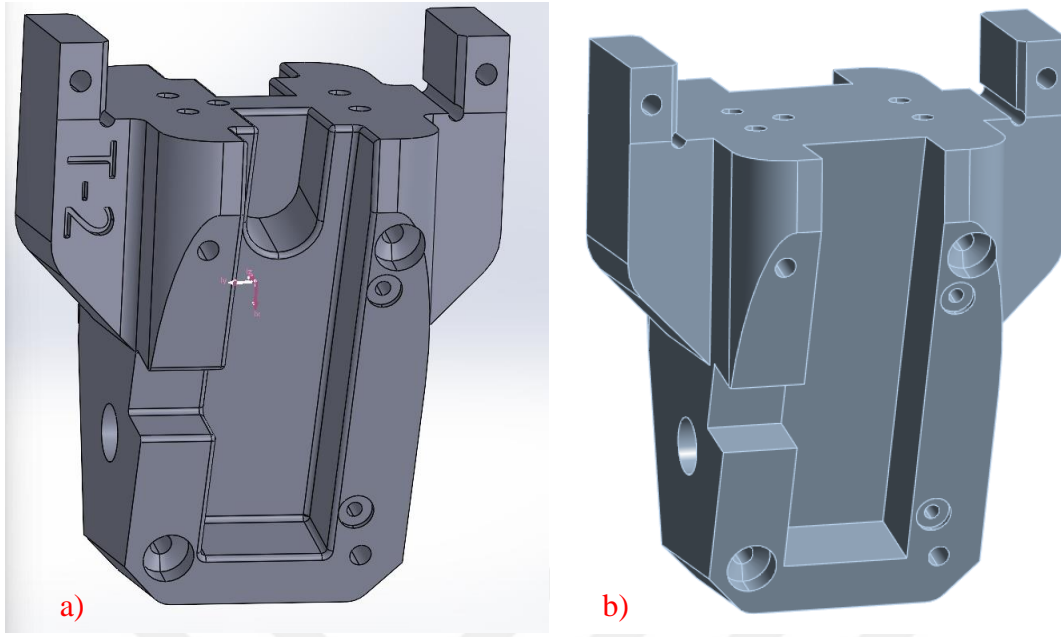


Şekil 3.1 Üretilmesi planlanan robot kol parmak tutucularının hibrit üretim yaklaşımı

Bu çalışmada, TEZMAKSAN'ın robot teknolojisinde kullanmakta olduğu parmak tutucularından biri olan CRX-003 modeli, önerilen hibrit yaklaşımla üretilmek üzere seçilmiştir. Başlangıç modeli, geleneksel imalat ile üretilen alüminyum 6000 serisinden yapılan parmak tutuculara dayanmaktaydı. Eİ, karmaşık geometrilerin oluşturulmasını mümkün kıldığından, uygun bir tasarım oluşturmak için önerilen yaklaşıma AlSi10Mg alaşımı seçilerek bir topoloji optimizasyon (TO) analizi entegre edildi. TO'nu gerçekleştirmek için Ansys yazılımı kullanıldı. Eİ için geometrik olarak uygun özellikleri şekillendirmek için (bazı pah ve delik unsurlarının kaldırılması, vb.) Solidworks ticari yazılımı ile nihai tasarım oluşturulmuştur. Destek yapılarının ve oryantasyonun belirlenmesi amacıyla Material Magics programı kullanılmıştır. Tasarlanan yapının üretilebilirliği ise ticari bir yazılım olan Simufact Additive programı ile denetlenmiştir. SLM ile üretim öncesi parçanın Eİ'ya uygun üretilebilir bir şekilde olabilmesi için SpaceClaim programı ile parça düzenlenmiştir. SLM yöntemiyle bu parçanın üretimi yapılmış ve son bileşenin üzerinde oluşabilecek gerilme kuvvetlerinin giderilmesi için ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen parça alttaştan ayrıldıktan ve destek parçaları söküldükten sonra ise ikincil işlemler ile montaj deliklerinin ve gerekli yüzeylerin temizleme işlemi yapılmıştır.

3.1. CAD Tasarımı

Tüm Eİ parçaları, dış geometriyi tam olarak tanımlayan bir yazılım modelinden başlamalıdır. Bu, neredeyse her profesyonel CAD katı modelleme yazılımını içerebilir, ancak çıkış, 3D katı veya yüzey temsilini oluşturmalıdır. Ters mühendislik ekipmanları (örneğin, lazer ve optik tarama), bu temsili oluşturmak için de kullanılabilir. Bu çalışma için ise Solidworks programı kullanılarak parça Eİ için uygun bir tasarıma güncellenmiştir. Şekil 3.2'de geleneksel üretim yöntemleri ile üretilen parçanın üzerinde bulunan eğimler vb. gibi yapılar hem TO için hem de eklemeli imalat için işlemleri zorlaştıracığından parça daha daha sade bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

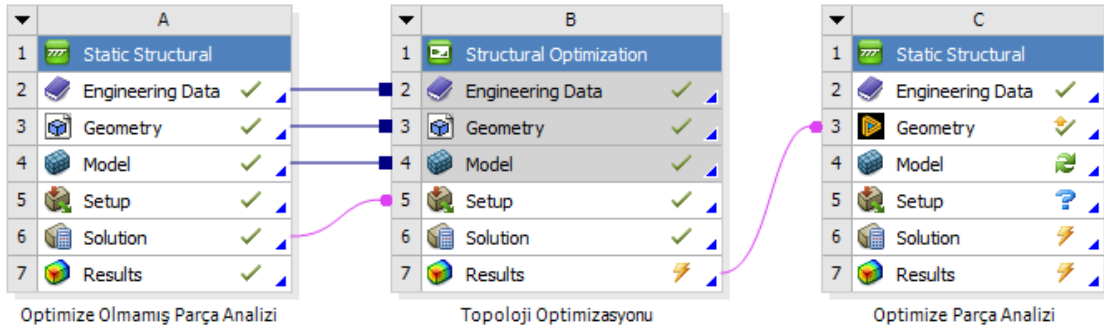


Şekil 3.2 a) Robot kol parmak tutucusu b) robot kol parmak tutucusunun bazı unsurlarının kaldırılıp elde edilmesi

3.2. Ansys Topoloji Optimizasyonu

Bu çalışmada, robot kol parmak tutucusu bileşenin en iyi şekilde tasarlanabilmesi amacıyla Ansys programı ile birlikte TO yöntemi kullanılmıştır. TO, bir yapının belirli sınır koşulları ve yüklemeler altında en iyi malzeme dağılımını belirlemeyi amaçlayan bir tasarım yöntemidir. Bu sayede, daha hafif ve dayanıklı yapılar elde edilmesi mümkün olmaktadır. Halihazırda CRX-003 model robot kol parmak tutucusuna takılacak parmakların bir adetinin kütlesi 810 g olup bu parmakların açılma kuvveti parmak broşüründe belirtildiği gibi 725 N ve kapanma kuvveti 660 N'dur. Ayrıca parmak tutucusunun da kendi kütlesi 570 g'dır. Bu etkenler göz önüne alınarak ve parçanın toplam yer çekimi kuvveti de hesaplanarak robot kol parmak tutucusu için optimizasyon yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışma adımları şu şekildedir:

Analiz Kurulumu: İlk olarak, optimizasyon yapılacak yapısal bileşenin geometrisi ANSYS ortamına transferi gerçekleştirilir. Bu adımda, bileşenin boyutları, şekli ve genel özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, topoloji optimizasyonu SIMP metodu ile ele alınmıştır. Orijinal ve optimize edilmiş robot kol parmak tutucuların arasında statik yapısal karşılaştırmalar yapılmıştır. Tüm analizler, Şekil 3.3'de görülen sıraya göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3 ANSYS ile gerçekleştirilen TO çalışmalarında takip edilen analiz akış şeması

Araştırmanın yapıldığı vaka çalışması tutucuları, cıvata ön gerilme yükleri ve ivme yüklerini içermektedir. Bu çalışmanın devamı statik yapısal analize aktarılmış ve bileşen üzerinde çalışan herhangi bir ek yük incelenmemiştir. Statik yapısal analiz, sonraki bölümlerde tartışılan sınır koşulları ve yüklerle tamamlanmıştır. Bu araştırmanın sonuçları kullanılarak topoloji optimizasyonu incelenmiş ve optimizasyon parametreleri sonraki bölümlerde tartışılmıştır. Optimizasyon süreci ile üretilen geometriler, analiz ve üretilebilir parçalara dönüştürülmek üzere değiştirilmiştir. Değiştirilen bileşenlerin doğrulanması için statik yapısal analiz kullanılmıştır.

Malzeme Özellikleri: Kullanılacak malzemenin mekanik özellikleri (elastik modülü, Poisson oranı, yoğunluk vb.) tanımlanmıştır. Bu bilgiler, optimizasyon sürecinde gerekli olan fiziksel parametreleri sağlamaktadır. AlSi10Mg'un oda sıcaklığındaki yoğunluğu 2.7 g/cm^3 , young modülü 76600 MPa, akma dayanımı 170 MPa, poisson oranı 0.33 ve çekme dayanımı 230 MPa.

Ağ Örgüsü: Parametrik analizde, ağ örgüsü kalite değerlerinin parametrelerin değişimi ile kritik bir duruma ulaşmaması gerekmektedir. 2 mm boyutundaki dörtyüzlü ağ örgüsü (tetrahedral) ile model sonlu elemanlarına ayrıldığında Çizelge 3.1'de gösterilen ağ örgüsü kalite parametreleri elde edilmiştir.

Çizelge 3.1 Ağ örgüsü kalitesi parametreleri

Parametre	Değer
Maksimum bozulma	0.99628
Minimum bozulma	0.00085194
Ortalama bozulma	0.24994
Standart sapma	0.13156

Çizelge 3.1'de gösterilen değerler 2 mm ağ durumu için olmasına rağmen, farklı parametreler için eleman sayısının artmasıyla bu değerlerde belirli bir değişme gözlenmemiştir. Bu sebepten dolayı çalışmalara 2 mm ağ durumu için devam edilmiştir. 2 mm elemanlı ağın görüntüleri Şekil 3.4'de görülmektedir.

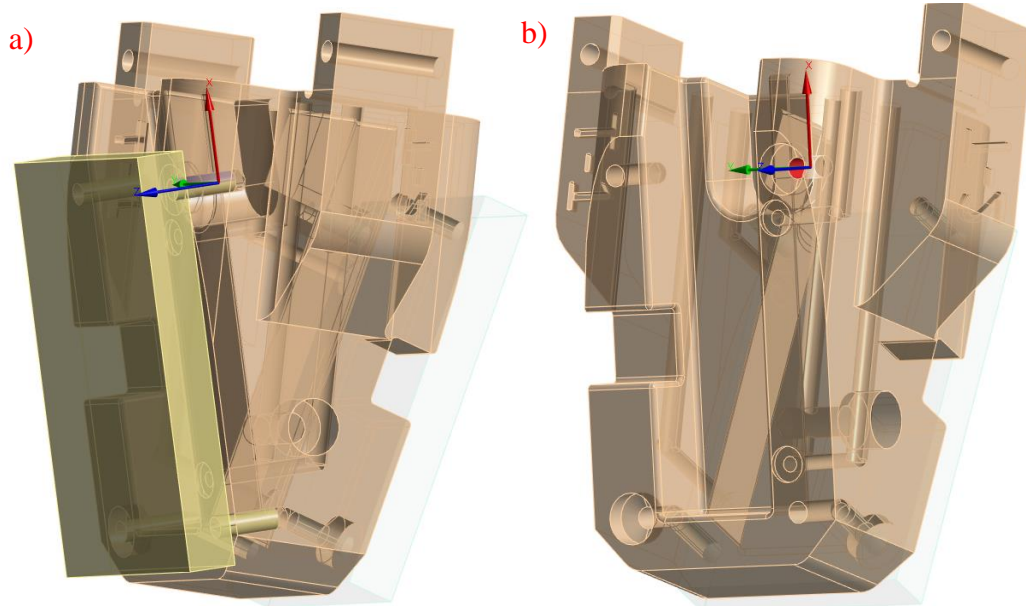


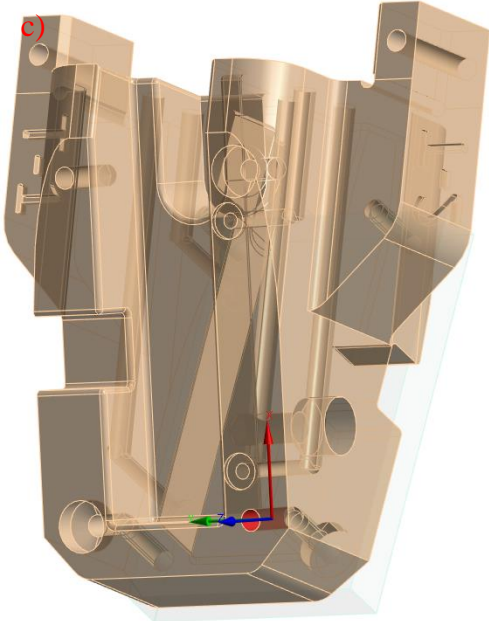
Şekil 3.4 ANSYS 2 mm elemanlı oluşturulmuş ağ görünümü

Eleman bozulma derecesini ifade eden bozukluk (skewness) değeri, idealde 0'a yakın olmalıdır. Analiz sonucunda, minimum bozukluk değeri 0.00085194 gibi oldukça düşük ve ideal değerlere yakındır. Ancak, maksimum bozukluk değeri 0.99628 olup, bazı elemanların ciddi şekilde bozulduğunu göstermektedir. Ortalama bozukluk değeri 0.24994 ve standart sapma 0.13156 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, elemanların çoğunlukla kabul edilebilir bozukluk değerlerine sahip olduğunu, ancak bazı elemanların ciddi bozulmalar içerdiğini göstermektedir. Hedef eleman boyutunu 2 mm olarak belirlenmesinin sebebi, detaylı bir analiz yapmak ve yapının küçük detaylarını da göz önünde bulundurmadır. Bu, özellikle karmaşık geometrilerin ve yerel gerilim

yoğunluklarının doğru temsil edilmesi açısından önemlidir. Ağ örgüsü kalitesinde ağın elemanlarının daha düzgün hale getirilmesi için bir iyileştirme yapılmıştır. Bu değerlendirmeler ışığında, topoloji optimizasyonunun doğruluğunu, etkinliğini artırmak ve ağın kalitesinin iyileştirilmesi için geometrik düzenlemeler yapıldıktan sonra diğer aşamalara geçilmiştir yapılmıştır.

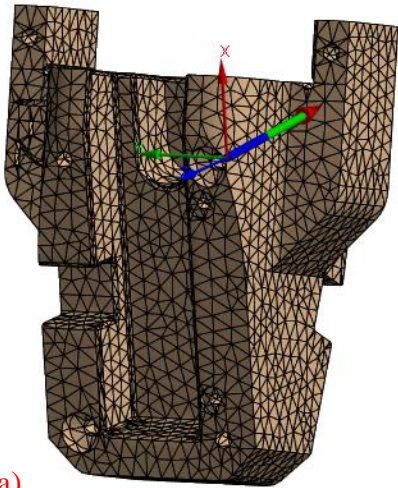
Yükleme ve Sınır Koşulları: Yapısal bileşene uygulanacak olan yükler ve bileşenin sabitlenme (mesnetlenme) koşulları belirlenmiştir. Bu adım, optimizasyon sürecinde bileşenin gerçek çalışma koşullarına uygun şekilde analiz edilmesini sağlar. Robot kol parmak tutucuları, mevcut arayüz konumlarından sabitlenmiştir. Ayrıca, parçalar üzerindeki eklenecek parmak yapıları sabitlenmiş ve bağlantı noktaları tasarıma uygun olarak yük değerleri uygulanmıştır. Bu değerler, bağlantı noktaları tanımlama ile hesaplanmıştır. Bağlantı noktalarındaki yükleri hesaplayabilmek için robot parmaklarının bulunduğu kısımlara Şekil 3.5'te açık yeşil renkle görünen parça ve o parçanın simetrik karşılığı eklenilmiştir. Bu parçalar robot parmaklarının kütlelerine eşdeğer değerde ve 600 N parmak açma ve kapatma değerlerine uygun şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.5'de bağlantı noktaların seçilerek yük bölgelerinin hesaplanmasına ilişkin görsel verilmiştir.





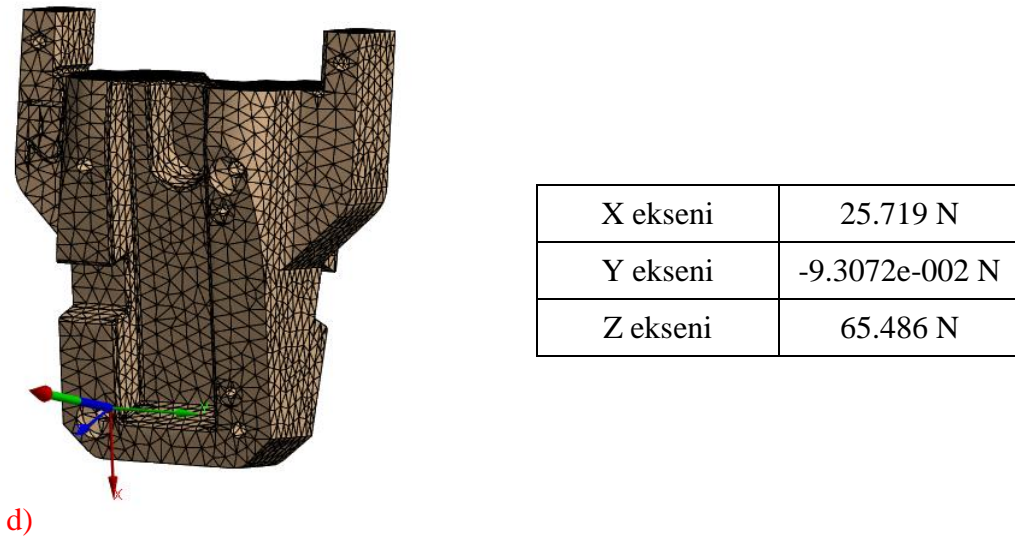
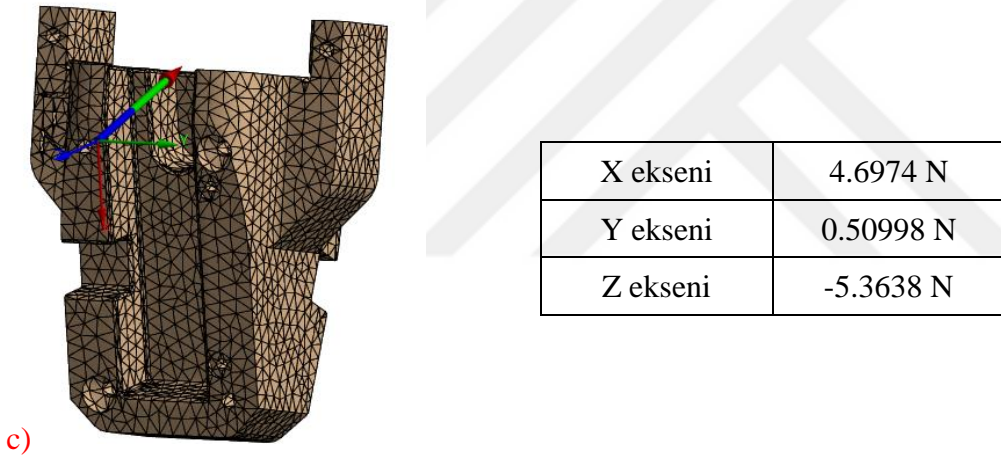
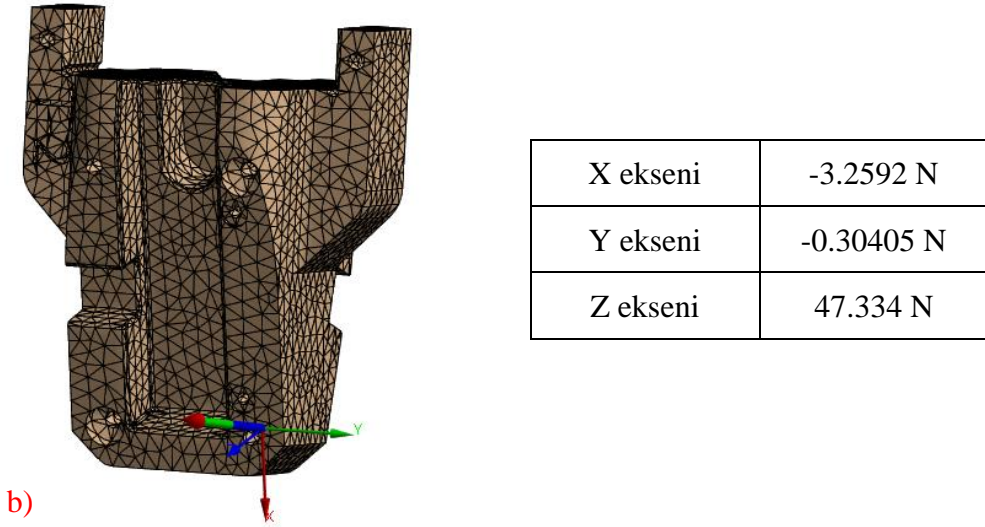
Şekil 3.5 Robot parmak tutucunun sınır koşulları ve yüklerin eklenmesi

Statik analiz çalışmalarında, ilk olarak hayali bir parça eklendikten sonra temel bağlantı noktalarına etkiyen kuvvetler hesaplanmıştır. Bağlantı bölgesi için hesaplanan yükler Şekil 3.6'da verilmiştir. Daha sonrasında ise elde edilen bu kuvvetler ilgili bağlantı noktalarına tanımlanmıştır. Son olarak ise yer çekimi ivmesi eklenerek tasarım sınırları dahilinde statik yapısal analizler çözülmüştür. Bağlantı noktalarında oluşacak yükler program yardımıyla hesaplanmıştır.



a)

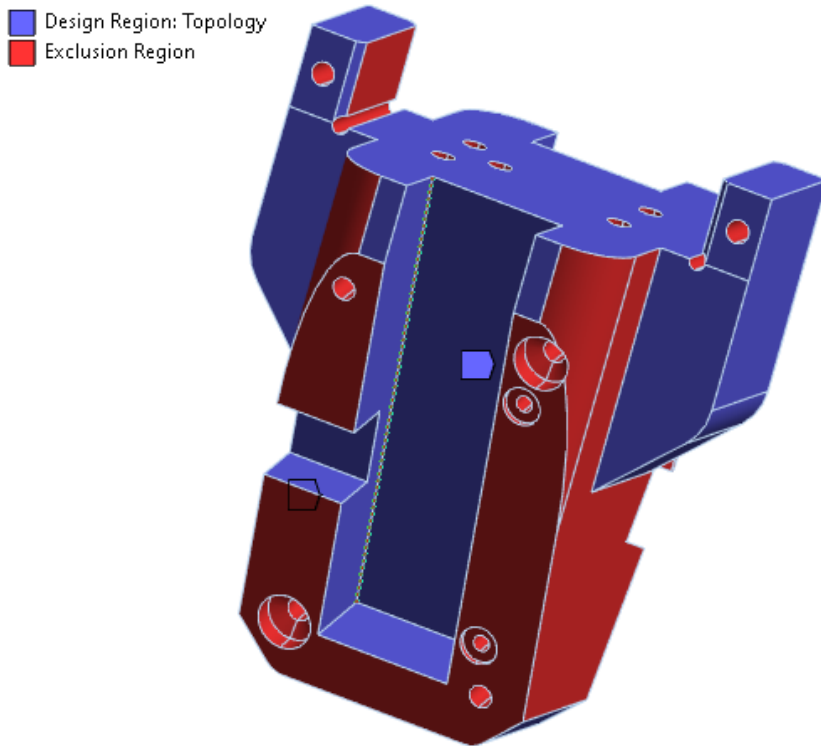
X eksen	1.0016 N
Y eksen	1.0947 N
Z eksen	-7.2833 N



Şekil 3.6 Herbir bağlantı noktalarında oluşan yüklerin hesaplanması

Optimizasyon Parametrelerinin Belirlenmesi: Optimizasyonun hedefleri ve kısıtlamaları tanımlanmıştır. Bu adımda, malzeme hacmi kısıtlamaları, hedeflenen minimum dayanım gibi parametreler belirlenmiştir.

ANSYS'de topoloji optimizasyonunu kullanabilmek için bazı ayarların yapılması ve parametrelerin kullanılması gerekmektedir. Öncelikle, optimize edilecek ve edilmeyecek bölgeler seçilmelidir. Bu tasarımda, cıvatalı bağlantı bölgeleri arayüz konumu olarak seçilmiş ve mevcut tasarımı etkilememesi için optimizasyon dışında bırakılmıştır. Bu şekilde, parçaların bağlantı tasarımı değişiklikten korunmaktadır. Ayrıca parmakların bağlantı noktaları, hortum girişleri ve son olarak parmakların monte edileceği yüzeyler tasarım değişikliklerinden korunmaktadır. Parçanın anlamlı bir bütün şeklinde oluşturulabilmesi içinde bazı yüzey noktaları değişikliklerden korunmuştur. Tasarım ve hariç tutulan bölgeler Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Optimizasyon bölgeleri ve optimizasyondan hariç tutulan bölgeler

Statik yapısal analiz ayarlarında, çözümleyici kontrolleri bölümündeki büyük sapma seçeneği ve analiz veri yönetimi bölümündeki çözümleyici birimlerinin doğru tanımlanması gerekmektedir. Büyük sapma seçeneği, topoloji optimizasyonu büyük deformasyonla çözüm seçimini desteklemediğinden, tüm bağlantılı analizler için kapalı olarak ayarlanmıştır. Çözümleyici birimleri, çözümde yer alan ortamlar arasında birim sistemi uyumsuzluğunu önlemek amacıyla aktif sistem olarak ayarlanmıştır.

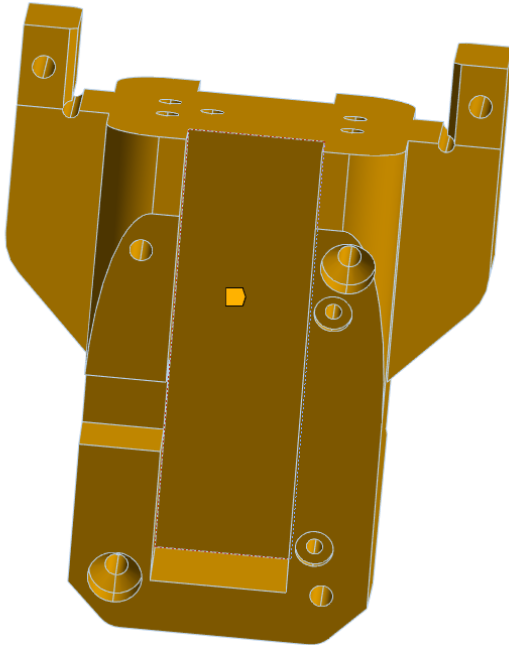
ANSYS topoloji optimizasyonu analiz ayarlarında çözümleyici algoritma için tanımlanabilecek birkaç giriş seçeneği vardır. Maksimum yineleme sayısının varsayılan ayarı 500'dür. Minimum normalize edilmiş yoğunluk 0.001 olarak ayarlanmış ve yakınsama doğruluğu varsayılan olarak %0.1 olarak belirlenmiştir. Çözüm sırasında belirlenen topolojik yoğunluğa dayanarak, ceza faktörü, her elemanın yapı matrisinin sertliğini 0'dan 1'e ölçeklendirmek için kullanılmıştır. Ceza faktörü arttıkça, sertlik matrisi yoğunluğu 1'e yakın olan parçalar lehine daha fazla ağırlıklandırılır, bu da nihai tasarımda hata payını azaltır. Daha az gri bölge, daha iyi ve daha hafif bir tasarım anlamına gelir. Bu tezde ceza faktörü 1 olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.8'de TO amacı gösterilmektedir.

Enabled	Response Type	Goal	Criterion	Formulation	Environment Name	Weight	Multiple Sets	Start Step	End Step	Step	Start Mode	End Mode	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural	N/A	Enabled	1	1	1	N/A	N/A	N/A

Şekil 3.8 Topoloji optimizasyonu amacı

Bu tezde, TO'da standart bir terim olan uyumluluğun minimize edilmesi amaç olarak seçilmiştir. Bu, sertliğin maksimize edilmesinin tersidir. Diğer iki hedef, hacim ve kütleminimize edilmesidir. Bu çalışmada, kütle yanıt kısıtlaması olarak seçilmiştir. Optimizasyon çalışması, optimize edilecek parçalarda minimum korunma değerinin %35 sınır değerine sınırlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da yanıt kısıtlaması konumu gösterilmektedir. Topoloji için optimize edilecek bölgeler, ağırlık azaltma bölgeleri olarak seçilmiştir.

Response Constraint: 35 % Mass



Şekil 3.9 Yanıt kısıtlamasının konumu

Optimizasyonun Gerçekleştirilmesi: Yukarıdaki adımlar tamamlandıktan sonra, Ansys yazılımında TO çalıştırılmıştır. Bu süreçte, yazılım belirlenen kriterlere göre malzeme dağılımını optimize etmiş ve en uygun yapısal şekli ortaya çıkarmıştır.

Sonuçların Değerlendirilmesi: Optimizasyon sonucunda elde edilen yapısal şekil ve malzeme dağılımı, belirlenen hedefler ve kısıtlamalar doğrultusunda değerlendirilmiştir. Gerekli durumlarda, optimizasyon parametrelerinde değişiklikler yapılarak süreç tekrarlanmıştır.

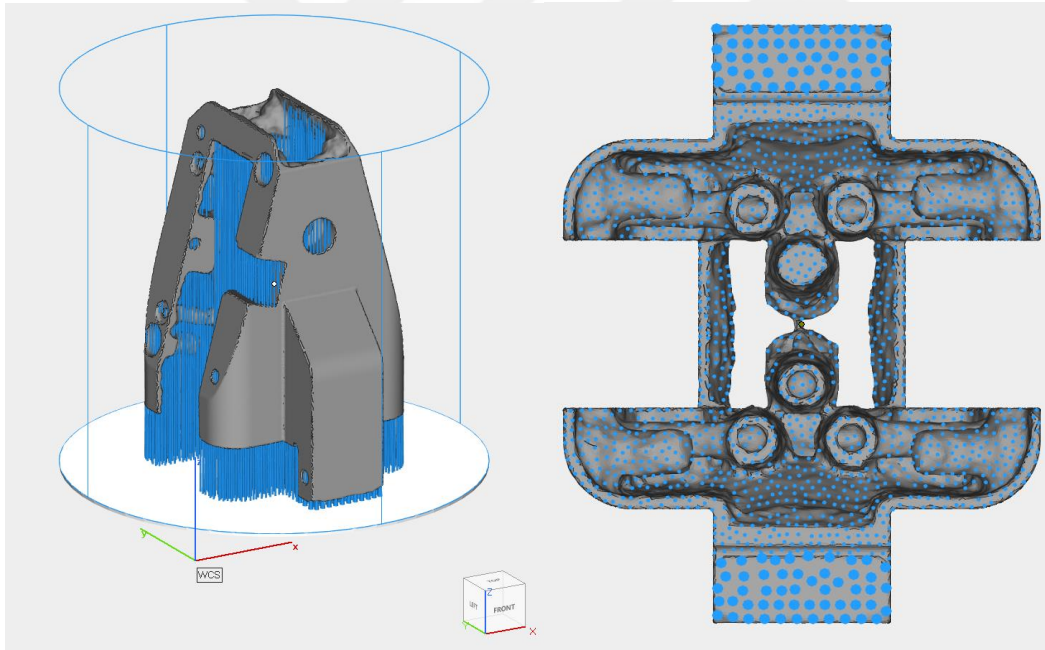
3.3. Parça Geometrisinin Eklemeli İmalata Uygun Hale Getirilmesi

TO sonucunda elde edilen parçanın yüzeylerinde birçok girinti ve çıkıntı meydana gelmiştir. Bu tür yüzey özellikleri, eklemeli imalat sürecinde çeşitli zorluklara neden olabileceği için parça bu haliyle üretime uygun bulunmamıştır. Eklemeli imalat sürecinde parçanın yüzey kalitesi, üretim hassasiyeti ve nihai ürünün fonksiyonelliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, optimizasyon sonucunda ortaya çıkan yüzey düzensizliklerinin giderilmesi için ek bir adım olarak SpaceClaim programı kullanılmıştır. SpaceClaim, CAD modelleme ve yüzey düzenleme konularında güçlü araçlara sahip bir yazılımdır. Bu program aracılığıyla parçanın yüzeylerindeki girinti ve çıkıntılar dikkatlice düzeltilmiş, pürüzsüz ve üretime uygun bir yüzey elde edilmiştir. Düzenleme işlemleri sırasında,

parçanın orijinal tasarımındaki yapısal bütünlük ve fonksiyonellik korunmuştur. Yapılan bu düzenlemeler sayesinde, parça eklemeli imalat sürecine uygun hale getirilmiş ve üretim aşamasına geçilmiştir.

3.4. Destek Yapılarının ve Oryantasyon Düzeni

Topoloji optimizasyonundan sonra parçanın üretimi için gerekli olan destek yapıları ve hangi yönelimde üretileceğine dair uygulamaları yapmak için Material Magics programı kullanılmıştır. Şekil 3.10'da kullanılan destek yapıları gösterilmektedir. Destek yapıları altaştan parçaya gelene kadar azalan çapa sahip konik şekilde kullanılmıştır. Kenar destek yapılarının çap ölçüleri olarak 0.8 mm'den 0.6 mm'ye azalan ve diğer destek yapılarında ise 0.3 mm'den 0.2 mm'ye kadar azalan çap boyutları kullanılmıştır.

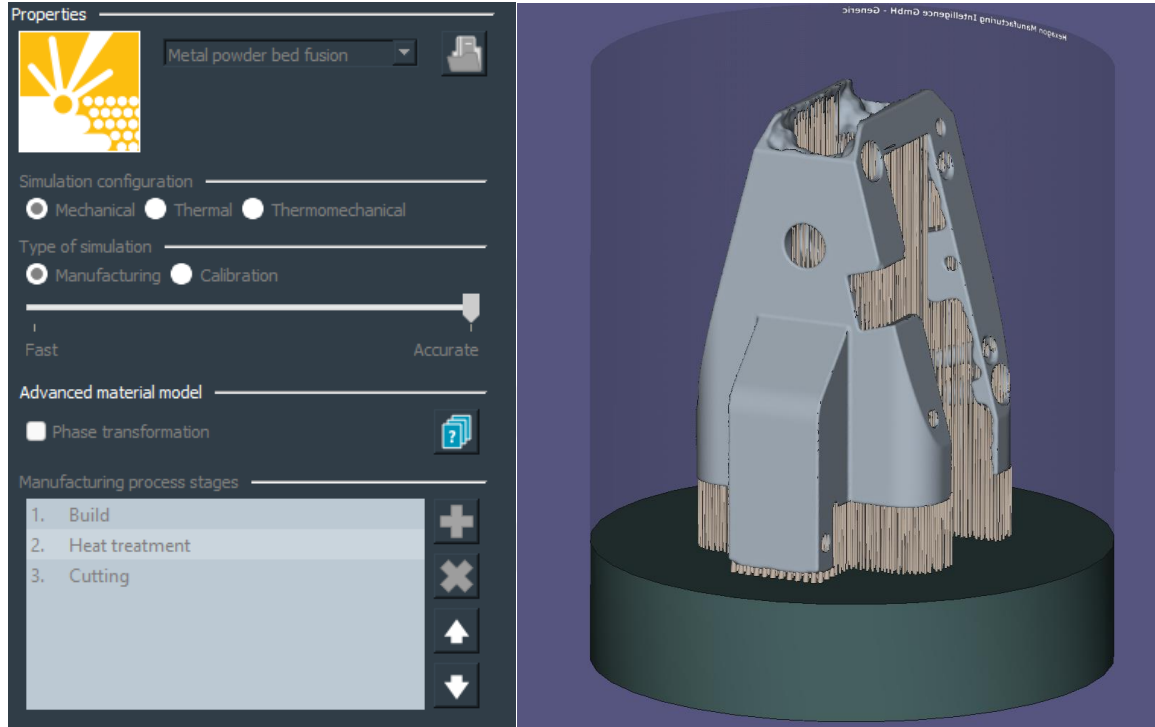


Şekil 3.10 Destek yapıları ve oryantasyon çalışması

3.5. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Analizi

Üretim için tasarlanan geometrinin metal eklemeli olarak üretimi esnasında karşılaşılabilecek durumlarının tespiti ve simülasyonu için ticari yazılım olan Simufact Additive programı kullanılmıştır. Parça üretimi esnasında oluşabilecek katman ayrılmaları, gerilme değerleri vb. durumların simülasyonu yapılmıştır. Bu analiz programı üretimin

sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesi için kullanılmıştır. Şekil 3.11’de kalıntı gerilme ve çarpılma analizi için kullanılan simufact additive analiz programı görseli gösterilmektedir. Analizler için simülasyon konfigürasyonu “mekanik” ve simülasyon türü olarak “üretim” seçilmiştir. Üretim süreç aşamaları olarak sırasıyla inşa, ısıl işlem ve tabladan ayırma olarak seçilmiştir. Makine kurulumundan sonra malzeme olarak AlSi10Mg seçilmiştir. Son olarak voxel ağ örgüsü ataması yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir.



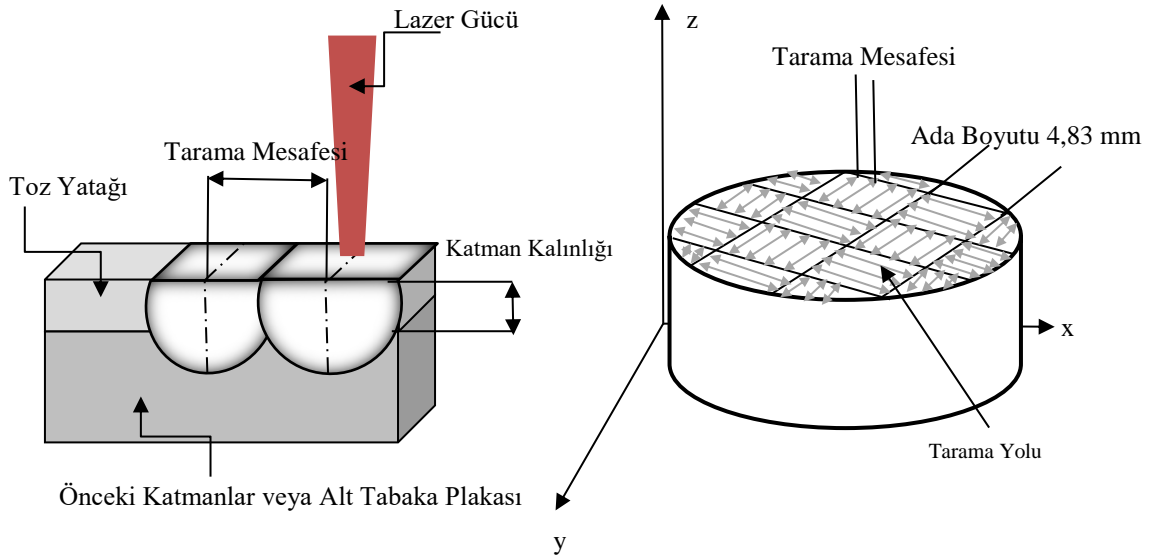
Şekil 3.11 Simufact additive analiz çalışması

3.6. Metal Eklemeli İmalat

Eklemeli olarak üretim için Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi alt yapısında bulunan İleri Alaşımlar Üretim Merkezi’ndeki ERMAKSAN EnaVision 130 SLM cihazı kullanılmıştır. Çalışmada ticari olarak temin edilebilen ASTM F3318- (A461-AlSi10Mg) tozları kullanılmıştır. Kullanılan tozun parçacık boyutları 15-45 μm aralığındadır. Robot kol parmak tutucusu azot gazı altında Şekil 3.13’de gösterilen EnaVision 130 SLM cihazı kullanılarak üretilmiştir. Genel üretim parametreleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Bu üretim parametreleri ERMAKSAN firması ön çalışmaları ile optimize edilen parametrelerdir SLM ile üretilen parçalar için satranç model seçilmiştir. Şekil 3.12’de parametreler ve modele ilişkin görsel gösterilmektedir. Üretim 55 saat sonucunda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2 Üretim parametrelerine ait bilgiler

Katman Kalınlığı	30 μm
Tarama Mesafesi	110 μm
Lazer Nokta Çapı	85 μm
Tarama Hızı	800 mm/sn
Lazer Gücü	320 W
Satranç Modelindeki Ada Kenarları Uzunluğu	4,83 mm



Şekil 3.12 Tarama modeli ve tarama parametreleri gösterimi



Şekil 3.13 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi ERMAKSAN EnaVision 130 SLM

3.7. Üretim Sonrası Isıl İşlem

Üretim sonucunda robot kol parmak tutucusunun üzerinde simülasyonlar ile hesaplanan artık gerilimlerin oluşturduğu gerilmenin giderilmesi için ilk önce Şekil 3.14’de gösterilen Protherm kül fırını kullanılarak oda sıcaklığından dakikada 5 °C artacak şekilde 300 °C’ye ulaşılmış ve bu sıcaklıkta 2 saat ısıl tavlama işlemi yapılmıştır [82].



Şekil 3.14 Isıl tavlama işlemi

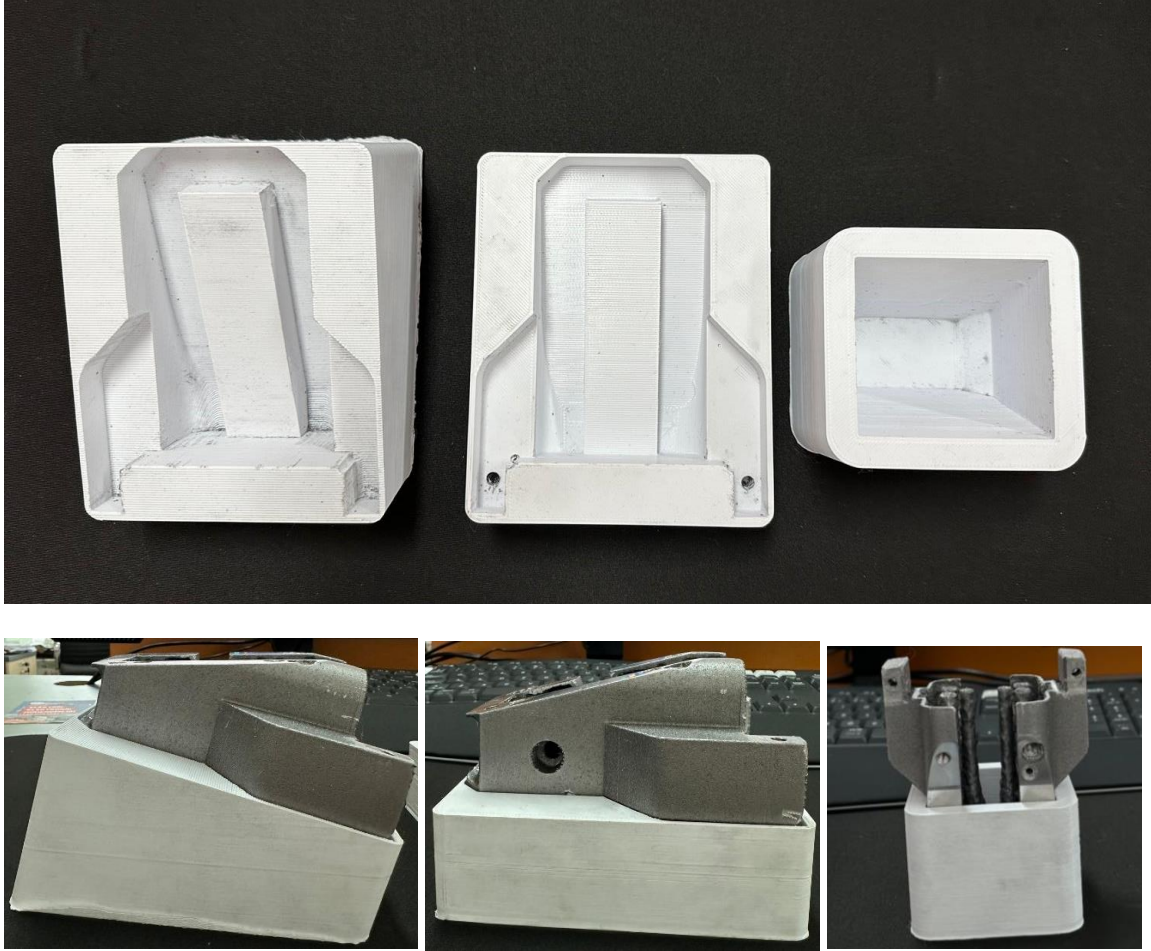
Isıl tavlama işleminden sonra robot kol parmak tutucusu üretim tablasından ayrılmıştır. Ayrılan tutucunun daha sonrasında destek yapıları temizlenmiştir. Şekil 3.15’de destek yapılarının bir kısmının temizlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Robot kol parmak tutucusunun destek yapılarının temizlenmesi

3.8. İkincil İşlem Hazırlığı

Robot kol parmak tutucusunun destek yapılarının temizlenmesi ardından deliklerin delinebilmesi için ikincil işlem adımında sütunlu matkap kullanılmıştır. Vida bağlantılarının ve hortum hatlarının sütunlu matkap ile dik bir konumda delinebilmesi için 3 adet tutucu tasarlanmıştır. Tasarlanan tutucular Şekil 3.16’da gösterilmektedir. Her bir tutucu tasarlanırken ilgili yüzeye denk gelen bağlantıların dik konumda durabilmesi için tasarlanmıştır. Tutucu tasarımları erime tabanlı işleme (FDM) yazıcı kullanılarak üretilmiştir.



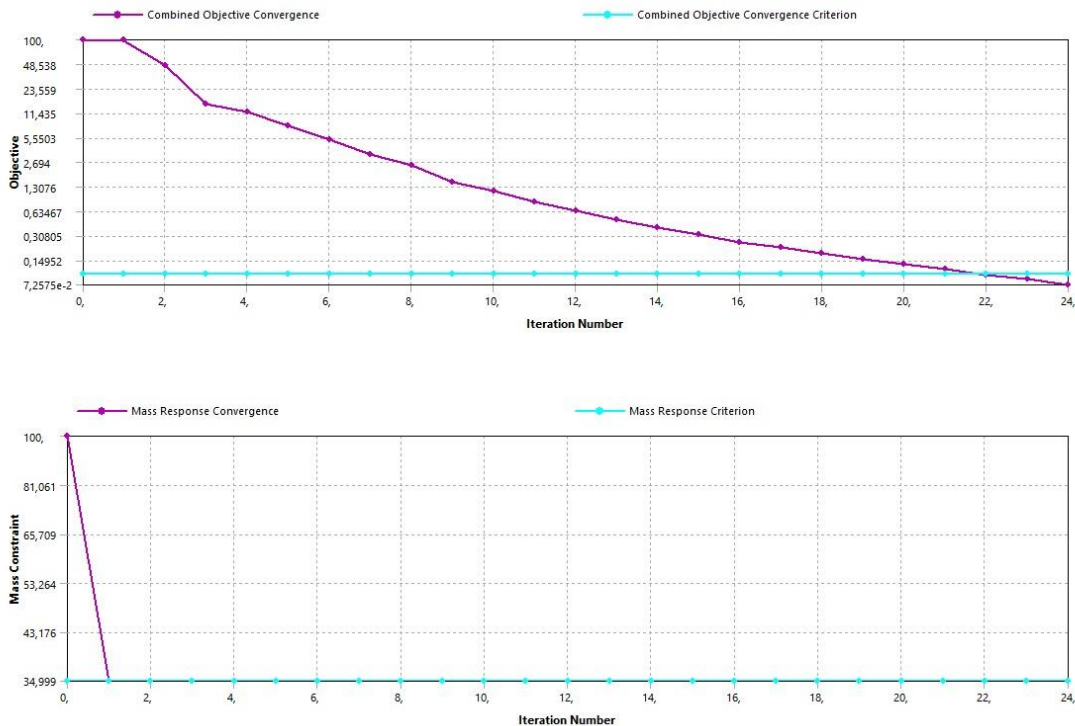
Şekil 3.16 İkincil işlem için tasarlanan tutucular

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, topoloji optimizasyonu ile SLM’de AlSi10Mg kullanılarak üretilen robot kol parmak tutucularının üretimi için yapılan çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Üretilen parçanın TO ve Simufact Additive analizi sonuçları ve yorumlamaları gerçekleştirilmiştir.

4.1. Ansys Topoloji Optimizasyonu

Yapısal analiz ve TO çalışmaları, parçaların tasarım gereksinimleri doğrultusunda tamamlanmıştır. Öncelikle mevcut parçaların yapısal analizi tamamlanmıştır. Başlangıç gerilmelerine, maksimum bağlantı yüküne ve civata ön gerilme yüklerine sahip optimize edilmemiş modeller analiz edilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde, analiz bulgularının detaylı bir tartışması sunulmaktadır. Bu çalışmanın ardından TO çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümlerde açıklanan kriterlere göre, TO analizi 24. yinelemede yakınsaması Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

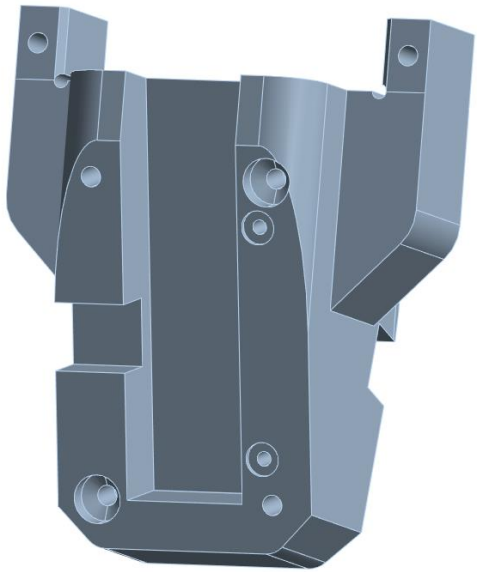


Şekil 4.1 Topoloji optimizasyonunun yineleme sayısı

TO çalışması sonucunda elde edilen geometri Şekil 4.2 b'de gösterilmektedir. Bu şekil sadece optimize edilen bölgelerdeki değişiklikleri göstermekte olup, çalışma dışı bırakılan

bölgelerde optimizasyon gerçekleştirilmemiştir. Optimizasyon sonucu geometrisi, SIMP yöntemi ile oluşturulduğu için bazı konumlarda çok fazla kenarlı ve pürüzlü yapı kalmıştır. Eklemeli imalat ile üretim için bu yapıların temizlenmesi gerekmektedir. Optimizasyon sonucunu değerlendirmede kullanılan eşik değerinin seçimi, kritik bir adımdır. Çeşitli eşik değerleri arasındaki karşılaştırmaların ardından, sürekli bir yapıyı temsil eden 0,35 değeri seçilmiştir. Bu değer, robot kol parmak tutucusunun yüksek oranda hafifletilmesini sağlayacağından robot kolun gelişmiş hareketli donanımın performansını, hızının artmasını, çevrim süresinin kılmasını ve genel üretkenliğinin artmasını sağlayacaktır. Çalışma sonucunda, TO edilmiş robot kol parmak tutucularının ağırlığı yaklaşık %65 oranında azalmıştır. %65 oranında tutulmasının sebebi daha üst seviyelerde parça bütünlüğü bozulmasından dolayıdır. Daha stabil bir tasarım için bu oran seçilmiştir. Mevcut tasarımın kütlesi yaklaşık 570 gram iken, çalışma sonucunda 192 grama düşmüştür. Optimize edilmemiş ve optimizasyon sonucu parça arasındaki değişiklik Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

a)

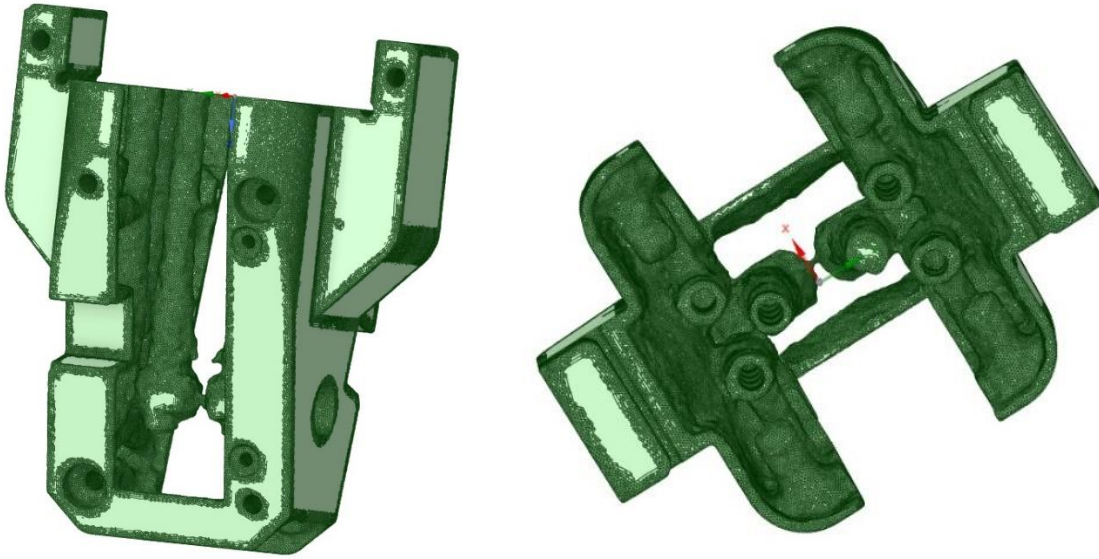


b)



Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	6,2272e-004
<input type="checkbox"/> Maximum	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,51343
<input type="checkbox"/> Original Volume	2,1351e+005 mm ³
<input type="checkbox"/> Final Volume	79759 mm ³
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	37,357
<input type="checkbox"/> Original Mass	0,57006 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	0,21296 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	37,357

Şekil 4.2 a) Topoloji optimizasyonu yapılmayan parça görünümü b) optimizasyon sonucu parça görünümü c) optimizasyon sonucu kütle değerleri TO sonrasında elde edilen geometri analiz edilebilecek, doğrudan kullanılabilir ve üretilebilecek bir geometri değildir. Bu nedenle, ilgili geometrinin düzenlenmesi gerekmektedir. Bu tezde elde edilen geometri, ANSYS SpaceClaim kullanılarak düzenlenmiştir. Şekil 4.3’de TO analiziyle oluşturulan tasarım göstermektedir.



Şekil 4.3 SpaceClaim ile parça düzenlenmesi

TO sonrasında elde edilen geometriler yeniden tasarlandıktan sonra yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizde kullanılan girdiler ve sınır koşulları, optimizasyon çalışmasından önce yapılan analizle tamamen aynıdır. Optimizasyon öncesi ve sonrası robot kol parmak tutucularının sonuçları detaylı olarak Bölüm 4.2’de verilmiştir. Her iki analizde de Von Mises kriteri kullanılmıştır.

4.2. Optimizasyon Öncesi ve Optimizasyon Sonrası Parçanın Analizi

Von-Mises gerilmesi, malzemelerin akma kriterlerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Yüksek von-Mises gerilmesi, malzemenin plastik deformasyon bölgesine yaklaştığını veya bu bölgeye girdiğini gösterir. Optimizasyon sonrası von-Mises gerilme değerinin artması, yapının performansının kötüleştiği anlamına gelmez. Aksine, bu artış, yapının sınır koşullarını ve yük taşıma kapasitesini daha verimli bir şekilde yönettiğini gösterebilir. Bu tür bir durum, malzemenin akma sınırının altında kaldığı sürece kabul edilebilir ve hatta istenen bir sonuç olabilir. Optimizasyon sürecinde, malzeme kullanımını azaltırken yapının dayanıklılığını korumak veya artırmak hedeflenir.

Şekil 4.4 'de gerilme dağılımına bakıldığında, optimizasyon öncesi yapının daha düşük maksimum gerilme değerlerine sahip olduğu, ancak optimizasyon sonrası bu değerlerin arttığı görülmektedir. Bu artış, yapının belirli bölgelerinde gerilme yoğunluklarının arttığını gösterse de AlSi10Mg alaşımının akma sınırları dahilinde kalmaktadır. Optimizasyon sonrası yapının daha homojen bir gerilme dağılımı sağladığı ve bu sayede yapının genel yük taşıma kapasitesinin daha verimli kullanıldığı anlaşılmaktadır. Yüksek gerilme değerleri, yapıdaki kritik bölgelerin optimize edilerek malzeme kullanımının daha etkin hale getirildiğini ve bu bölgelerin yük taşıma kapasitelerinin maksimum düzeyde kullanıldığını gösterir. Bu durum, yapının hafifletilmesine ve maliyet etkinliğinin artırılmasına olanak tanır. Önemli olan, bu yüksek gerilme bölgelerinin malzemenin akma sınırını aşmaması ve yapının genel güvenlik marjının korunmasıdır. Sonuç olarak, optimizasyon sonrası gerilme değerlerinin artması, yapının daha verimli, ekonomik bir şekilde tasarlandığını ve sınır koşullarının daha iyi yönetildiğini gösterir. Bu, yapının dayanıklılığını ve performansını artırırken, malzeme verimliliği ve maliyet etkinliği sağlar. Yapının güvenli ve öngörülebilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için, optimizasyon sürecinde elde edilen gerilme değerlerinin, malzemenin güvenlik sınırları dahilinde olduğundan emin olunmalıdır. Bu tür bir yaklaşım hem yapısal performansı hem de ekonomik verimliliği maksimize eder.

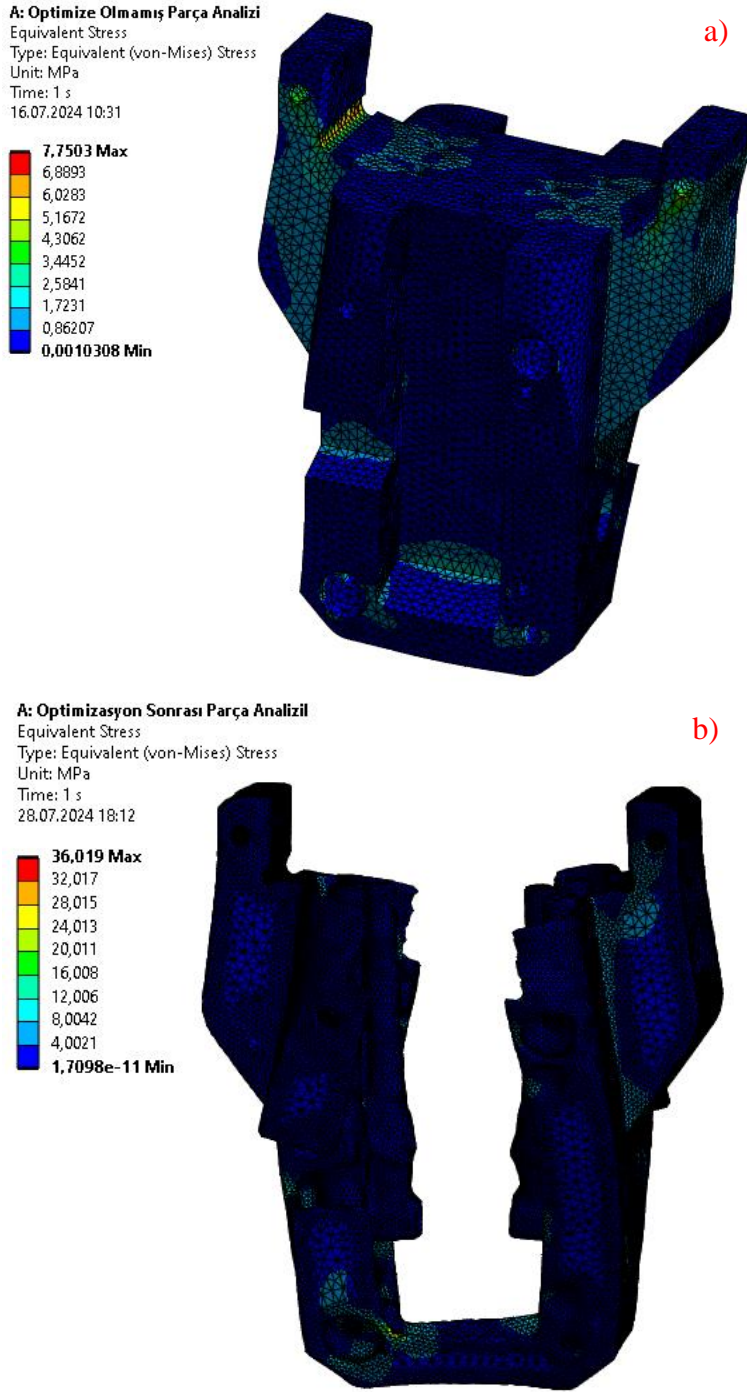
Emniyet katsayısı (SF), malzemenin akma gerilmesinin (σ_y) von-Mises gerilmesine (σ_{vm}) oranı olarak hesaplanır. Bu, yapının ne kadar güvenli bir şekilde çalıştığını gösterir.

$$\text{Emniyet Katsayısı (SF)} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm}}$$

Malzemenin akma gerilmesini (σ_y) belirlemek için genellikle kullanılan bazı malzemelerin akma gerilmesi değerlerini göz önünde bulundurabiliriz. AlSi10Mg alaşımı için bir akma gerilmesi değeri 170 MPa'dır.

$$\text{Emniyet Katsayısı (SF)} = \frac{170 \text{ MPa}}{36.019 \text{ MPa}} \cong 4.72 \quad 4.2$$

Emniyet katsayısı 4.72 olarak hesaplanmıştır. Bu, yapının optimize edildikten sonra bile oldukça güvenli bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Emniyet katsayısının 1'den büyük olması, yapının taşıyabileceği yüklerin akma gerilmesinin altında kaldığını ve dolayısıyla plastik deformasyon riski olmadığını gösterir. Emniyet katsayısının 1'den oldukça büyük olması ise, yapının çok yüksek güvenlikle çalıştığını ve çok daha ağır yükler altında bile güvenilir bir performans sergileyeceğini kanıtlar. Optimizasyon sonrası maksimum von-Mises gerilmesinin 36.019 MPa'ya yükselmesi, malzeme kapasitesinin daha verimli kullanıldığını ve kritik bölgelerde gerilmelerin optimize edildiğini gösterir. Ancak, bu gerilme değerinin malzemenin akma gerilmesinin oldukça altında kalması, yapının güvenli sınırlar içinde çalıştığını ve yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu gösterir.



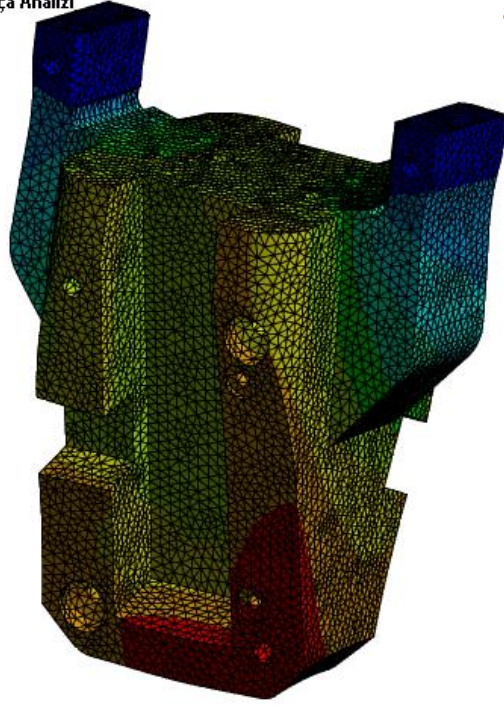
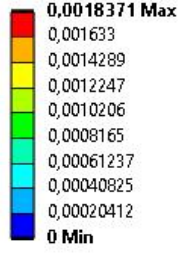
Şekil 4.4 a) Optimizasyon öncesi ve b) optimizasyon sonrası eşdeğer von-Mises gerilme değerleri

Şekil 4.5'de ise yapının statik yapısal analizinde toplam deformasyonun optimizasyon öncesi ve sonrası durumlarını göstermektedir. TO öncesi sonuçların gösterildiği ilk görüntüde, yapının toplam deformasyonunun maksimum değeri 0.0018371 mm olarak gösterilmektedir. Deformasyon dağılımı, renk skalası üzerinden kırmızıdan maviye doğru değişmektedir. Kırmızı bölgeler en yüksek deformasyonun olduğu yerleri, mavi bölgeler ise en düşük deformasyonun olduğu yerleri temsil eder. Bu durum, yapının belirli

bölgelerinde yüksek gerilme ve deformasyon yaşandığını göstermektedir. İkinci görüntüde ise, optimizasyon sonrasında yapının toplam deformasyonunun maksimum değeri 0.010905 mm olarak verilmiştir. Deformasyonun arttığı bazı bölgeler olsa da genel olarak deformasyon dağılımının daha homojen olduğu dikkat çekmektedir. Optimizasyon öncesi ve sonrası deformasyon değerleri incelendiğinde, optimizasyon sonrası yapının toplam deformasyonunun nominal olarak arttığı, ancak bu deformasyonun daha homojen dağıldığı gözlemlenmektedir. Optimizasyon öncesinde deformasyon daha az ancak belirli bölgelerde yoğunlaşmış durumdayken, optimizasyon sonrasında deformasyon daha geniş bir alana yayılmış ve homojen bir dağılım göstermektedir. Bu durum, yapının belirli bölgelerinde yoğunlaşan gerilme ve deformasyonun azaltıldığını ve daha dengeli bir yapısal performans elde edildiğini göstermektedir. Optimizasyon, genellikle belirli bölgelerdeki aşırı yükleri azaltarak tüm yapı üzerinde daha dengeli bir yük dağılımı sağlamayı hedefler. Bu doğrultuda, optimizasyon işleminin başarılı olduğu söylenebilir. Deformasyonun homojen dağılımı, yapının dayanıklılığını ve güvenilirliğini artıran önemli bir faktördür. Bu analiz sonucunda, optimizasyonun yapısal performansı iyileştirdiği, belirli bölgelerdeki aşırı yüklenmeleri dengelediği ve dolayısıyla yapının uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasına katkı sağladığı açıkça anlaşılmaktadır. Deformasyonun 0.010905 mm değeri genel mühendislik ve tasarım kriterleri dikkate alındığında oldukça düşük bir değer olarak kabul edilir. Yapısal analizlerde, özellikle karmaşık ve hassas mekanik bileşenlerde, deformasyonun milimetre mertebesinde çok altında tutulması istenir. 0.010905 mm'lik bir deformasyon değeri, yapı üzerinde işlevsel bir sorun yaratmayacak kadar küçüktür ve genellikle kabul edilebilir sınırlar içinde değerlendirilir. Bu da optimizasyon sonrasında elde edilen sonuçların pratik ve mühendislik açısından yeterli olduğunu göstermektedir. Yapının fonksiyonelliği ve güvenliği açısından bu deformasyon seviyesinin kabul edilebilir olduğu ve performans kriterlerini karşıladığı sonucuna varılabilir.

A: Optimize Olmamış Parça Analizi

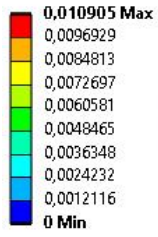
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
28.07.2024 18:05



a)

A: Optimizasyon Sonrası Parça Analizi

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
28.07.2024 18:07

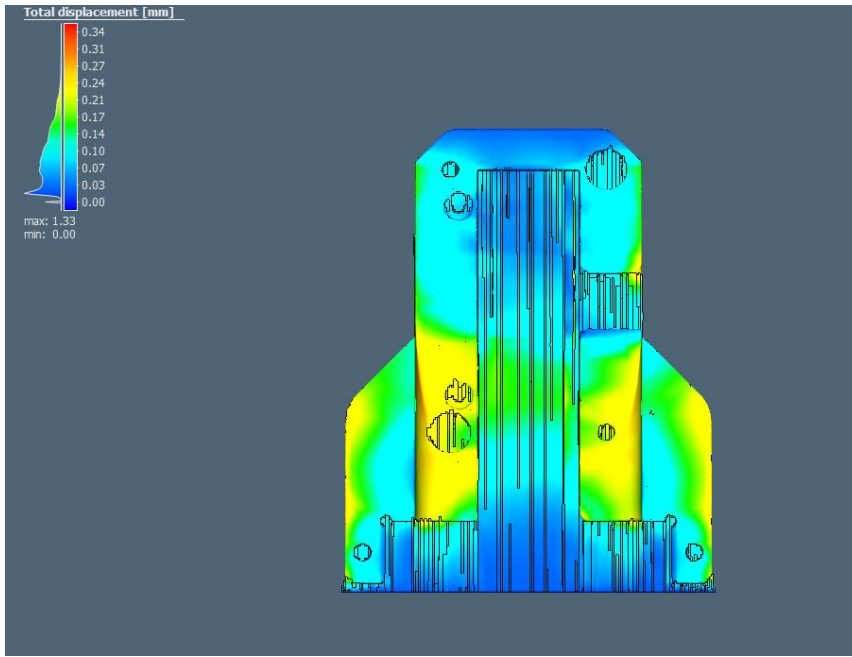


b)

Şekil 4.5 a) Optimizasyon öncesi ve b) optimizasyon sonrası toplam deformasyon değerleri

4.3. Üretim Sırasındaki Kalıntı Gerilme Analizinin Sonuçları

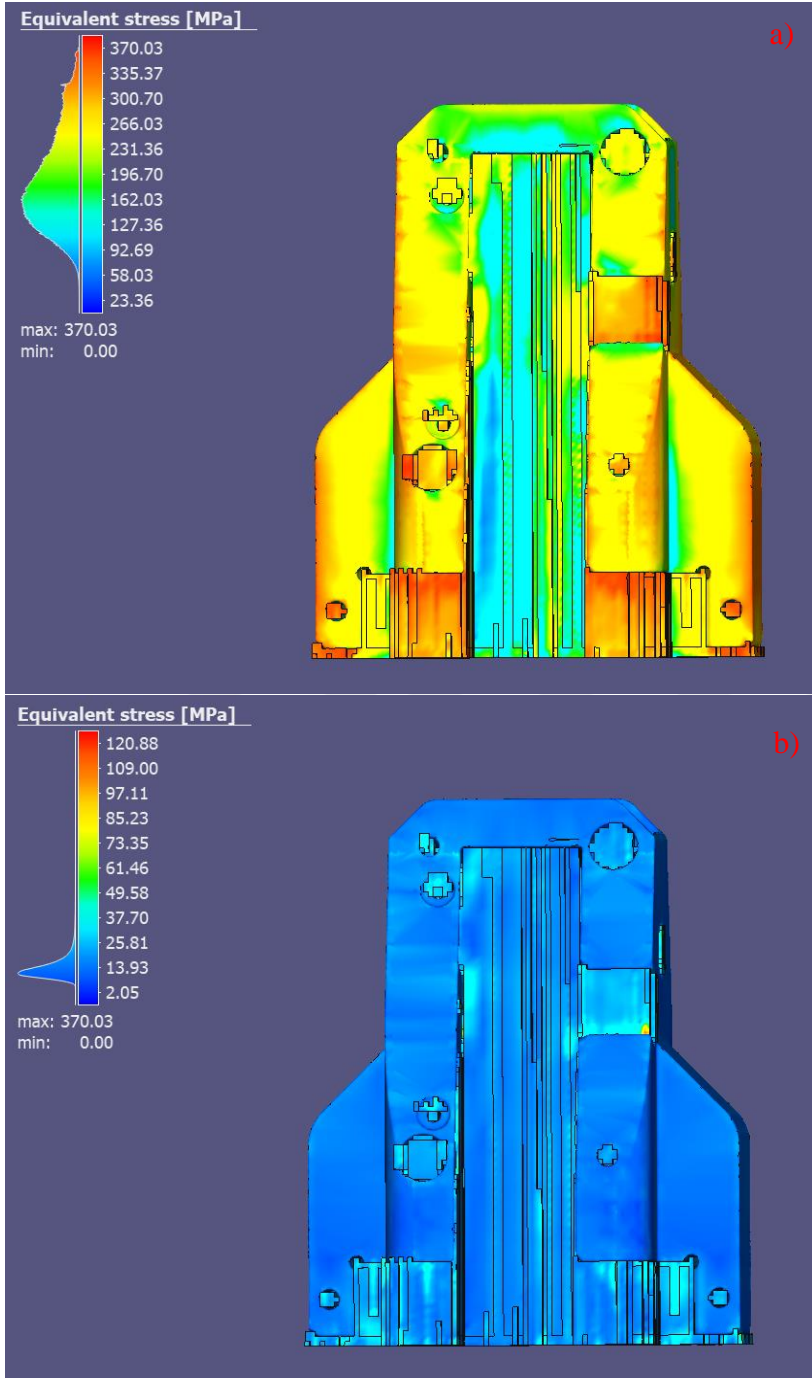
Gerçekleştirilen Simufact Additive analizi ile ısıtılma işlemi öncesinde, yani öncelikle SLM ile üretimin hemen sonrasında modelin toplam yer değiştirme, eşdeğer gerilme ve katmanlar arası ayrışma dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.6'da toplam yer değiştirme (deformasyon) dağılımı gösterilmektedir. Bu dağılım, modelin en yüksek yer değiştirmesinin yaklaşık 0,34 mm olduğunu ve yer değiştirmelerin genel olarak modelin ortasında yoğunlaştığını göstermektedir. Modelin çeşitli bölgelerinde yer değiştirme ise sıfıra oldukça yakındır.



Şekil 4.6 Robot kol parmak tutucusunun toplam yer değiştirme dağılımı

Şekil 4.7'de, modelin eşdeğer gerilme dağılımı sunulmuştur. Eşdeğer gerilmenin maksimum değeri yaklaşık 370 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yüksek gerilme değerleri, modelin belirli bölgelerinde yoğunlaşmakta ve potansiyel zayıflık noktaları olarak değerlendirilmelidir. Yüksek gerilme bölgelerinin doğru analiz edilmesi ve gerekirse yapısal iyileştirmeler yapılması önem arz etmektedir. Bununla birlikte, bu gerilme seviyelerinin, ısıtılma işlemi gibi uygun ısıtılma işlemleriyle azaltılabileceğinden modelin genel dayanıklılığının artırılabilir. Isıtılma işlemi, malzemenin iç gerilimlerini gidererek daha homojen bir yapıya kavuşmasını sağlar ve bu sayede yüksek gerilme bölgelerindeki gerilme seviyeleri düşürülebilir. Üretim sırasındaki parçanın nasıl etkileneceğini analiz ettikten sonra Simufact Additive programında üretim sonrasında ısıtılma işlemi parametreleri girilerek ısıtılma analizi yapılmıştır. 300 °C'de 2 saatlik ısıtılma

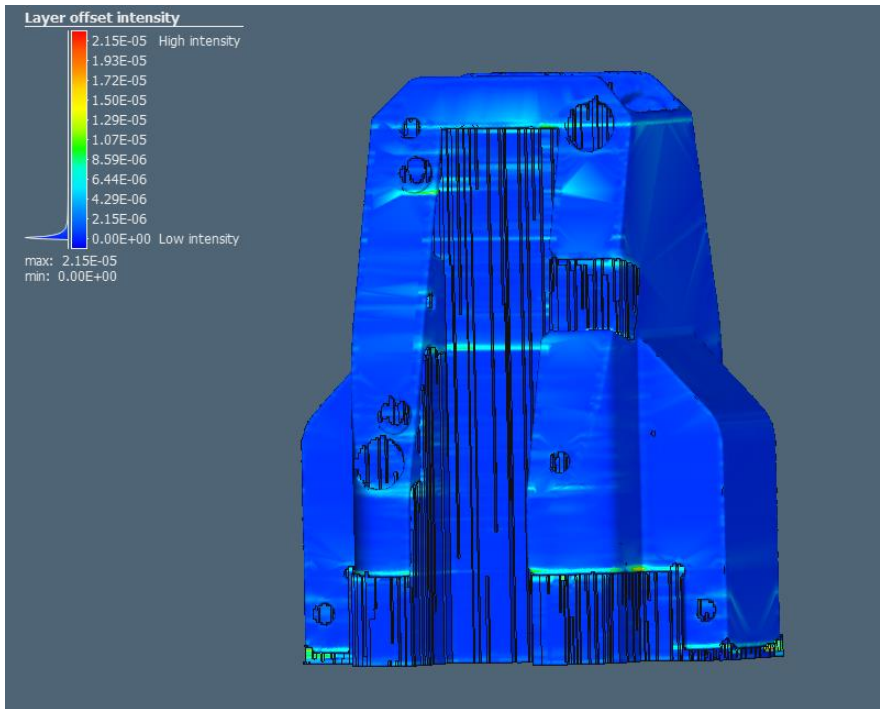
işlemin simüle edildiği analiz sonuçlarına bakıldığında yapı üzerindeki gerilme değerlerinin keskin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Bu kapsamda üretim sonrasında parçayı tabladan sökmeden önce ısıtma işlemi yapılmıştır. Bu işlem, modelin maksimum gerilme değerini 120 MPa'lara kadar düşürerek, genel gerilme dağılımını homojenleştirmiştir. Isıtma işlemi sonrasında gerilme seviyesi ortalama olarak 14 MPa seviyelerinde önemli ölçüde azaldığı ve yüksek gerilme konsantrasyonlarının minimize edildiği görülmektedir. Isıtma işlemi, malzemenin iç gerilmelerini azaltarak daha homojen bir yapının elde edilmesini sağlamıştır. Bu durum, gerilme yoğunluğunun daha dengeli bir şekilde dağıldığını ve modelin genel dayanıklılığının artırıldığını göstermektedir. Sonuç olarak, ısıtma işlemi, modelin yüksek gerilme bölgelerini etkin bir şekilde azaltmış ve gerilme dağılımını homojenleştirerek yapının genel dayanıklılığını artırmıştır. Bu gözlemler, ısıtma işleminin model üzerindeki pozitif etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7 Robot kol parmak tutucusunun a) üretim sonrası ve b) ısıl işlem sonrası eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 4.8'de ise üretim sonrasında, ısıl işlem öncesinde simüle edilen katmanlar arası ayrışma dağılımı yer almaktadır. Analiz sonucunu incelediğimizde, katman yer değiştirme yoğunluğunun model üzerinde nasıl dağıldığı görülmektedir. Grafik, yüksek yoğunluklu bölgeleri kırmızı ile düşük yoğunluklu bölgeleri ise mavi ile göstermektedir. Yüksek yoğunluklu bölgelerin çok fazla olmaması ve genel olarak mavi tonlarının baskın olması, üretim sürecinde büyük problemlerle karşılaşılmayacağını göstermektedir. Bu durum,

eklemeli imalatın bu model için uygun olduğunu ve üretim sırasında beklenmedik deformasyonlar veya hataların oluşma olasılığının düşük olduğunu işaret etmektedir. Özellikle, katman yer değiştirme yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerin, parça stabilitesini ve kaliteyi olumlu yönde etkileyeceği söylenebilir. Ayrıca, destek yapılarının yeterli olduğu ve bu yapıların modelin üretim sırasında gerekli stabiliteyi sağladığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, analiz verileri, bu modelin eklemeli imalat yöntemiyle uygun bir şekilde üretilebileceğini ve üretim sürecinin başarılı olma ihtimalinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8 Robot kol parmak tutucusunun katmanlar arası ayrılma dağılımı

Sonuç olarak, analiz sonuçları modelin belirli bölgelerinde yüksek gerilme ve yer değiştirme değerleri tespit edilse de bu değerlerin kritik olmadığı ve katmanlar arası ayrılma riskinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlem sonrasında ise kalıntı gerilmelerin ortadan kalktığı anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, modelin eklemeli imalat ile uygun bir şekilde üretilebileceğine dair olumlu bir tablo çizmektedir. Yer değiştirme ve gerilme seviyelerinin kabul edilebilir düzeylerde olması, eklemeli imalatın bu model için uygun bir üretim yöntemi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ısıl tavlama işlemi ile model üzerinde bulunan yüksek gerilme değerlerinin azaltılabileceği ve yapısal bütünlüğün korunabileceği bilgisi dahilinde üretim başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonuçları,

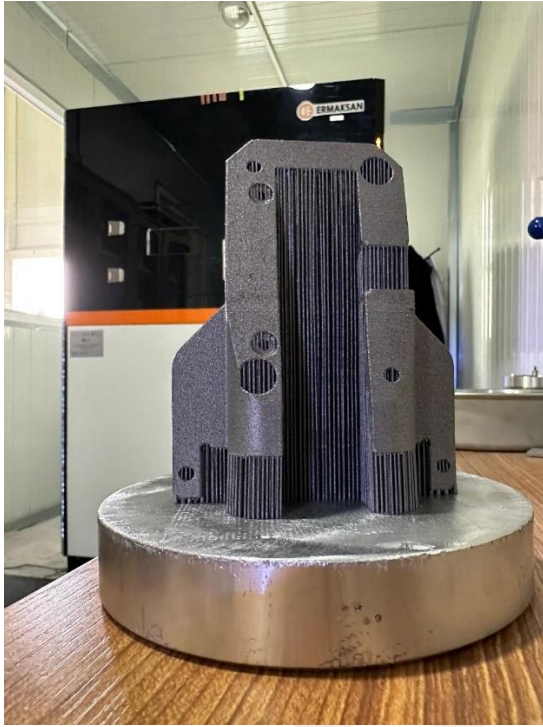
modelin güvenilirliğini ve performansını artırmak için gerekli tasarım değişiklikleri ve ısıl işlemlerle birlikte değerlendirildiğinde, eklemeli imalat başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

4.4. SLM ile Üretim ve Isıl İşlem

SLM yöntemiyle gerçekleştirilen başarılı bir üretim sürecinin ardından, üretilen parçaların performans ve dayanıklılık özelliklerini optimize etmek amacıyla simufact additive analizinde parçalar üzerinde yüksek gerilme değerleri tespit edilmiştir. Bu gerilmeler, parçalarda istenmeyen deformasyonlara ve potansiyel yapısal zayıflıklara yol açabileceği için dikkatle incelenmiştir. Bu olumsuz etkilerin önüne geçmek ve parçaların istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamak amacıyla ısıl tavlama için analiz yapıldıktan sonra, ısıl tavlama işlemi uygulanmıştır. Isıl tavlama, metal parçaların iç gerilmelerini azaltarak, onların daha homojen bir yapıya kavuşmasını sağlar ve böylece üretim sonrası oluşabilecek çatlama veya deformasyon risklerini minimize eder. Isıl tavlama analizinde ortalama 160 MPa olan gerilme değerleri 14 MPa seviyelerine düştüğü gözlenmiştir. Bu işlem, SLM ile üretilen parçaların nihai kullanım koşullarında güvenilir ve dayanıklı olmasını temin eder. Şekil 4.9'da üretim ve ısıl işlem süreci ve Şekil 4.10'da işlem sonrası elde edilen robot kol parmak tutucusu gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Robot kol parmak tutucusunun SLM ile üretim sonucu ve ısıl işlem için fırına yerleştirilmesi



Şekil 4.10 Üretim ve ısıl işlem sonucunda elde edilen robot kol parmak tutucusu

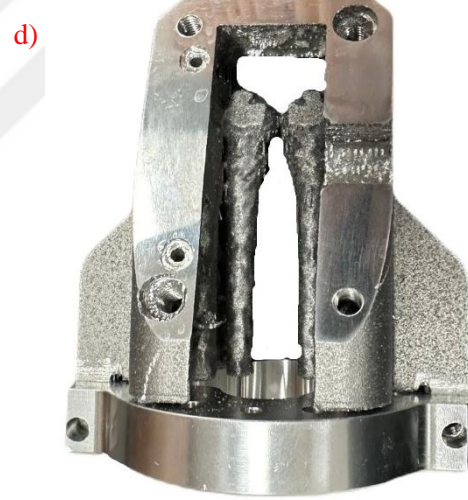
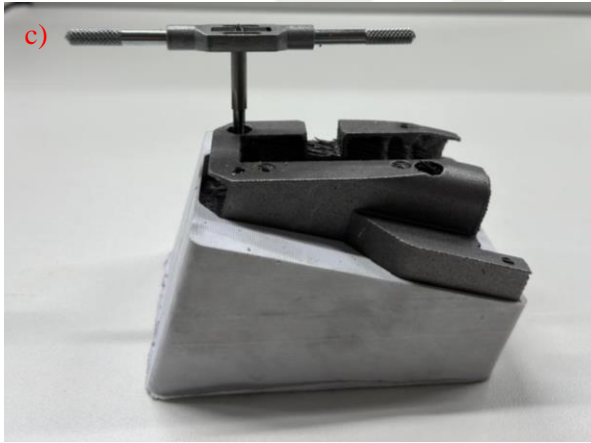
4.5. Yüzey Temizleme ve Delik Delme

Yapılan çalışma, hibrit üretim tekniğinin endüstriyel uygulamalarda kullanımının etkinliğini göstermektedir. SLM yöntemi kullanılarak Al10SiMg tozundan üretilen parçalar, yüksek hassasiyet ve karmaşık geometrilerin üretiminde başarılı sonuçlar vermiştir. Literatürde de belirtildiği üzere, SLM yöntemiyle üretilen parçalarda destek malzemelerinin çıkarılması ve yüzey temizleme işlemleri önemli bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır [83, 84]. Bu çalışmada da benzer şekilde, destek yapılarının temizlenmesi ve bağlantı noktalarının hazırlanması için çeşitli işlemler gerçekleştirilmiştir.

Destek yapıların temizlenmesi sonrasında, bağlantı noktalarındaki destek yapılarının temizlenebilmesi için üç adet fikstür üretilmiştir. Bu fikstürler, parçaların dik duracak şekilde sabitlenmesini sağlamış ve sütunlu matkap yardımıyla vida girişlerinin açılmasını mümkün kılmıştır. Bu işlem, literatürde de vurgulanan, destek malzemelerinin çıkarılmasındaki zorlukları aşmak ve montaj uyumluluğunu artırmak adına kritik bir adımdır [85].

Ayrıca, robot koluna entegrasyonun sağlanabilmesi için bağlantı yüzeylerindeki pürüzler zımparalama işlemi ile temizlenmiştir. Bu yüzey temizleme işlemi, literatürde de sıkça bahsedilen, SLM ile üretilen parçaların yüzey kalitesini artırma ve mekanik performansını iyileştirme gereksinimini karşılamaktadır [86]. Zımparalama işlemi sonrasında elde edilen pürüzsüz yüzeyler, bağlantıların sağlamlığını ve doğruluğunu artırarak, nihai montajda yüksek hassasiyet ve güvenilirlik sağlamıştır.

Sonuç olarak, hibrit üretim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma, SLM yöntemi ile üretilen parçaların bağlantı noktalarının ve yüzeylerinin temizlenmesi için etkin bir süreç sunmaktadır. Destek malzemelerinin temizlenmesi ve yüzey pürüzlerinin giderilmesi, parçaların montaj uyumluluğunu ve genel performansını önemli ölçüde artırmıştır. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olup, hibrit üretim tekniklerinin endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini bir kez daha gözler önüne sermektedir. Şekil 4.11’de sütun matkap ile bağlantı noktalarının temizleme işlemi, vida girişlerinin oluşturulması ve bağlantı yüzeylerinin pürüzlüğü giderilmiş hali ile gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Sütun matkap ile bağlantı noktalarının oluşturulması sonrasında vida girişlerinin açılması. Sonrasında bağlantı yüzeyi temizlenmesi sonucu elde edilen hibrit bileşen gösterimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile robot sektörü için önemli olan daha hafif tasarımların topoloji optimizasyonu (TO), eklemeli ve eksiltmeli üretimin kombinasyonu olarak hibrit üretimle elde edilebileceği gösterilmek istenmiştir. Bu amaçla, robot kol parmak tutucusu parçası vaka çalışması olarak seçilmiştir. Çalışmanın sonunda, mevcut tasarıma göre hem daha hafif, montajı daha kolay ve dayanıklılığı açısından muadiline göre kıyaslanabilir bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, robot sektöründen bir örnek bileşen kullanılarak TO, Eİ ve hibrit üretim ile bir tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarım araştırmasında, parçaların ağırlıkları genel olarak azaltılmış olmasına rağmen parçaların dayanıklılığında belirgin bir kayıp yaşanmamıştır. Ayrıca, TO ve Eİ teknolojileri kullanılarak iki bileşen bir arada oluşturulmuştur. TO optimizasyonu yapılmadan önce malzemenin gerilme dağılımı 7.75 MPa iken optimizasyon sonucunda 36 MPa olarak elde edildi. Bu artış, yapının belirli bölgelerinde gerilme yoğunluklarının arttığını gösterse de optimizasyon sonrası yapının daha homojen bir gerilme dağılımı sağladı ve bu sayede yapının genel yük taşıma kapasitesinin daha verimli kullanılmıştır. TO sonucunda emniyet katsayısı 4.72 olarak elde edilmiştir. Bu, yapının optimize edildikten sonra bile oldukça güvenli bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Yapının toplam deformasyonunun maksimum değeri 0.0018371 mm iken optimizasyon sonucunda 0.010905 mm olarak elde edilmiştir. Optimizasyon sonrası yapının toplam deformasyonunun nominal olarak arttığı, ancak bu deformasyonun daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Kalıntı gerilme analizleri ile parçaların iç yapısındaki içsel gerilmelerin tespit edilmesi ve yönetilmesi sağlanmıştır. Kalıntı gerilmelerin uygun bir şekilde analiz edilmesi, üretim sonrası oluşabilecek çatlaklar, deformasyonlar veya diğer yapısal sorunların önüne geçilmesine yardımcı olmuştur. Kalıntı gerilmeler için Simufact additive analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda eşdeğer gerilmenin maksimum değeri yaklaşık 370 MPa olarak belirlenmiştir. Bu gerilme seviyelerinin, ısı tavlama işlemi gibi uygun ısı işlemlerle azaltılabileceğinden modele ısı işlem analizi yapılmıştır. Isıl işlem analizi sonucunda modelin maksimum gerilme değerini 120 MPa'lara kadar düşürerek, genel gerilme dağılımını homojenleştirmiştir. Tüm optimizasyonlar sonucunda orijinal malzeme kütlesi 570 gram iken optimizasyon sonucunda nihai parça kütlesi %65 azaltılarak 192 gram elde edilmiştir.

Bu analizler, TO ve Eİ süreçlerinin entegre edilmesiyle elde edilen hafifletilmiş ve optimize edilmiş bileşenlerin uzun vadeli güvenilirliğini ve dayanıklılığını garanti altına almıştır. Sonuç olarak, parmak tutucuların sistematik bir şekilde hafifletmek ve sürdürülebilirlik etkisi elde edilmiştir. Gelişmiş hareketli donanımın performansını ve güvenilirliğini optimize etmenin yollarından biri olabilir. Hızlandırılmış makine bileşenlerinin hafifleştirilmesi hızının artmasını, çevrim süresinin kısılmasını ve genel üretkenliğinin artmasını sağlayacaktır.

Ek olarak azaltılmış kütle doğrudan gelişmiş konumlandırma doğruluğu, daha az enerji tüketimi ve genel olarak daha sürdürülebilir üretim ile sonuçlanır. Yalnızca performans veya ağırlık hedefleri için değil aynı zamanda yedek parça stratejilerini değerlendirmek için de özel uygulama alanları için ucuz alternatif çözümler sunabilir. Değişken koşullara maruz kalan cihazların bile etkili bir şekilde optimize edilebilecek bir yöntem sunmaktadır.

Bu çalışma, gelecekteki çalışmalarda alternatif optimizasyon programlarıyla karşılaştırılarak geliştirilebilir. Ayrıca, sıfırdan bir tasarım üretildiğinde, yenilikçi tasarım imkanlarından yararlanarak birden fazla tasarım seçeneği oluşturulabilir. Yapay zekanın ilerlemesiyle birlikte, yenilikçi tasarımlar daha da gelişecektir. Ayrıca, gelecekte yapılacak çalışmalarda, robot sektöründe Eİ ile üretilen parçaların niteliklendirme süreci, bileşen, ekipman ve robot testleri üzerinde çalışmalar planlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] “Endüstriyel ve Hizmet Robotu Pazar Büyüklüğü, Payı ve Büyümesi - 2030.” Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://exactitudeconsultancy.com/tr/reports/38268/industrial-and-service-robot-market/>
- [2] “Kuivanen, R. Robotiikka. Helsinki, Finland: Talentum, 1999. 177 p. ISBN 951-9438-58-0.”.
- [3] S. Hiroset and Y. Umetenit, “The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand,” Pergamon Press, 1978.
- [4] G. Fantoni, S. Capiferri, and J. Tilli, “Method for supporting the selection of robot grippers,” *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 330–335, 2014, doi: 10.1016/J.PROCIR.2014.03.152.
- [5] M. Sugavaneswaran, N. Rajesh, and N. Sathishkumar, “Design of Robot Gripper with Topology Optimization and Its Fabrication Using Additive Manufacturing,” *Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*, vol. Part F164, pp. 75–85, 2020, doi: 10.1007/978-981-32-9433-2_6.
- [6] A. Bicchi and V. Kumar, “Robotic grasping and contact: A review,” *Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 348–353, 2000, doi: 10.1109/ROBOT.2000.844081.
- [7] “Killi, S. Additive Manufacturing – Design, Methods and Processes. CRC Press, 2017. 229 p. ISBN 978-981-4774-16-1.”.
- [8] “Google Trends. Search word ‘Additive manufacturing’ & ‘3D Printing’. [Cited 19 December 2020]. Available at: <https://trends.google.com/trends/?geo=FI>”.
- [9] “Markforged. The Additive Movement Has Arrived – 100+ Industrial Use Cases for Today’s Modern Manufacturer. [Cited 19 December 2020]. Available at: <https://markforged.com/additive-manufacturing-move-ment/?mfv=PLM%20Group>”.
- [10] A. Gupta and S. Arora, “Industrial automation and robotics,” 2011, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=Y7rgCP7iC18C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Gupta,+A.K.+%26+Arora,+S.K.+%26+Westcott,+J.R.+Industrial+Automation+And+Robotics.+Dulles,+Virginia,+USA:+Mercury+Learning+and+Information,+2017.+539+p.+ISBN+978-1-938549-30-4&ots=e6EYYzjXg5&sig=LONqaYUblIFolj8co4fTdEpWdWA>
- [11] M. Sugavaneswaran, N. Rajesh, and N. Sathishkumar, “Design of Robot Gripper with Topology Optimization and Its Fabrication Using Additive Manufacturing,” in *Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*, vol. Part F164, Springer Nature, 2020, pp. 75–85. doi: 10.1007/978-981-32-9433-2_6.
- [12] A. Loyda, M. Arizmendi, S. Ruiz de Galarreta, N. Rodriguez-Florez, and A. Jimenez, “Meeting high precision requirements of additively manufactured components through hybrid manufacturing,” in *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier Ltd, Feb. 2023, pp. 199–212. doi: 10.1016/j.cirpj.2022.11.011.
- [13] NikoLappalainen, “Additive Manufacturing and Simulation in Design and Manufacturing of a Robotic Gripper.”
- [14] “ISO 8373. Robots and Robotic Devices – Vocabulary. 2012. 38 p.”.

- [15] “IFR International Federation of Robotics. Introduction. [Cited 19 December 2020]. Available at: https://ifr.org/downloads/press2018/WR%20Industrial%20Robots%202019_Chapter_1.pdf”.
- [16] D. Yoon, Y. C.-I. T. on Robotics, and undefined 2021, “Analysis of fingertip force vector for pinch-lifting gripper with robust adaptation to environments,” *ieeexplore.ieee.org* D Yoon, Y Choi *IEEE Transactions on Robotics*, 2021•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9312146/>
- [17] S. Backus, A. D.-I. R. and A. Letters, and undefined 2016, “An adaptive three-fingered prismatic gripper with passive rotational joints,” *ieeexplore.ieee.org* SB Backus, AM Dollar *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7378287/>
- [18] Z. Wang, Y. Torigoe, S. H.-I. R. and Automation, and undefined 2017, “A prestressed soft gripper: design, modeling, fabrication, and tests for food handling,” *ieeexplore.ieee.org* Z Wang, Y Torigoe, S Hirai *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7945472/>
- [19] Y. Li, Y. Chen, Y. Yang, Y. L.-I. T. on, and undefined 2019, “Soft robotic grippers based on particle transmission,” *ieeexplore.ieee.org* Y Li, Y Chen, Y Yang, Y Li *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8673646/>
- [20] F. Chen, W. Xu, H. Zhang, Y. Wang, ... J. C.-I. R. and, and undefined 2018, “Topology optimized design, fabrication, and characterization of a soft cable-driven gripper,” *ieeexplore.ieee.org* F Chen, W Xu, H Zhang, Y Wang, J Cao, MY Wang, H Ren, J Zhu, YF Zhang *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8276274/>
- [21] K. Nagaoka, H. Minote, ... K. M.-I. R. and, and undefined 2018, “Passive spine gripper for free-climbing robot in extreme terrain,” *ieeexplore.ieee.org* K Nagaoka, H Minote, K Maruya, Y Shirai, K Yoshida, T Hakamada, H Sawada, T Kubota *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8260908/>
- [22] G. Cannata, M. M.-5th I.-R. International, and undefined 2005, “An embedded tactile and force sensor for robotic manipulation and grasping,” *ieeexplore.ieee.org* G Cannata, M Maggiali *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2005., 2005•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1573549/>
- [23] B. Choi, H. Choi, S. K.-2005 I. International, and undefined 2005, “Development of tactile sensor for detecting contact force and slip,” *ieeexplore.ieee.org* B Choi, HR Choi, S Kang *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and*, 2005•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1545267/>
- [24] L. Birglen, T. S.-R. and C.-I. Manufacturing, and undefined 2018, “A statistical review of industrial robotic grippers,” *Elsevier*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584516304240>

- [25] C. Liu, F. Chung, Y. Chen, ... C. C.-... A. T. on, and undefined 2020, "Optimal design of a motor-driven three-finger soft robotic gripper," *ieeexplore.ieee.org* CH Liu, FM Chung, Y Chen, CH Chiu, TL Chen *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9099951/>
- [26] Z. Zhakypov, F. Heremans, ... A. B.-I. R. and, and undefined 2018, "An origami-inspired reconfigurable suction gripper for picking objects with variable shape and size," *ieeexplore.ieee.org* Z Zhakypov, F Heremans, A Billard, J Paik *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8385192/>
- [27] N. Elangovan, L. Gerez, G. Gao, M. L.-I. Access, and undefined 2021, "Improving robotic manipulation without sacrificing grasping efficiency: a multi-modal, adaptive gripper with reconfigurable finger bases," *ieeexplore.ieee.org* N Elangovan, L Gerez, G Gao, M Liarokapis *IEEE Access*, 2021•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9447682/>
- [28] J. Hashizume, T. Huh, ... S. S.-I. R. and, and undefined 2019, "Capacitive sensing for a gripper with gecko-inspired adhesive film," *ieeexplore.ieee.org* J Hashizume, TM Huh, SA Suresh, MR Cutkosky *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8613851/>
- [29] B. Ward-Cherrier, ... N. R.-I. R. and, and undefined 2017, "Model-free precise in-hand manipulation with a 3d-printed tactile gripper," *ieeexplore.ieee.org* B Ward-Cherrier, N Rojas, NF Lepora *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7959088/>
- [30] N. Rojas, R. Ma, A. D.-I. T. on Robotics, and undefined 2016, "The GR2 gripper: An underactuated hand for open-loop in-hand planar manipulation," *ieeexplore.ieee.org* N Rojas, RR Ma, AM Dollar *IEEE Transactions on Robotics*, 2016•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7473889/>
- [31] B. Zhang, Y. Xie, J. Zhou, K. Wang, Z. Z.-C. and E. in, and undefined 2020, "State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review," *Elsevier* B Zhang, Y Xie, J Zhou, K Wang, Z Zhang *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020•*Elsevier*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920311030>
- [32] J. Hughes, U. Culha, F. Giardina, F. Guenther, A. Rosendo, and F. Iida, "Soft manipulators and grippers: A review," *Frontiers Robotics AI*, vol. 3, no. NOV, Nov. 2016, doi: 10.3389/FROBT.2016.00069/FULL.
- [33] C. Laschi, B. Mazzolai, M. C.-S. robotics, and undefined 2016, "Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities," *science.org* C Laschi, B Mazzolai, M Cianchetti *Science robotics*, 2016•*science.org*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.aah3690>
- [34] J. Wang, D. Gao, P. See Lee, J. X. Wang, D. Gao, and P. S. Lee, "Recent progress in artificial muscles for interactive soft robotics," *Wiley Online Library* J Wang, D Gao, PS

LeeAdvanced Materials, 2021•Wiley Online Library, vol. 33, no. 19, May 2020, doi: 10.1002/adma.202003088.

[35] M. Mukhtar, “Design, modelling, and control of an ambidextrous robot arm,” 2020, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/22367>

[36] “Gibson, I. & Rosen, D.W. & Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies. USA: Springer-Verlag US, 2010. 459 p. ISBN 978-1-4419-1120-9.”.

[37] “SFS-EN ISO/ASTM 52900. Additive Manufacturing. General Principles. Terminology. 2017. 25 p.”.

[38] W. Gao *et al.*, “The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,” *Elsevier*, vol. 69, pp. 65–89, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.

[39] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, “Additive manufacturing of metals,” *Acta Mater*, vol. 117, pp. 371–392, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2016.07.019.

[40] J. Lee, J. An, C. C.-A. materials today, and undefined 2017, “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” *ElsevierJY Lee, J An, CK ChuaApplied materials today, 2017•Elsevier*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352940717300173>

[41] “Muñiz, G. E. (2014, June). Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. In Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing. Brussels, Belgium: Publications Office of the European Union.”.

[42] J. Jordan, “3D Printing,” 2019, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=DsyIDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Jordan,+J.+3D+Printing,+Cambridge,+Massachusetts,+USA:+MIT+Press,+2019.+201+p.+ISBN+9780262536684.&ots=OPyZUTdrtz&sig=iqIorHQfeYeiBT2Rn9hW0IUx5w>

[43] A. Panesar, M. Abdi, D. Hickman, and I. Ashcroft, “Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing,” *Addit Manuf*, vol. 19, pp. 81–94, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ADDMA.2017.11.008.

[44] “nTop (nTopology) launches nTop 4.” Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.voxelmatters.com/ntopology-launches-ntop-4/>

[45] M. A.-B. horizons and undefined 2017, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” *ElsevierM AttaranBusiness horizons, 2017•Elsevier*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.

[46] U. KARAKILINÇ, B. YALÇIN, and B. ERGENE, “Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri,” *Politeknik Dergisi*, vol. 22, no. 4, pp. 801–810, Dec. 2019, doi: 10.2339/politeknik.423707.

[47] M. G. Rashed, M. Ashraf, R. A. W. Mines, and P. J. Hazell, “Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications,” *Mater Des*, vol. 95, pp. 518–533, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.146.

[48] B. Nagarajan, Z. Hu, X. Song, W. Zhai, and J. Wei, “Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives,” *Engineering*, vol. 5, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 702–720, Aug. 01, 2019. doi: 10.1016/j.eng.2019.07.002.

- [49] D. Gu, W. Meiners, ... K. W.-I., and undefined 2012, "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms," *journals.sagepub.com* DD Gu, W Meiners, K Wissenbach, R Poprawe *International materials reviews*, 2012 • *journals.sagepub.com*, vol. 57, no. 3, pp. 133–164, 2012, doi: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
- [50] W. Sames, F. List, S. Pannala, ... R. D.-I. materials, and undefined 2016, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing," *Taylor & Francis* WJ Sames, FA List, S Pannala, RR Dehoff, SS Babu *International materials reviews*, 2016 • *Taylor & Francis*, vol. 61, no. 5, pp. 315–360, 2016, doi: 10.1080/09506608.2015.1116649.
- [51] T. DebRoy, H. Wei, J. Zuback, ... T. M.-P. in M., and undefined 2018, "Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties," *Elsevier* T DebRoy, HL Wei, JS Zuback, T Mukherjee, JW Elmer, JO Milewski, AM Beese *Progress in Materials Science*, 2018 • *Elsevier*, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172>
- [52] B. Nagarajan, Z. Hu, X. Song, W. Zhai, and J. Wei, "Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives," *Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 702–720, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ENG.2019.07.002.
- [53] M. N.-M. and materials transactions A and undefined 2002, "Recent metallic materials for biomedical applications," *Springer* M Niinomi *Metallurgical and materials transactions A*, 2002 • *Springer*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-002-0109-2>
- [54] L. Ladani, ... J. R.-J. of, and undefined 2014, "Mechanical anisotropy and strain rate dependency behavior of Ti6Al4V produced using E-beam additive fabrication," *asmedigitalcollection.asme.org* L Ladani, J Razmi, S Farhan Choudhury *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2014 • *asmedigitalcollection.asme.org*, 2014, doi: 10.1115/1.4027729.
- [55] O. Rodriguez, P. Allison, ... W. W.-M. S. and, and undefined 2015, "Dynamic tensile behavior of electron beam additive manufactured Ti6Al4V," *Elsevier* OL Rodriguez, PG Allison, WR Whittington, DK Francis, OG Rivera, K Chou, X Gong *Materials Science and Engineering: A*, 2015 • *Elsevier*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509315301258>
- [56] L. Thijs, K. Kempen, J. Kruth, J. V. H.-A. Materialia, and undefined 2013, "Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder," *Elsevier* L Thijs, K Kempen, JP Kruth, J Van Humbeek *Acta Materialia*, 2013 • *Elsevier*, vol. 61, pp. 1809–1819, 2013, doi: 10.1016/j.actamat.2012.11.052.
- [57] F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. P.- Materials, and undefined 2017, "On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties," *mdpi.com* F Trevisan, F Calignano, M Lorusso, J Pakkanen, A Aversa, EP Ambrosio, M Lombardi *Materials*, 2017 • *mdpi.com*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/1/76>
- [58] A. Gupta, D. Lloyd, S. C.-M. S. and E. A., and undefined 2001, "Precipitation hardening in Al–Mg–Si alloys with and without excess Si," *Elsevier* AK Gupta, DJ Lloyd, SA Court *Materials Science and Engineering: A*, 2001 • *Elsevier*, Accessed: Jun. 24, 2024.

- [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509301012473>
- [59] K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck, J. K.-P. Procedia, and undefined 2012, “Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting,” *ElsevierK Kempen, L Thijs, J Van Humbeeck, JP KruthPhysics Procedia, 2012•Elsevier*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212025862>
- [60] J. Bracken *et al.*, “Design for metal powder bed fusion: The geometry for additive part selection (GAPS) worksheet,” *Addit Manuf*, vol. 35, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101163.
- [61] “Why do you need to optimize your FEA model? | SDC Verifier.” Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://sdcverifier.com/articles/why-do-you-need-to-optimize-your-fea-model/>
- [62] S. Guanghui, G. Chengqi, ... Q. D.-C. J. of, and undefined 2020, “An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing,” *ElsevierSHI Guanghui, G Chengqi, Q Dongliang, WU Dongtao, T Lei, GAO TongChinese Journal of Aeronautics, 2020•Elsevier*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936119303358>
- [63] D. Gunwant and A. Misra, “TOPOLOGY OPTIMIZATION OF CONTINUUM STRUCTURES USING OPTIMALITY CRITERION APPROACH IN ANSYS,” 2012.
- [64] A. Çelebi and E. Zerina Appavuravther, “Analyzing the Effect of Voxel-Based Surface Mesh Application on Residual Stress with Simufact Additive Software.”
- [65] “Netform Metal, Simufact.Additive, (2018, February 2), [Online]. Available: http://www.netformmetal.com/en/simufact_additive.asp 2 February 2018”.
- [66] “MSC Software Company, (2018, February 1), [Online]. Available: <https://www.simufact.com/simufact-additive.html> 1 February 2018”.
- [67] I. Hwang, P. Mehmert, 논문집 M. T.-한국정밀공학회 학술발표대회, and undefined 2017, “Metal additive manufacturing process simulation for the hinge of the engine hood,” *dbpia.co.krIH Hwang, P Mehmert, M Tran 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 2017•dbpia.co.kr*, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE07300735>
- [68] J. Litzkow, I. Hwang, ... P. M.-한국정밀공학회 학술발표, and undefined 2017, “Simufact additive 1.0—a new era in simulating 3D-printing processes,” *dbpia.co.krJ Litzkow, IH Hwang, P Mehmert, R Bernhardt 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 2017•dbpia.co.kr*, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE07205458>
- [69] M. Markl, C. K.-P. technology, and undefined 2018, “Powder layer deposition algorithm for additive manufacturing simulations,” *ElsevierM Markl, C KörnerPowder technology, 2018•Elsevier*, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.02.026.
- [70] L. Meng *et al.*, “From topology optimization design to additive manufacturing: Today’s success and tomorrow’s roadmap,” *SpringerL Meng, W Zhang, D Quan, G Shi, L Tang, Y Hou, P Breitkopf, J Zhu, T GaoArchives of Computational Methods in*

Engineering, 2020•Springer, vol. 27, no. 3, pp. 805–830, Jul. 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09331-1.

[71] J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, and B. Lauwers, “Selective laser melting of iron-based powder,” *ElsevierJP Kruth, L Froyen, J Van Vaerenbergh, P Mercelis, M Rombouts, B LauwersJournal of materials processing technology*, 2004•Elsevier, vol. 149, pp. 616–622, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.

[72] P. Mercelis, J. K.-R. prototyping journal, and undefined 2006, “Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting,” *emerald.comP Mercelis, JP KruthRapid prototyping journal*, 2006•emerald.com, doi: 10.1108/13552540610707013.

[73] T. DebRoy, H. Wei, J. Zuback, ... T. M.-P. in M., and undefined 2018, “Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties,” *ElsevierT DebRoy, HL Wei, JS Zuback, T Mukherjee, JW Elmer, JO Milewski, AM BeeseProgress in Materials Science*, 2018•Elsevier, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172>

[74] M. Jabbari *et al.*, “Multiphysics modelling of manufacturing processes: A review,” *journals.sagepub.comM Jabbari, I Baran, S Mohanty, R Comminal, MR Sonne, MW Nielsen, J SpangenbergAdvances in mechanical engineering*, 2018•journals.sagepub.com, vol. 10, no. 5, p. 2018, May 2018, doi: 10.1177/1687814018766188.

[75] W. King, A. T. Anderson, R. M. Ferencz, N. E. Hodge, C. Kamath, and S. A. Khairallah, “Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory,” *journals.sagepub.comW King, AT Anderson, RM Ferencz, NE Hodge, C Kamath, SA KhairallahMaterials Science and Technology*, 2015•journals.sagepub.com, vol. 31, no. 8, pp. 957–968, Jun. 2015, doi: 10.1179/1743284714Y.0000000728.

[76] B. Vrancken, V. Cain, R. Knutsen, J. V. H.-S. Materialia, and undefined 2014, “Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting,” *ElsevierB Vrancken, V Cain, R Knutsen, J Van HumbeeckScripta Materialia*, 2014•Elsevier, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646214002164>

[77] X. Huang, Z. Liu, H. X.-A. M. S. Sinica, and undefined 2013, “Recent progress in residual stress measurement techniques,” *Elsevier*, vol. 26, no. 6, 2013, doi: 10.1016/S0894-9166(14)60002-1.

[78] C. Y. Yap *et al.*, “Review of selective laser melting: Materials and applications,” *Appl Phys Rev*, vol. 2, no. 4, Dec. 2015, doi: 10.1063/1.4935926/13246136/041101_1_ONLINE.PDF.

[79] D. Greitemeier, C. Dalle Donne, F. Syassen, J. Eufinger, and T. Melz, “Effect of surface roughness on fatigue performance of additive manufactured Ti–6Al–4V,” *journals.sagepub.comD Greitemeier, C Dalle Donne, F Syassen, J Eufinger, T MelzMaterials Science and Technology*, 2016•journals.sagepub.com, vol. 32, no. 7, pp. 629–634, Jun. 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000053.

[80] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, M. G.-A. Manufacturing, and undefined 2021, “Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities,” *ElsevierE Maleki, S Bagherifard, M Bandini, M GuaglianoAdditive Manufacturing*, 2021•Elsevier, Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221486042030991X>

- [81] J. Pakkanen *et al.*, “Study of Internal Channel Surface Roughnesses Manufactured by Selective Laser Melting in Aluminum and Titanium Alloys,” *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 47, no. 8, pp. 3837–3844, Aug. 2016, doi: 10.1007/S11661-016-3478-7.
- [82] E. Padovano, C. Badini, A. Pantarelli, ... F. G.-J. of A. and, and undefined 2020, “A comparative study of the effects of thermal treatments on AlSi10Mg produced by laser powder bed fusion,” *ElsevierE Padovano, C Badini, A Pantarelli, F Gili, F D’AiutoJournal of Alloys and Compounds*, 2020•Elsevier, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838820311853>
- [83] J.-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, and M. Rombouts, “Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting,” *emerald.comJP Kruth, P Mercelis, J Van Vaerenbergh, L Froyen, M RomboutsRapid prototyping journal*, 2005•emerald.com, doi: 10.1108/13552540510573365.
- [84] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani, and D. Rosen, “Additive manufacturing technologies,” 2021, doi: 10.1007/978-3-030-56127-7.
- [85] T. DebRoy, H. Wei, J. Zuback, ... T. M.-P. in M., and undefined 2018, “Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties,” *ElsevierT DebRoy, HL Wei, JS Zuback, T Mukherjee, JW Elmer, JO Milewski, AM BeeseProgress in Materials Science*, 2018•Elsevier, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172>
- [86] E. Brandl, F. Palm, V. Michailov, B. Viehweger, C. L.-M. & Design, and undefined 2011, “Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti–6Al–4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire,” *ElsevierE Brandl, F Palm, V Michailov, B Viehweger, C LeyensMaterials & Design*, 2011•Elsevier, Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911004705>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı

e-mail

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	SBTÜ/ Savunma Teknolojileri	2024
Yüksek lisans	CÜ/ Nanoteknoloji Mühendisliği	2021
Lisans	SAÜ / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2016
Lise	Selçuk Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2024-Halen	Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2023-2024	TEZMAKSAN	Robot ve Otomasyon Mühendisi
2017-2019	ÇEDAŞ	Ölçü Devreleri Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Pürlü, K. M., Kocak, M. N., Yolcu, G., Perkitel, I., Altuntaş, İ., & Demir, I. (2022). Growth and characterization of PALE Si-doped AlN on sapphire substrate by MOVPE. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 142, 106464.
- Koçak, M. N., Pürlü, K. M., Perkitel, İ., Altuntaş, İ., & Demir, İ. (2022). In-situ and ex-situ face-to-face annealing of epitaxial AlN. *Vacuum*, 203, 111284.
- Simsek, I., Yolcu, G., Koçak, M., Pürlü, K., Altuntas, I., & Demir, I. (2021). Nucleation layer temperature effect on AlN epitaxial layers grown by metalorganic vapour phase epitaxy. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 25507-25515.

- Pürlü, K. M., (2020). MOVPE PALE Tekniği ile Safir Üzerine Si Katkılı AlN'ın Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu9. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (UBAK), 12/13 Aralık 2020, Ankara,*
- Pürlü, K. M., (2024). Topology Optimizastion And Hybrid Production Of A Robotic Arm Gripper With AlSi10Mg. *International Congress on Information Technologies in Medicine, Pharmacy, Agriculture, Food, Forestry, Environment, and Engineering (INFTEC - 2024) Tokat / Turkey, 08-10 May 2024*





**SİVAS
BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

KÖKLERDEN GÖKLERE...