

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYON İLE
TASARLANMIŞ PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Celalettin MERT

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

EKİM 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE TOPOLOJİ
OPTİMİZASYON İLE TASARLANMIŞ PARÇALARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Celalettin MERT

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Celalettin MERT tarafından hazırlanan “Eklemeli İmalat Yönteminde Topoloji Optimizasyon ile Tasarlanmış Parçaların Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 21 / 10 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

Başkan : Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT
Afyon Kocatepe Ün., Teknoloji Fak. İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM
Afyon Kocatepe Ün., Teknoloji Fak. İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Berkay ERGENE
Pamukkale Ün., Teknoloji Fak. İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21 / 10 / 2024

İmza

Celalettin Mert

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYON İLE TASARLANMIŞ PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Celalettin MERT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

Topoloji optimizasyonu, belirtilen yük koşullarını, performansı ve kısıtlamaları karşılayan makul malzeme dağılımı yoluyla optimum yapı konfigürasyonunu elde edebilen gelişmiş bir yapısal tasarım yöntemidir. Teknolojik gelişmeler ışığında topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat birbiri ile entegreli kullanılarak daha karmaşık ve dayanım olarak daha performanslı parçalar ortaya çıkarılmaktadır. Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin bu kadar önemli olmasının en temel nedeni parçaların mekanik özelliklerinde kötüleşmeye neden olmadan hafifletebilmeleri ve bununla birlikte parça maliyetlerinin düşürülmesidir. Çalışmada tek kancalı ve çift kancalı poşet taşıma aparatları üzerinde topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Taguchi metodu ile parçanın çekme ve eğilme dayanımları altındaki optimum parametreler belirlenmiştir. Topoloji optimizasyonu ile parça hafifletilmesi işlemleri ANSYS programıyla gerçekleştirilmiş, normal ve optimize edilen parçalar eklemeli imalat ile üretilmiştir. Üretilen parçalar çekme cihazında test edilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre topoloji optimizasyonu ile üretilen parçaların daha iyi sonuç verdiği görülerek çalışmanın başarısı ortaya konulmuştur. Daha ileriki çalışmalarda parça geometrisindeki iç yapıların optimizasyonları ve poşet taşıma aparatlarının tasarım geliştirmeleri yapılarak daha farklı çalışmalar oluşturulabilir.

2024, xi + 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Topoloji Optimizasyonu, Taguchi Metodu

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYON İLE TASARLANMIŞ PARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Celalettin MERT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst.Prof. Özgür VERİM

Topology optimization is an advanced structural design method that can achieve the optimum structural configuration through reasonable material distribution that meets specified load conditions, performance and constraints. In the light of technological advances, topology optimization and additive manufacturing are being integrated with each other to produce more complex and more durable parts. The main reason why topology optimization methods are so important is that they can lighten parts without causing deterioration in their mechanical properties and thus reduce part costs. In this study, topology optimization was performed on single-hook and double-hook bag handling apparatus. The optimum parameters under the tensile and flexural strengths of the part were determined by Taguchi method. Topology optimization and part lightening processes were carried out with ANSYS program and normal and optimized parts were produced by additive manufacturing. The produced parts were tested in a tensile machine and compared with each other. According to the test results, it was seen that the parts produced with topology optimization gave better results and the success of the study was demonstrated. In future studies, different studies can be created by optimizing the internal structures in the part geometry and design improvements of the bag carrying apparatus.

2024, xi + 56 pages

Keywords: Additive Manufacturing, Topology Optimization, Taguchi Method

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tezdanışmanım Sayın Dr. ğr. yesi zgr VERİM, araştırma ve yazım sresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Başkanım Bekir Sıddık Köylü ’ye her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay aileme teşekkür ederim.

Celalettin Mert
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI.....	II
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Eklemeli imalat.....	3
2.1.1. Eklemeli imalat yöntemleri.....	4
2.1.1.1 Fotopolimerizasyon (photopolimerization),.....	6
2.1.1.2. Malzeme püskürtme (material jetting)	6
2.1.1.3. Bağlayıcı püskürtme (binder jetting).....	7
2.1.1.4. Malzeme ekstrüzyon (material extrusion).....	8
2.1.1.5. Toz yataklı eritme (powder bed fusion)	8
2.1.1.6. Levhalı sac yöntemi (sheet lamination process).....	9
2.1.1.7. Direkt enerji depolama (directed energy deposition).....	10
2.1.2. Eklemeli imalat yaygın kullanım alanları	11
2.1.2.1. Havacılık sektöründe eklemeli imalat	11
2.1.2.2. Uzay sanayide eklemeli imalat.....	12
2.1.2.3. Otomotiv sanayide eklemeli imalat.....	13
2.1.2.4. Medikal alanında eklemeli imalat	13
2.1.2.5. Güncel yaşamda kullanılan eklemeli imalat.....	14
2.2.3. Türk Standartları Enstitüsünde (TSE) yayınlanmış eklemeli imalat standartları.....	15
2.2 Topoloji optimizasyonu	15
2.2.1. Topoloji optimizasyonu kullanım alanları	19
2.2.2.1. Otomotiv sektöründe topoloji uygulamaları.....	19
2.2.2.2. Medikal sektörde topoloji optimizasyonu	20

2.2.2.3. Havacılık ve uzay sektöründe topoloji optimizasyonu.....	20
2.2.2.4. Güncel yaşamda kullanılabilir topoloji optimizasyonları	21
2.3. Sonlu elemanlar metodu ile eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu.....	21
3. MATERYAL ve METOT	26
3.1 Poşet taşıma aparatının 3B modelinin belirlenmesi.....	26
3.2. Taguchi analizi.....	29
3.2.1. Deneysel tasarım ve optimizasyon.....	32
3.2.3. Numune Hazırlama ve Mekanik Testler	36
3.2.3.1. Mekanik Test Metodu	36
3.2.3.2. Çekme Test Kurulumu	37
3.2.3.3. Üç Nokta Eğme Testi	38
3.2.4. Test sonuçları tartışması ve kullanılacak yöntem seçimi.....	39
3.2.4.2. Eğme Testi Sonuçlarına Göre.....	42
4. BULGULAR	45
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	50
6. KAYNAKLAR.....	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

BİDT	Bilgisayar destekli tasarım
BDA	Bilgisayar destekli analiz
3B	Üç boyutlu
ASTM	American Society for Testing and Materials
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
SLA	Stereolitografi (Stereolithography-SL) teknolojisi
DLP	Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing-DLP)
BJ	Bağlayıcı püskürtme yöntemi (Binder Jetting, BJ)
PJ	Çoklu Püskürtme (Polyjet - PJ)
FDM	Eriyik yığarak modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM)
SLS	Seçmeli lazer sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS)
DMLS	Doğrudan metal tozu lazer sinterleme (Direct Metal Laser Sintering-DMLS)
EBM	Elektron Işınli Ergitme (Electron Beam Melting-EBM)
LOM	Lamine nesne imalatı (Laminated Object Manufacturing-LOM)
LENS	Lazerle Net Şekillendirme (Laser Engineered Net Shape-LENS)
EBAM	Elektron Işınli Eklemeli İmalat (Electron Beam Additive Manufacturing-EBAM)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli imalat kullanım amaçları dağılımı	3
Şekil 2.2. Eklemeli imalat teknolojilerinin uygulama alanları	4
Şekil 2.3. ASTM 42 Standartına göre eklemeli imalat sınıflandırılması	5
Şekil 2.4. Fotopolimerizasyon yöntemi ve bu yöntem ile üretilen ürünlere	6
Şekil 2.5. Malzeme Püskürtme yöntemi ile üretim şeması	7
Şekil 2.6. Bağlayıcı püskürtme yöntemi ile eklemeli imalat şeması	7
Şekil 2.7. Malzeme ekstrüzyonu 3D baskı sürecinin görüntüsü a) ekstrüzyon bileşenlerinin gösterimi, b) sürecin gösterimi ve kaynak konumu, c) kaynak oluşumunun ve zincir difüzyonunun gösterimi d) 8 katmanlı baskı işleminin görünür ışık görüntüsü ve e) 8 katmanlı baskı işleminin sahte renkli kızılötesi görüntüsü.....	8
Şekil 2.8. Toz yataklı ergitme yöntemi	9
Şekil 2.9. Direk enerji depolama yöntemi	10
Şekil 2.10. Topoloji optimizasyon uygulaması	16
Şekil 2.11. a) optimizasyon yapılacak uçak parçası 3d modeli b) model analizi c) topoloji optimizasyon sonucu	21
Şekil 2.12. Modellenen parça	23
Şekil 2.11. ANSYS Yapısal Analiz Modülüne Topoloji Optimizasyon Modülü Eklenmesi	24
Şekil 2.12. Optimizasyon süreci	24
Şekil 2.13. ANSYS Yapısal Analiz Modülüne Topoloji Optimizasyon Modülü Eklenmesi	24
Şekil 2.14. optimizasyon süreci	24
Şekil 3.1. a) Tek ve b) Çift kancalı poşet taşıma aparatları teknik ölçüleri	27
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan kancalı poşet taşıma aparatların 3b modelleri a) Tek kancalı model b) çift kancalı model	28
Şekil 3.3. a) Analiz şeması, b) 3B model, c) 3b Model analizi, d) Topoloji modeli, e)	

Üretime hazır model	29
Şekil 3.4. Mekanik Testler (a) Çekme Testi, (b) Üç Nokta Eğme testi.....	36
Şekil 3.5. Çekme mukavemeti için S/N oranları	41
Şekil 3.6. Çekme geriliminin olasılık grafiği.....	42
Şekil 3.7. Bükülme mukavemeti için S/N oranları	43
Şekil 3.8. Bükülme geriliminin olasılık grafiği.....	44
Şekil 4.1. Tek kancalı poşet taşıma aparatı sonlu elemanlar analiz sonuçları a) Topoloji optimizasyonu öncesi b) topoloji optimizasyonu c) Topoloji optimizasyonu sonrası.....	45
Şekil 4.2. Çift kancalı poşet taşıma aparatı sonlu elemanlar analiz sonuçları a) Topoloji optimizasyonu öncesi b) topoloji optimizasyonu c) Topoloji optimizasyonu sonrası	46
Şekil 4.3. Tek ve Çift kancalı poşet taşıyıcı aparatlarının çekme test uygulaması ve sonuçları	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Çelik malzeme Mekanik Elektrik ve Isıl özellikleri	23
Çizelge 2.2 Tasarım öncesi durumun tasarım 1 ve tasarım 2 karşılaştırılması	25
Çizelge 3.1 3D yazıcı parametreleri ve seviyeleri.....	33
Çizelge 3.2 L16 ortogonal dizisi ile deney tasarımı.....	35
Çizelge 3.3 Test Sonuçları.....	40
Çizelge 3.4 Çekme testinde S/N oranları için Varyans ANOVA'sı.....	41
Çizelge 3.5 ANOVA of Variance for S/N ratios on three point bending test.....	43
Çizelge 5.1 Tek kancalı poşet taşıma aparatı için optimizasyon öncesi, optimizasyon ve sonrası değerlerin karşılaştırılması.....	50
Çizelge 5.2 Çift kancalı poşet taşıma aparatı için optimizasyon öncesi, optimizasyon ve sonrası değerlerin karşılaştırılması.....	51

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1. Levhalı sac yöntemi ile eklemeli imalat	10
Resim 2.2. Eklemeli imalat ile imal edilmiş soldaki FAA onaylı T25 basınç sıcaklık sensörü sağdaki CFM için LEAP uçak motoru yakıt başlığı	11
Resim 2.3. Uzayda yer çekim kuvveti olmaksızın üretilmiş bir parça	12
Resim 2.4. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmek üzere hazırlanmış motor parçası . . .	13
Resim 2.5. Medikal sektöründe eklemeli imalat alanları a) kalp b) insan eli	14
Resim 2.6. Tek kancalı poşet taşıma aparatı	14
Resim 2.7. Topoloji optimizasyon döngüsü	20
Resim 2.8. Timsah makas makinası	22
Resim 3.1. Poşet taşıma aparatları.....	26
Resim 3.2 PLA numunesi çekme testi.....	37
Resim 3.3 PLA parçalarının Çekme testi.....	38

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat üretimi destekleyerek üretim yöntemlerinde devrim yaratmış bir imalat yöntemidir. Aynı zamanda eklemeli imalat alışılmamış bir yöntem olarak modern imalat tekniklerinden birisidir. 1970 yılında hızlı prototipleme yöntemi ile imalatın prototipini oluşturmak için geliştirilen üç boyutlu (3B) yazıcıların gelişmesi ile başlayan eklemeli imalat yöntemi, günümüzde imalat yönteminde büyük öneme sahiptir. Özellikle karışık parçaların imalatını kolaylaştıran eklemeli imalat geleneksel imalat yöntemleri ile imalatı mümkün olmayan parçaların imalatının yapılmasına olanak sağlamıştır (Özsoy ve Duman 2017).

Topoloji optimizasyonu bilgisayar destekli tasarımın yaygınlaşması, gelişen teknoloji ve artan rekabet sonucu kullanımı oldukça yaygınlaşmış olan parçanın en iyi şekilde modellenmesi yöntemidir. Temeli sonlu elemanlar yöntemine dayanan topoloji optimizasyonu gelişen teknoloji sayesinde BİDT yöntemleri ile daha doğru ve kolay elde sonuçlar elde edilebilir. Günümüzde birçok sektörde kullanılan (otomotiv, havacılık, vb.) bu yöntem ile ağırlık kütle ve hacimden kurtularak parçamızda fazlalık olan kısımların çıkartılarak daha hafif ve da az malzeme ile üretimi amaçlanmıştır. Ağırlık ve hacim yanı sıra enerjide tasarruf, hammadde ve malzeme tasarrufu, kompaktlık, mükemmellik gibi bazı hedeflere ulaşmamızda yardımcı olmaktadır. Optimizasyon sonucu ağırlık ve hacim en az seviyeye indirgenerek, sertlik en yüksek seviyeye çıkartılmış, stres düşmüş ve ürün maliyeti en aza indirgenmiştir (Kahraman ve Küçük 2020). Topoloji optimizasyonu yapabileceğimiz birçok yöntem ve kullanabileceğimiz bazı programlar mevcuttur. Bizim araştırmamızda kullanacağımız optimizasyon uygulamamız ANSYS uygulamasıdır. ANSYS uygulaması yardımı ile önceden tasarımı yapılmış olan parçamızın malzeme seçimi yapıldıktan sonra mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi ile ağırlık ve hacim azaltma yöntemi ile topoloji optimizasyonu yapacağız.

Mekanik özellikleri fiziksel ve mekanik özellikleri olarak ayrılmaktadır. Mekanik özellikleri genellikle sertlik, süneklik ve mukavemet gibi özelliklerine bakılır. Malzeme özelliklerini belirlemek için tahribatlı ve tahribatsız muayene usulleri mevcuttur. Araştırmamızda ele alacağımız tahribatlı muayenedir. Belli tahribatlı muayeneler

metalografik incelemeler, sertlik deneyi, çekme deneyi, basma deneyi, darbe deneyi, yorulma deneyi, sürünme deneyi, süneklik deneyi ve burulma deneyi olarak ayrılmaktadır (Savaşkan 2009). PLA malzemelerde mekanik özellikleri 3B yazıcının yazma sıcaklığı Kullanılan PLA malzemesinin hammaddesi, 3B yazıcı yazma hızı, malzemenin doluluk oranı, tabla sıcaklığı gibi etkenler malzeme özelliklerine etki etmektedir (Aydın, Yıldırım ve Çantı 2019). Çalışmamızda malzemenin çekme dayanımı özelliği ön planda tutularak BTA ve prototip çekme testi ile mekanik özelliklerini değerlendireceğiz.

Çalışmamızda ele alacağımız parçalarımızın bilgisayar destekli tasarım (BİDT), bilgisayar destekli analiz (BDA), üretim ve mekanik özelliklerinin değerlendirilmesini ve en doğru sonuca nasıl ulaşabileceğimizi ele alacağız. Parçalarımızın öncelikle mekanik gerilmelerinin birikme yönlerine göre farklı tasarımlarını kabaca BİDT yöntemi ile yapacağız. Tasarımlarımızı topoloji optimizasyon yöntemi için ele alacağımız ANSYS uygulaması sayesinde optimizasyon yaparak malzeme özelliği ve gerilmelere göre hacim azalma işlemi yapacağız. En az hacim ve en hafif parçayı uygulama yardımı ile modelleyip mekanik özelliklerini ele alacağız. Mekanik özelliklerine göre en uygun tasarımı modelleyerek 3B yazıcı ile imalatını yapacağız. İmalatını yaptığımız parçamızın mekanik özelliklerini çekme testine göre değerlendirmesini yapacağız.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

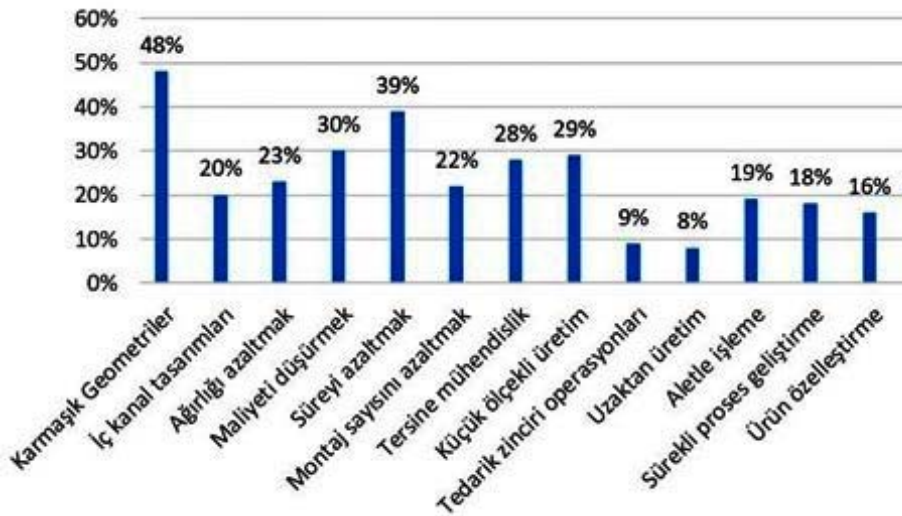
2.1 Eklemeli imalat

Eklemeli imalat yöntemi BİDT sonrası elde edilen parçanın katmanlar halinde 3B yazıcılar ile üretilmesidir. Bu yöntem tıp, havacılık, uzay, enerji vb. başlıca olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Üretimde bazı avantajları mevcut olup avantajları:

- Karmaşık yapıdaki malzemelerin tek parça üretilebilmesi,
- Malzeme tasarrufu,
- Optimizasyon ve kafes yapıli sistemler sayesinde elde edilen sonuç sayesinde daha hafif olması,
- Geleneksel imalat yöntemlerine göre daha esnek tasarımda olması,
- Karmaşık kanallara ve iç yapıya sahip parçaların tek seferde üretilebilmesi,
- Üretim süresi kısa olması

Gibi bazı avantajları mevcuttur (Bozer 2023).

2019 yılında yapılan bir araştırmaya göre eklemeli imalat kullanım alanlarının dağılımı verilen şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat kullanım amaçları dağılımı (Sürmen 2019).

2020 de TÜİK verilerine göre yapılan araştırmada eklemeli imalatın uygulama alanları Şekil 2.2’de grafikteki gibi oranlanmıştır.



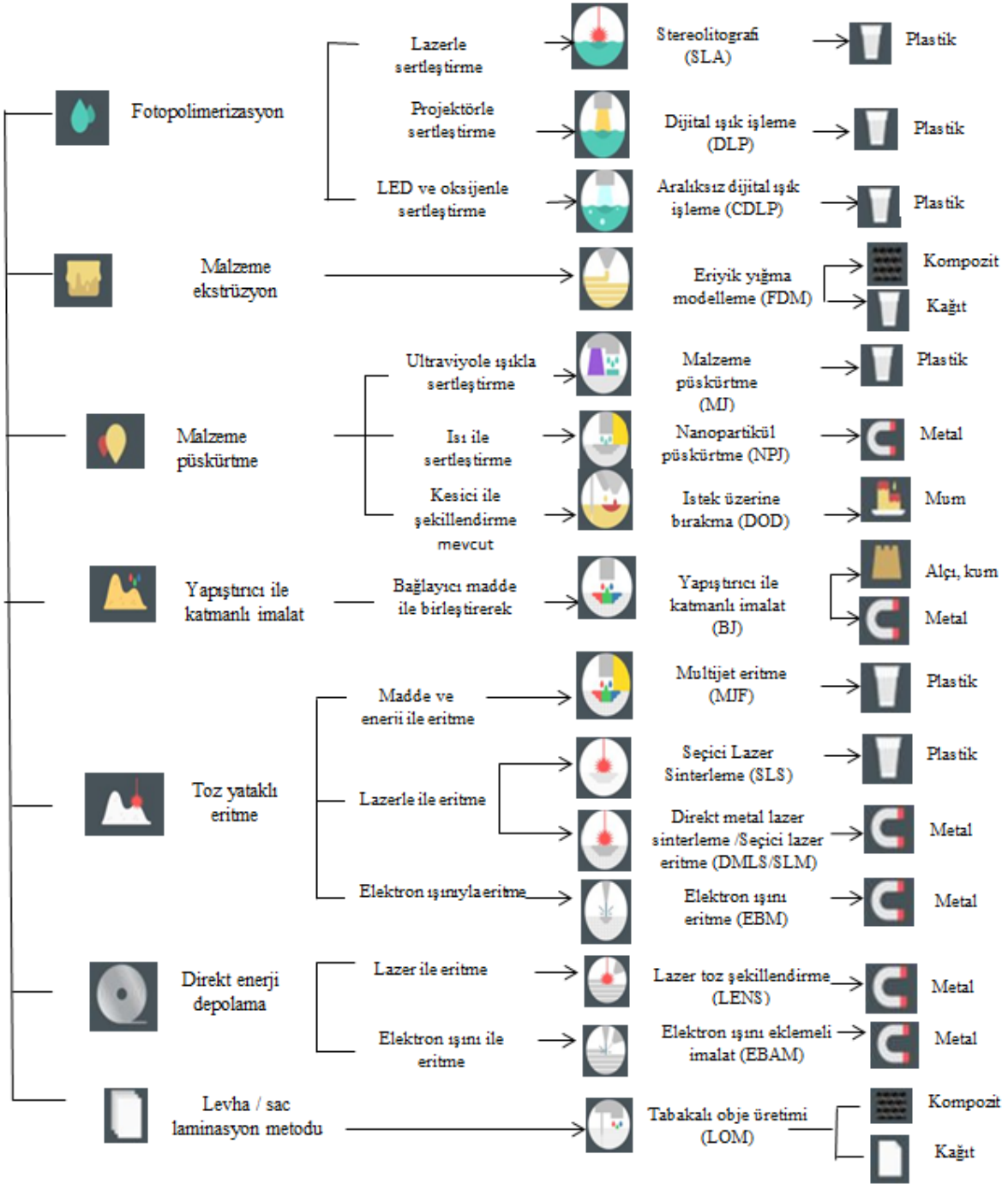
Şekil 2.2. Ekllemeli imalat teknolojilerinin uygulama alanları (Anonim 2020).

2.1.1. Ekllemeli imalat yöntemleri

Ekllemeli imalat genel olarak hammaddenin yapısına göre sınıflandırılmaktadır. Hammadde sac, toz, eriyik ve tel olabilmektedir. Aslında besleme malzemesi eriyik katılaşması Şeklinde gerçekteşmektedir

- Foto polimerizasyon
- Malzeme püskürtme
- Bağlayıcı püskürtme
- Malzeme ekstrüzyon
- Toz yataklı eritme
- Levhalı sac yöntemi
- Direkt enerji depolama

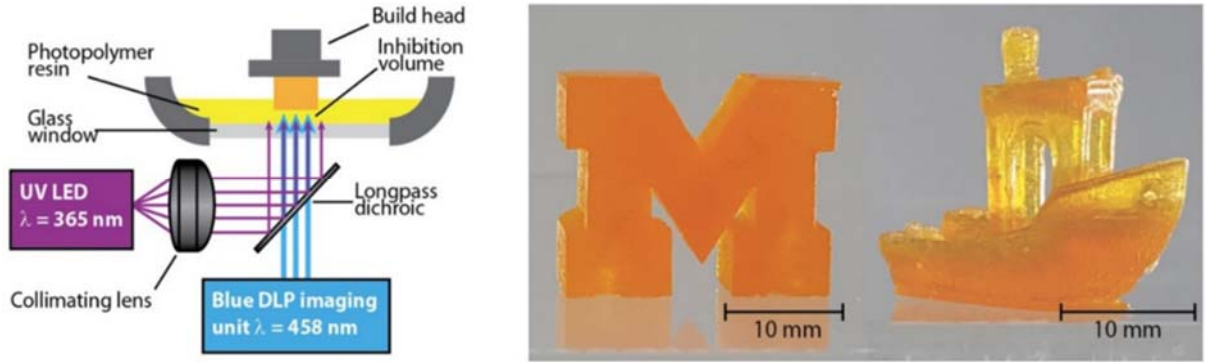
ASTM ekllemeli imalat grubu bu teknolojik ve dinamik üretim yöntemini ASTM 42’ye göre yedi kategoriye ayrılmıştır. Bu ayrılma yöntemleri Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. ASTM 42 Standartına göre eklemeli imalat sınıflandırılması (Yalçın ve Ergene 2017).

2.1.1.1 Fotopolimerizasyon (Photopolimerization),

Stereolitografi (Stereolithography-SL) teknolojisi (SLA) ve Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing-DLP) teknolojisine sahip Fotopolimer ve seramik malzeme kullanılan UV ışını ve Projeksiyon güç kaynağı ile üretimi yapılır. UV ışın yöntemi yüksek baskı hızı, yüksek parça çözünürlüğü, yüksek detay, malzeme maliyeti yüksek özelliklere sahiptir. Projeksiyon güç kaynağı yüksek baskı hızı, çözünürlük, projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır (Sürmen 2019). Şekil 2.4' de foto polimerizasyon yöntemi ile üretim şeması ve üretilmiş iki polimer malzeme gösterilmektedir (ASTM 2012).



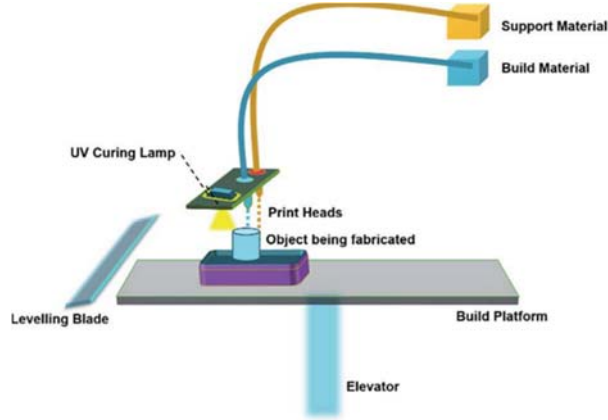
Şekil 2.4. Fotopolimerizasyon yöntemi ve bu yöntem ile üretilen ürünlere (Nohut ve Schwentenwein 2022).

2.1.1.2. Malzeme püskürtme (material jetting)

Malzeme püskürtme yöntemi Çoklu Püskürtme (Polyjet- PJ) teknolojisine sahiptir. Fotopolimer ve Wax malzemeler kullanılır. Güç kaynağı olarak UV ışın kullanılır. Özellik olarak:

- Çoklu malzeme ile baskı,
- İyi yüzey iş sonu,
- Yüksek doğruluk,
- Yüksek detay

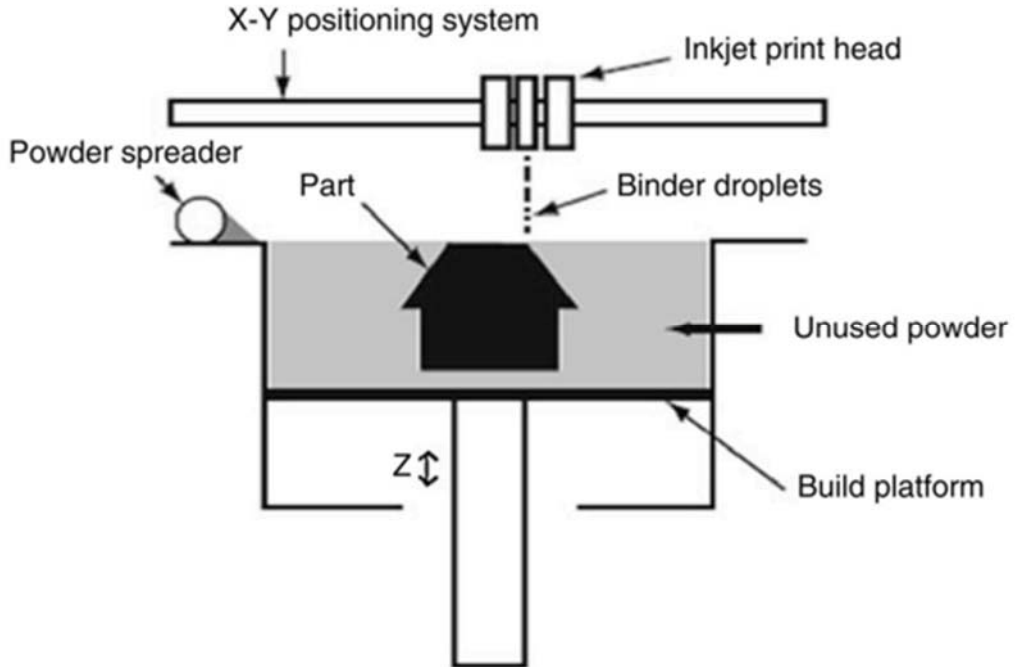
gibi özelliklerine sahiptir (Sürmen 2019). Şekil 2.5' de malzeme püskürtme yöntemi ile üretim şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Malzeme Püskürtme yöntemi ile üretim şeması (Gülcan, Günaydın ve Tamer 2021).

2.1.1.3. Bağlayıcı püskürtme (binder jetting)

Bağlayıcı püskürtme yöntemi (Binder Jetting, BJ) teknolojisini kullanmaktadır. Toz malzeme yapıştırma yöntemini kullanılmaktadır. Kullanılan malzemeler metal tozu, seramik tozu ve kumdur.

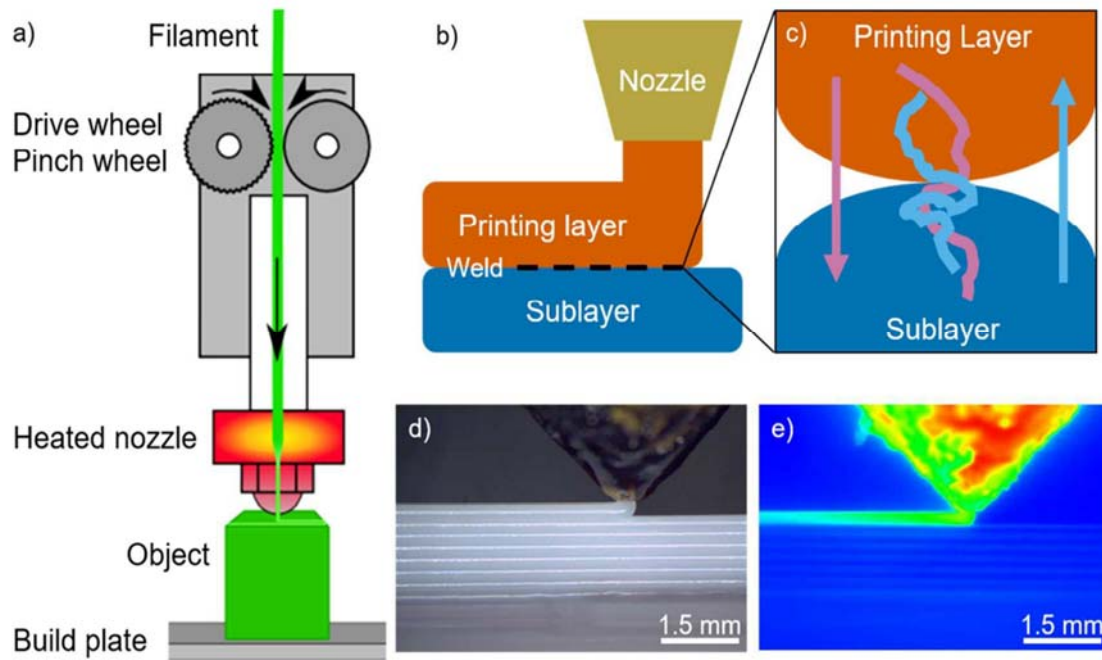


Şekil 2.6. Bağlayıcı püskürtme yöntemi ile eklemeli imalat şeması (Mirzababaei ve Pasebani 2019).

Termal enerji güç kaynağı ile üretim yapılmaktadır. Üretim özellikleri Renkli obje baskısı, Destek yapıları gerekmez, Geniş malzeme seçeneği, Yüksek baskı hızı, Son-işlem için infiltren malzeme gerektirir, Düşük dayanım, Yüksek gözeneklilik elde edilir (Sürmen 2019). Şekil 2.6 'de görseli verilmiştir.

2.1.1.4. Malzeme ekstrüzyon (material extrusion)

Stratasys Şirketi eriyik yığarak modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM) teknolojisi ile üretilen bu yöntem sıvı tip eriyik kategoride üretimdir. Termoplastik malzeme kullanılır. Termal enerji güç kaynağı ile üretim yapılır. Genel özellikleri Düşük yazıcı maliyeti, Çoklu malzeme ile baskı, Yüksek mukavemet, Düşük parça çözünürlüğü, Zayıf yüzey iş-sonu, Düşük baskı hızı yapmasıdır (ASTM 2012). Şekil 2.7' de malzeme ekstrüzyon yöntemi gösterilmiştir.

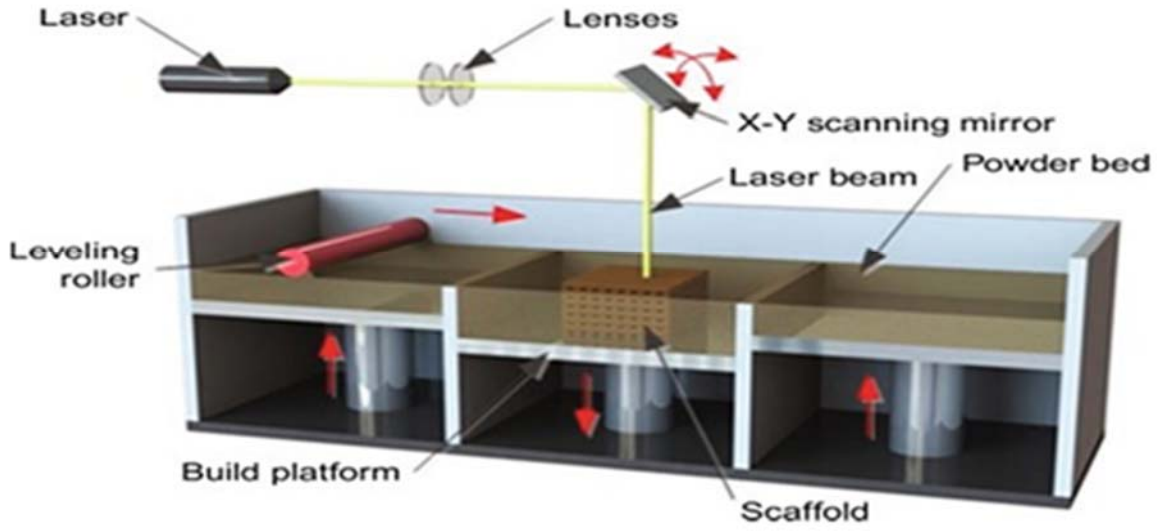


Şekil 2.7. Malzeme ekstrüzyonu 3D baskı sürecinin görüntüsü a) ekstrüzyon bileşenlerinin gösterimi, b) sürecin gösterimi ve kaynak konumu, c) kaynak oluşumunun ve zincir difüzyonunun gösterimi d) 8 katmanlı baskı işleminin görünür ışık görüntüsü ve e) 8 katmanlı baskı işleminin sahte renkli kızılötesi görüntüsü (Seppala, Han vd. 2017).

2.1.1.5. Toz yataklı eritme (powder bed fusion)

Toz yataklı eritme yöntemi Toz malzemeyi eritme yöntemi ile baskı yapmaktadır.

Seçmeli lazer sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS), doğrudan metal tozu lazer sinterleme (Direct Metal Laser Sintering-DMLS), SLM, Elektron Işınli Ergitme (Electron Beam Melting-EBM), yöntemleri ile üretim yapılmaktadır. SLS teknolojisinde Poliamid ve Polimer malzeme, DMSL, SLM ve EBM teknolojilerinde metal tozu ve seramik tozu kullanılmaktadır. Lazer ışını güç kaynağı ile yapılan bu üretimde Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilir ve Son-işlem gerekir (Sürmen 2019). Şekil 2.8 'da toz yataklı ergitme yöntemi şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Toz yataklı ergitme yöntemi (Singh, Gupta vd. 2020).

2.1.1.6. Levhalı sac yöntemi (sheet lamination process)

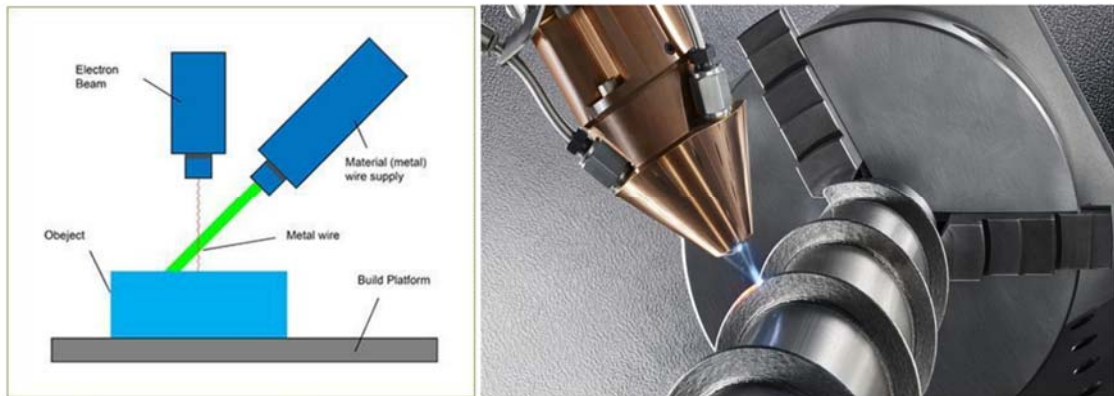
Sac levha yöntemi katı malzeme ve yapışık ojeleme kategorisindedir. Lamine nesne imalatı (Laminated Object Manufacturing-LOM) teknolojisi ile kağıt, plastik film, metalik sac, seramik bant malzemeleri kullanılır. Lazer ışın güç kaynağı kullanılan bu yöntemin özellikleri, iyi yüzey iş-sonu, yazıcı, malzeme, proses, maliyeti düşük, büyük boyutlu malzeme basabilme, dikey yönde zayıf mukavemet elde edilir (Sürmen 2019). Resim 2.1'de levhalı sac yöntemi ile eklemeli imalat şeması ve sac levha yönteminin oluşum görselini vermektedir.



Resim 2.1. Levhalı sac yöntemi ile eklemeli imalat (Singh, Gupta vd. 2020).

2.1.1.7. Direkt enerji depolama (directed energy deposition)

Direk enerji depolama yönteminde toz malzeme eritme yöntemi ile üretim yapılır. Lazerle Net Şekillendirme (Laser Engineered Net Shape-LENS) ve Elektron Işınlı Eklemeli İmalat (Electron Beam Additive Manufacturing-EBAM) teknolojileri kullanılan bu üretimde Eritilmiş metal tozu lazer ışın güç kaynağı ile üretilir. Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme ve Son-işlem gerekir (Sürmen 2019). Şekil 9’da Direkt enerji depolama yöntemi gösterilmiştir. Şekil 2.9 ‘da bu yöntemin görseli verilmiştir.



Şekil 2.9. Direkt enerji depolama yöntemi (Singh, Gupta vd. 2020).

2.1.2. Eklemeli imalat yaygın kullanım alanları

Araştırmalarımıza göre eklemeli imalat birçok alanda kullanılmaktadır. Eklemeli imalat gelende karışık parçaların imalatında tek parça üretim amacı ile birçok yerde kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılan eklemeli imalatlar alt başlıklarda ele alınmıştır.

2.1.2.1. Havacılık sektöründe eklemeli imalat

Havacılık sektöründe eklemeli imalat yöntemi vazgeçilmez bir üretim yöntemidir. Özellikle motor parçalarında zorunlu imalat yöntemi diyebiliriz. Uçak motorunda bazı parçaların eklemeli imalat yöntemi dışında üretilmesi mümkün değildir.



Resim 2.2. Eklemeli imalat ile imal edilmiş soldaki FAA onaylı T25 basınç sıcaklık sensörü sağdaki CFM için LEAP uçak motoru yakıt başlığı (Özsoy, Duman ve Gültekin).

Yüksek teknoloji gerektiren üretim makineleri parçanın hatasız, dayanıklı ve karışık bir şekilde üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum bazı gövdeyi bağlayan malzemelerde de geçerlidir (Bozer 2023). Resim 2.2 ‘de uçak motoru yakıt başlığı görseli

mevcuttur.

2.1.2.2. Uzay sanayide eklemeli imalat

İnsanlığın ilerleyen dönemde uzayda yürüteceği belirlemekteki en büyük faaliyeti uzayda yapılan çalışmalardır. Uzay araştırmacıları tarafından uzayda imalatı yapılması gereken karışık ve farklı tarzda parça üretmek istenmesi durumunda eklemeli imalat yöntemi günümüz teknolojisi en uygun yöntemlerden birisidir. İmalatın en büyük sorunlarından bir tanesi olan yer çekimi olmaması bu hedefi gerçekleştirmeyi zora sokmaktadır. Yer çekimsiz üretim günümüzde uzay ve havacılık ortamında üretim yapan firmaların çalışma konusudur. Made In Space firması uzayın 3B yazıcısı NASA tarafından 2016 da uluslararası uzay istasyonunda 200 den fazla parça imal etmiştir. Cranfield, Nottingham, Clausthal gibi üniversiteler dede yer çekimsiz imalat araştırılmaktadır(Özsoy, Duman ve Gültekin). Resim 2.3’de eklemeli imalat yöntemi ile uzayda üretilmiş bir parça mevcuttur.



Resim 2.3. Uzayda yer çekim kuvveti olmaksızın üretilmiş bir parça (Anonim 2020).

2.1.2.3. Otomotiv sanayide eklemeli imalat

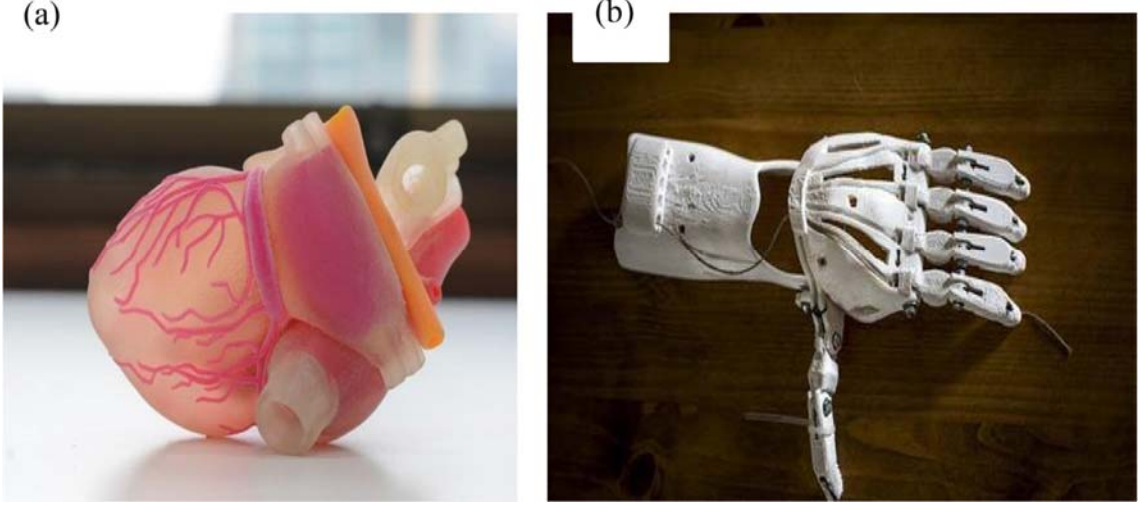
Otomotiv sektöründe eklemeli imalat yöntemi hafifletilmiş karmaşık parçaların üretimi sürecinde kullanılabilir. Bazı yenilikçi tasarımlar karmaşık parça yapısı nedeni ile geleneksel yöntemlerle üretimi yapılamamaktadır. Eklemeli imalat yöntemi geleneksel yöntemler dışında tasarımı karışık parçaların üretilmesine olanak sağladığından üretimine olanak sağlamaktadır. Şekil de görüldüğü gibi motor bloğuna kasnakların bağlanmasını sağlayan parça gösterilmiştir (Görür 2018). Resim 2.4'de eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş bir motor parçası görseli mevcuttur.



Resim 2.4. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmek üzere hazırlanmış motor parçası (Görür 2018).

2.1.2.4. Medikal alanında eklemeli imalat

Medikal alanda kullanılan eklemeli imalat yöntemleri genellikle kırılmış olan kemiklerin birleştirilmesi veya destek parça ile güçlendirme işlemi ile yapılmaktadır. Şekilde kırılmış alt çene kemiğinin eklemeli imalat yöntemi ile tasarlanmış bir parça yardımı ile birleştirilmesi işlemi yapılmaktadır (Öney 2021). Resim 2.5 'de medikal sektörde eklemeli imalat ile üretilmiş medikal parçaların görseli mevcuttur.



Resim 2.5. Medikal sektörde eklemeli imalat alanları a) kalp b) insan eli (Singh, Gupta vd. 2020).

2.1.2.5. Güncel yaşamda kullanılan eklemeli imalat

Güncel yaşamda birçok alanda eklemeli imalat ile üretilmiş malzemeye rastlayabiliriz. Bunlardan birisi tezimizde üretecek olduğumuz çanta tutacağıdır. Resim 2.6 'da Bu tutacağımızın resmini görüntülenmektedir.



Resim 2.6. Tek kancalı poşet taşıma aparatı

2.2.3. Türk Standartları Enstitüsünde (TSE) yayınlanmış eklemeli imalat standartları

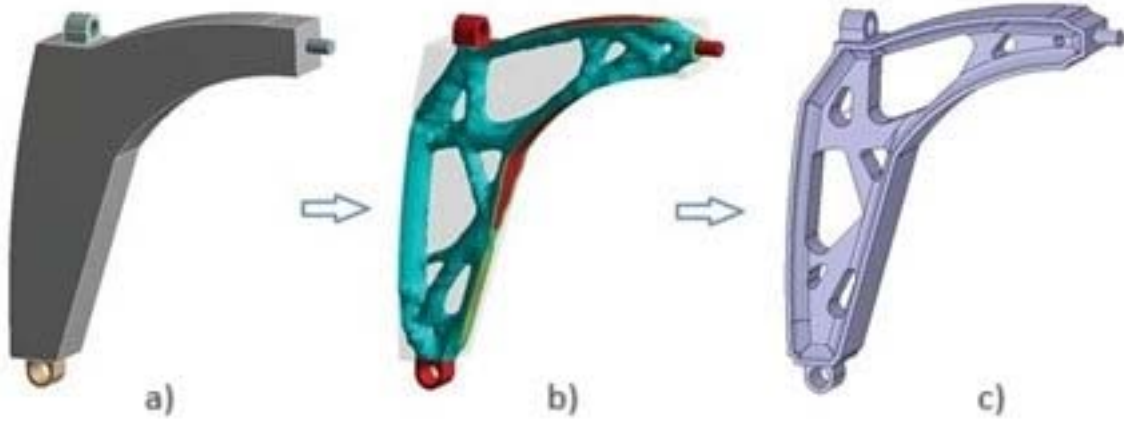
TSE, bir tanesi iptal olmakla beraber toplamda 12 adet standart yayınlamıştır. İptal olan standardın dışında kalan diğer 11 standart şu şekilde sıralanabilir:

- TS EN ISO ASTM 52907 Eklemeli imalat- Hammadde malzemeleri- Metal tozlarını karakterize etme yöntemleri (ISO / ASTM 52907:2019)
- TS EN ISO ASTM 52910 Eklemeli imalat- Tasarım- Gereklikler, kılavuz bilgiler ve tavsiyeler
- TS EN ISO ASTM 52900 Eklemeli imalat- Genel ilkeler- Temel bilgiler ve sözlük
- TSE EN ISO/ASTM/TR 52916 Tıbbi amaçlı eklemeli imalat- Veri- Optimize edilmiş tıbbi görüntü verileri
- TS EN ISO 17295 Eklemeli imalat- Genel ilkeler- Parça konumlandırma, koordinatlar ve yönelim
- TS EN ISO ASTM 52936-1 Polimerlerin eklemeli imalatı- Yeterlik ilkeleri Bölüm 1: Genel ilkeler ve PBF-LB için deney numunelerinin hazırlanması
- TS EN ISO ASTM 52931 Metallerin eklemeli imalatı- Çevre, sağlık ve güvenlik- Metalik malzemelerin kullanımı için genel ilkeler
- TS EN ISO ASTM 52920 Eklemeli imalat- Yeterlilik ilkeleri- Endüstriyel eklemeli imalat süreçleri ve üretim tesisleri için gereklikler
- TS EN ISO ASTM 52924 Polimerlerin eklemeli imalatı- Yeterlilik ilkeleri- Parça özelliklerinin sınıflandırılması
- TS EN ISO ASTM 52902 Eklemeli imalat- Deney artefaktları- Eklemeli imalat sistemlerinin geometrik kapasitesinin değerlendirilmesi
- TS EN ISO ASTM 52935 Metallerin eklemeli imalatı- Yeterlilik ilkeleri- Koordinasyon personelinin kalifikasyonu

2.2 Topoloji optimizasyonu

Bir parçanın şekil olarak optimize edilmesi topoloji optimizasyonu olarak adlandırılmaktadır. Asıl amacı malzemenin mukavemetini koruyarak ağırlığın azaltılması

dolayısı ile parçanın daha az malzeme ile üretilmesini amaçlamaktadır. Parçanın şekil sınırları verilir ve bu sınırlar çerçevesinde malzeme özelliğine göre mukavemeti sorunsuz olmak şartıyla malzemenin fazlalık parçaları çıkartılır. Malzemenin optimum dağılımı belirlemek için matematiksel algoritmalar kullanılır. Böylece malzemeye şekil optimizasyonu yapılarak yapının performansını şeklini değiştirerek en iyi seviyeye ulaştırılmaktadır. Yapısal tasarımlarda malzemenin şeklini değiştirmekte amaç malzemenin maliyetinin düşürülmesi, enerji verimliliği, malzeme hacim ve ağırlık en düşük seviyede tutulması, performans ve verimlilik artırılması amacı ile şekil ve topoloji optimizasyonu yöntemleri kullanılmaktadır (Konal 2023).



Şekil 2.10. Topoloji optimizasyon uygulaması (İnt.Kyn.1 07/01/2023).

Şekil 2.10'da ele alınan a parçası topoloji optimizasyonu sonrası şekli ve özellikleri değiştiği görülmektedir. Elde edilen yapı ile ele alınan yapı arasında çok fazla fark vardır. Ele alınan a malzemesi tamamen dolu şekilde iken elde edilen b parçası optimizasyon sonrası elde edilmiş ve c şeklinde üretime hazır hale getirilmiştir (Vuijk 2020). Çalışmasında uygulanabilir ve yaygın olarak kullanılan Cezalı katı izotropik malzeme (SIMP) yaklaşımı kullanmıştır, Bendsoe ve Kikuchi tarafından 1988'de keşfedilen elemanı başına ($W_{den,e}$) yoğunluğu en aza indirme amacına sahiptir.

$$W_{den,e} = \frac{\frac{1}{2}U_e^T K_e U_e}{v_e} \quad (2.1)$$

Bir elemanın yoğunluğu onun E_e sertliğine bağlıdır. Yani yoğunluğun azalması onun

sertliğinin azalmasını sağlayacaktır (Vuijk 2020).

$$E_e = \rho_e^p \cdot E_{0,e}, K_e = \rho_e^p \cdot K_0, \quad (2.2)$$

E_e Değişimi K_e değişimine bağlı olduğundan 2.2'deki değerleri 2.1 denkleminde yerine koyduğumuzda 2.3 denklemi elde edilir.

$$\frac{\delta W_{den,e}}{\delta p_e} = -p \cdot p_e^{(p-1)} \frac{\frac{1}{2} u_e^T K_{0,e} u_e}{V_e} \quad (2.3)$$

Young modülü ile gerinim enerjisini en aza indirmek için sertiği değiştirmektir. (Vuijk 2020) konveksiyonel bir fonksiyon olan p_e değişkeni 0 ile 1 arasındadır. Doğrusal bir çizgiden seçilemeyecek olan bu değişken p_e^p 'den seçilir. Böylece değer 0 yada 1 e yakın seçilmek için zorlanır. Dolayısı ile bu homojenleşme methodu olarak adlandırılır. Yoğunluk bulunabilmesi için denklemi 0 a eşitlememiz gerekir (Vuijk 2020).

$$\frac{\delta W_{den,e}}{\delta p_e} = 0 \quad (2.4)$$

Oluşturulan geometriye optimizasyon başladığında her yenileme aşağıdaki adımlardan oluşur. (Vuijk 2020)

- Her eleman için gerinim enerji değeri hesaplanır
- Duyarlılık erişimi 0 a eşit yerlerde p_e değeri bulunur.
- Bulunan değer bir sonraki iterasyon için hazırlanır.

Durdurma kriterleri sağlanana kadar bu devam eder. Bunlara örnek olarak hacim kısıtlamaları veya maksimum yineleme miktarı verilebilir. (Vuijk 2020)

Evrimsel yapısal optimizasyon 'Evolutionary Structural Optimization' (ESO) ise gerilime odaklanarak optimizasyon yapar Verimsiz elementler ortadan kaldırılır (Vuijk 2020).

$$\sigma_{VM,e} \leq RR \cdot \sigma_{VM,max} \quad RR = r_1 \cdot SS + a_{RR} \cdot ON \quad (2.5)$$

$$\sigma_{VM,e} \leq IR \cdot \sigma_{VM,max} \quad IR = 1 - i_1 \cdot SS - a_{IR} \cdot ON \quad (2.6)$$

RR inkâr etme oranı, IR ise dahil etme oranıdır. 0 ile 1 arasında değişen bunlar , malzemenin eksiltilmesi veya dahil edilmesinde rol oynayan faktörlerdir. $\sigma_{VM,e}$, malzemenin akma gerilmesidir, $\sigma_{VM,max}$ ise izin verilen maksimum akma gerilmesidir. ON 1'er 1'er artan salınım sayısıdır. Bir sonraki iterasyonda eleman eksiltildiğinde veya çıkarıldığında gerçekleşir. SS her kararlı durum oluştuğunda 1 arttırılan kararlı durum sayısıdır. Hiçbir eleman eksilmediği ve dahil olmadığı durumda oluşur. a_{RR} ve a_{IR} deneyerek bulunmuş sabitlerdir. $a_{RR} = 0,01$ ve $a_{IR} = 0,1$ alınması önerilir. r_1 ve i_1 de deneyerek bulunmuştur ve $r_1 = 0,001$ ve $i_1 = 0,01$ alınması önerilir. İterasyon döngüsü SIMP yaklaşımına benzer olarak aşağıdaki gibidir (Vuijk 2020) ;

- Her eleman için Von Mises gerilim değeri bulunur.
- Elemanların gerilim değerlerine göre eklenmesi mi, yoksa çıkartılması mi ya da aynı kalması mı gerektiği tespit edilir. Bulunan değer bir sonraki iterasyon için uygulanır.
- Kararlı duruma ne derece yaklaştığı belirlenir, kararlı duruma yaklaşıncı ilk aşamaya dönlür. Bu vektör 0 ile 1 arasındaki değerlerden oluşur ve her elemanın Young modülü ile çarpılır. Vektör 0'a yakın olunca çıkarılır, 1'e yakın olunca eklenir.

Amaç fonksiyonu, performans indeksine (PI) eşittir; L yapının uzunluğunu, V elemanın hacmini ve F giriş kuvvetidir temsil eder. Burada amaç fonksiyonunun yalnızca geometrinin performansını tanımladığı ancak optimizasyon algoritmasından etkilenmediği unutulmamalıdır. Reddedilme ve dahil edilmeden kaynaklanan bir olaydır. Büyük ve karmaşık konstrüksiyonlar için evrimsel yaklaşım yöntemi kullanmak daha olduğu düşünülmektedir (Vuijk 2020).

Karşılaştıracak olursak iki optimizasyon yöntemi arasındaki temel fark duyarlılık analizidir. SIMP'nin bir işlevi değerlendirdiği ve hassasiyetin 0 olduğu yoğunluk faktörünü bulmak için bir optimizasyon algoritması kullandığı durumlarda, BESO yöntemi, akma geriliminin dahil edilme veya reddedilme oranının bir eşik değerini varsayarak daha kaba bir yaklaşım sergiler. SIMP'nin duyarlılık analizi, çok sayıda öge

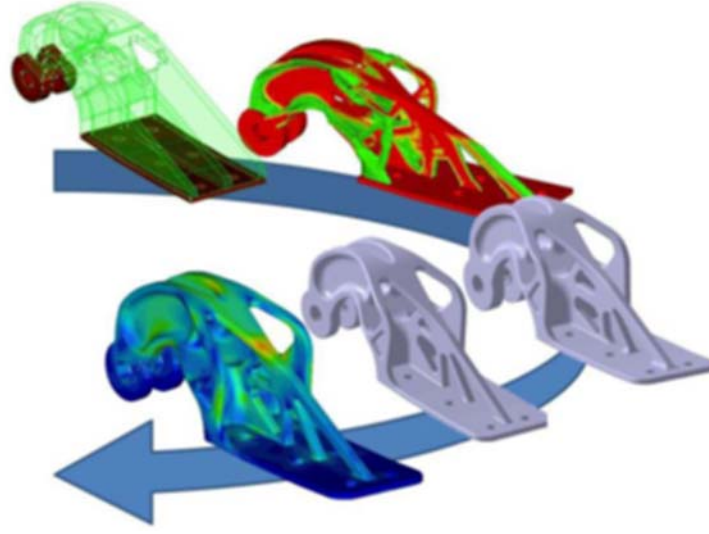
içeren bir modelde sorun haline gelebilir çünkü duyarlılığın sıfır olduğu yeri bulmak hesaplama açısından daha pahalıdır. Diğer bir fark ise SIMP yöntemiyle elemanın gerçekçi olmayan bir malzemeye benzeyen sanal bir yoğunluğa sahip olabilmesidir. Ancak homojenleştirme yoluyla kısmen boş, kısmen malzemeye benzemelidir. Her iki optimizasyon türü de insan girişi gerektirir ve bu da onları buluşsal hale getirir. SIMP bir cezalandırma faktörü gerektirir ve evrimsel yöntemler belirlenen oranları gerektirir (Vuijk 2020).

2.2.1. Topoloji optimizasyonu kullanım alanları

Topoloji optimizasyonu sanayi otomotiv, medikal, uzay, havacılık ve güncel yaşamda farklı malzemelerin üretim öncesinde uygulanan bir yöntemdir.

2.2.2.1. Otomotiv sektöründe topoloji uygulamaları

Otomotiv sektöründe topoloji optimizasyon yöntemi geniş alanda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları motor parçaları, şasi tasarımı, kasnak bağlantı ayakları, rulman yatakları, ayak fren pedalı ve diğer pedallar gibi alanlarda topoloji optimizasyon yapılmaktadır (Kahraman ve Küçük 2020). Resim 2.7 'de topoloji optimizasyon döngüsü verilmiştir. Otomotiv sektöründe topoloji optimizasyonu daha karışık parçaların üretilebilmesi için motor kısmında metal malzemelerin optimizasyonu ve eklemeli imalat ile üretimi ile oluşurken diğer kısımlarda kompozit ve plastik PLA malzemelerin üretim ve tasarımında topoloji optimizasyonu yapılır. Topoloji optimizasyonu otomobil gibi daha az kütle ile daha dayanıklı malzeme elde edilmesi istenilen bir sektörde kullanılmaması mümkün değildir. Optimizasyon sonucu malzememizin daha hafif ve daha az gerilme ile görevini görebilmesi ve yakıt, malzeme tasarımı yanı sıra göze hitap etmesi konusunda da otomotiv sektöründe topoloji optimizasyonu vazgeçilmez bir analiz yöntemidir.



Resim 2.7. Topoloji optimizasyon döngüsü (Görür 2018).

2.2.2.2. Medikal sektörde topoloji optimizasyonu

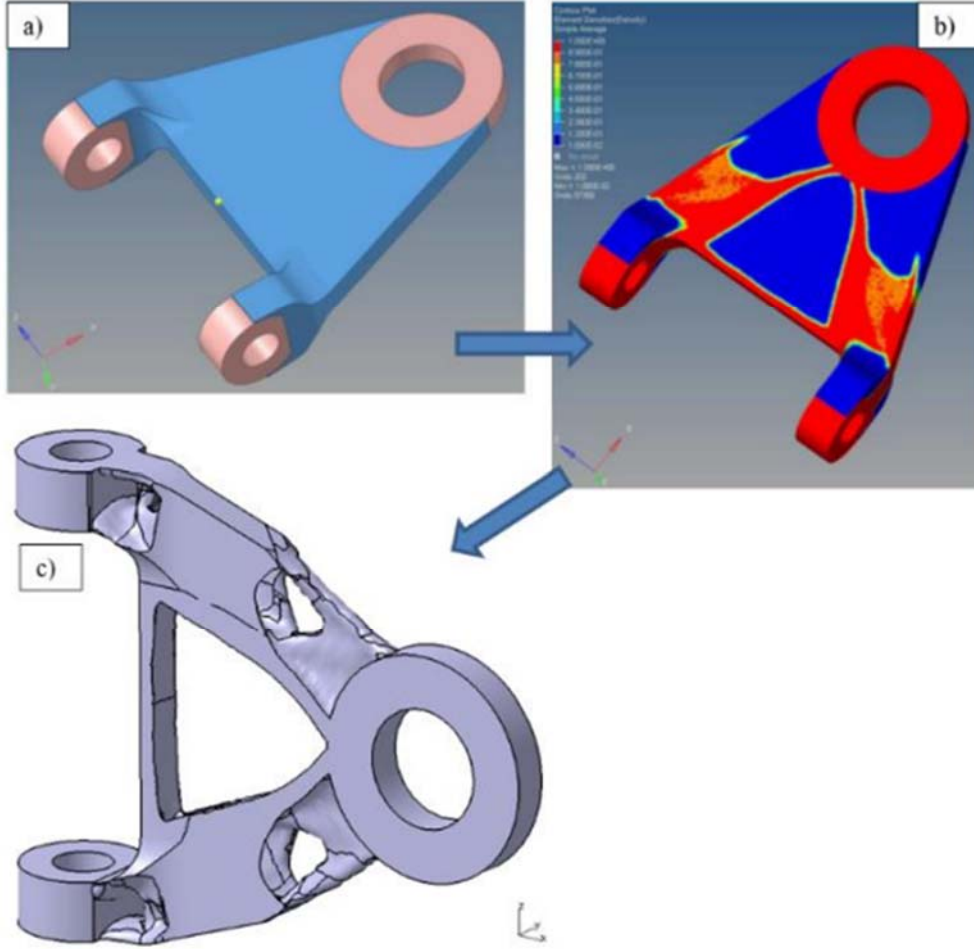
Medikal sektörde kullanılan eklemeli optimizasyon işlemi eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçanın hacim ve ağırlığının azaltılarak daha konforlu ve boyut dayanım oranının en uygun hale getirilmesi amacı ile yapılmalıdır. Topoloji optimizasyonu sayesinde medikal alanda kullanılan önemli üretimler mevcuttur. İstanbul’da eklemeli imalat alanında yapılan 2019 yılındaki çalışmalara göre, en yüksek yüzde orana (%19,2) sahip sektör medikal sektördür (Anonim 2023).

2.2.2.3. Havacılık ve uzay sektöründe topoloji optimizasyonu

Havacılık sektöründe en az ağırlık ile en fazla dayanım elde etmek amacı vardır. Bu amaç doğrultusunda topoloji optimizasyonu yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe üretilen hemen hemen her parçada kullanılan topoloji optimizasyonu yöntemi vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Şekil de gösterilen uçak kanadı içerisinde iskeletinde kullanılan optimizasyon uygulamasıdır (Ji-Hong Zhu 2016).

Uzay sanayide ağırlık azaltma amacı ile genelde topoloji optimizasyonu hemen her parça üretiminde uygulanması üretimin olmazsa olmazıdır. Şekil 2.11’de uzay sanayide

kullanılan bir parçanın optimize edilme süreci gösterilmiştir (Koçak 2023).



Şekil 2.11. a) optimizasyon yapılacak uçak parçası 3d modeli b) model analizi c) topoloji optimizasyon sonucu (Gülcan, Sokollu vd. 2022).

2.2.2.4. Güncel yaşamda kullanılabilir topoloji optimizasyonları

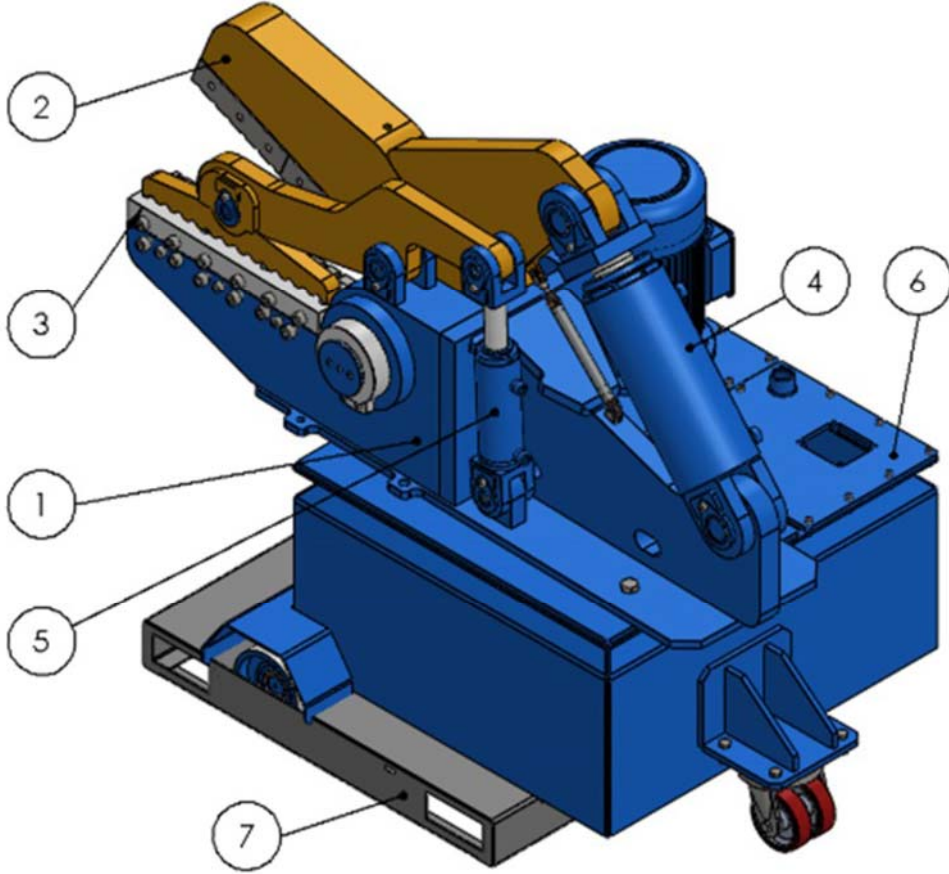
Güncel yaşamda bazı parçalar gerek ağırlıktan istifade etmek gerek ise görsel tasarım açısından daha gösteriş elde ederek hem görseelliği yükseltip hem de ham madde maliyetini düşürmek amacı ile topoloji optimizasyonu yapılmaktadır.

2.3. Sonlu elemanlar metodu ile eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu

ANSYS uygulaması birden çok işleve sahip mühendislik hesaplamalarını kolaylaştıran bir uygulamadır. Hesapları kolaylaştırmasının yanı sıra görsele dökerek üretip deneme

yanılma veya karmaşık hesapların içerisinde boğularak doğru sonuca ulaşmadaki zorlukları kolaylaştıran günümüz mühendislerinin kullandığı bir uygulamadır. Bazı arattırmalarda ANSYS uygulamasının yardımı ile topoloji optimizasyonu ve bunun sonucunda bazı parçaların eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmesini araştıracağız

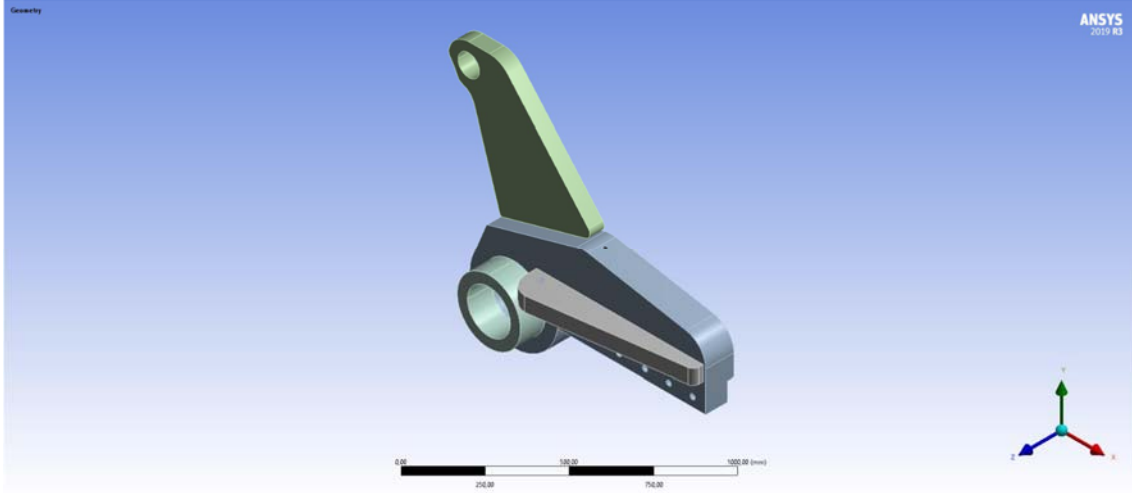
(Öğüçlü ve Yıldırım 2022). Araştırmasında bir geri dönüşüm makina parçasının ANSYS uygulaması sayesinde ağırlık ve maliyet düşürmek amacı ile topoloji optimizasyon yapmıştır. Araştırmasında ANSYS Workbench 2019 R3 kullanmıştır. Bir hurda makinesinin kesici üst çenesini SOLIDWORK uygulaması yardımı ile modellemiş ve ANSYS uygulamasına almıştır.



Resim 2.8. Timsah makas makinası (Öğüçlü ve Yıldırım 2022).

Resim 2.8’de gösterilen timsah makas makinesi üzerinde işaretlenmiş 2 numaralı kesici üst çeneyi topoloji optimizasyon yöntemi ile ANSYS uygulamasında ağırlık azaltacak ve

mekanik özelliklerini kontrol edecektir.



Şekil 2.22. Modellenen parça (Öğüçlü ve Yıldırım 2022).

Şekil 2.12'de Solidworks uygulamasında modellenen parçanın ANSYS uygulamasına gönderilmiş şekli mevcuttur.

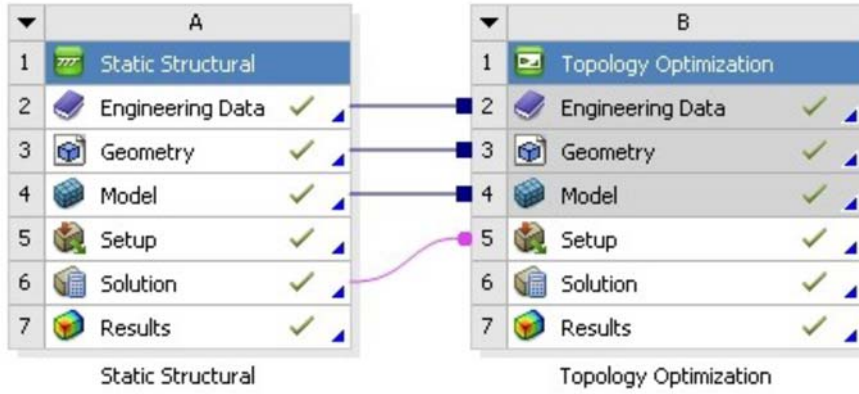
Kullanılan çelik malzemenin özellikleri çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çelik malzeme Mekanik Elektrik ve Isıl özellikleri (Öğüçlü ve Yıldırım 2022).

Yoğunluk (kg/m ³)	7,85E+03
Elastisite Modülü (MPa)	2,12E+05
Poisson Oranı (-)	0,29
Hacim Modülü (MPa)	1,68E+05
Kayma Modülü (MPa)	8,22E+04
Isıl Genleşme Katsayısı (1/oC)	1,10E-05
Çekme Dayanımı (MPa)	1070
Akma Dayanımı (MPa)	761
Isıl İletkenlik (W/mmoC)	0,0504
Özgül Isı (mJ/kgoc)	5,00E+05
Direnç (ohm.mm)	0,000184

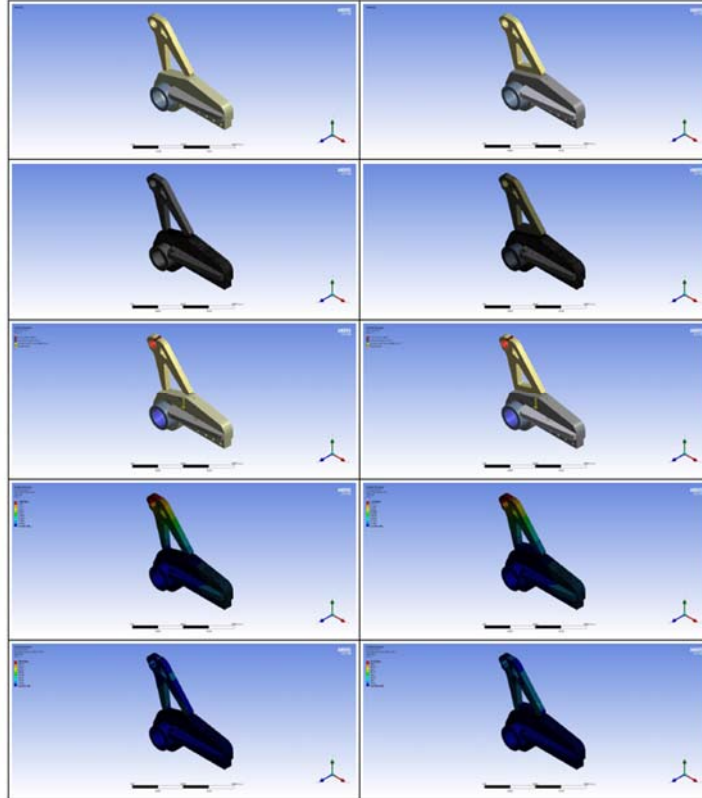
Öncelikle yukarıdaki malzeme özelliklerine göre malzeme optimize edilmeden önce mekanik özelliklerinin analizi yapılarak optimize edildikten sonraki analiz ile karşılaştırılır. Mekanik özellikleri analiz edildikten sonra Topoloji optimizasyonu için

ANSYS uygulaması workbench 'de Şekil 2.13'deki gibi analiz yapılır.



Şekil 2.13. ANSYS Yapısal Analiz Modülüne Topoloji Optimizasyon Modülü Eklenmesi (Öğüçlü ve Yıldırım 2022).

Yapılan topoloji optimizasyonu sonrası şekil 14' de malzemenin yeniden modellenmesi ve analiz sonuçları gösterilmiştir. Soldaki hafifletilmiş 1. Tasarım sağdaki ise hafifletilmiş 2. Tasarımdır.



Şekil 2.34. optimizasyon süreci (Öğüçlü ve Yıldırım 2022)

Çizelge 2.2'de analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre optimizasyon

sonrası deformasyon gerilme etki ve tepki kuvvetleri kütledeki değişim oranları elde edilerek optimizasyon sonucu değerlendirilmiştir.

Çizelge 2.2 Tasarım öncesi durumun tasarım 1 ve tasarım 2 karşılaştırılması (Öğüçlü ve Yıldırım 2022).

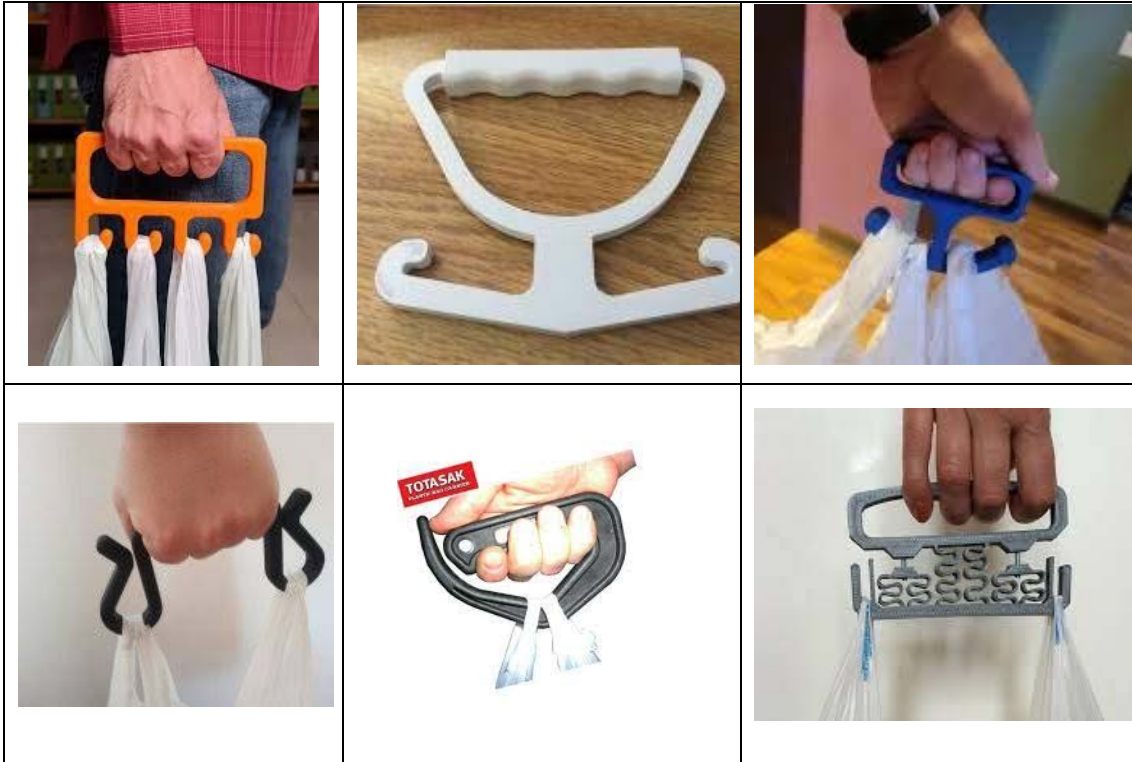
Değerler/Sonuçlar	İlk Tasarım	Hafifletilmiş 1.Tasarım	% Değişim	Hafifletilmiş 2.Tasarım	% Değişim
Toplam Şekil Değiştirme (mm)	1,3155	1,5803	16,76	1,4738	10,74
Eşdeğer Gerilme (von Mises) (MPa)	571,83	1016,90	43,77	751,95	23,95
Mafsalsal Tepki Kuvveti (N)	1,09E+06	1,07E+06	-2,06	1,086E+06	-0,37
Kesme Çenesi Tepki Kuvveti (N)	7,72E+05	7,49E+05	-3,07	7,670E+05	-0,65
Kütle (kg)	76,408	53,077	-43,96	61,036	-25,19

Karşılaştırma sonrası kütlesi % 43,96 azaltılmış 1. Tasarım kütlesi % 25,19 azaltılmış 2. Tasarıma göre daha yüksek değerlerde eşdeğer gerilmesi çıkmıştır ve daha az değerlerde mafsal tepki kuvveti ve kesme çenesi tepki kuvveti elde edilmiştir. ANSYS yönteminde yapılan topoloji optimizasyon analizleri genelde bu şekilde yapılmaktadır. Bizim yapacağımız çalışmamızda parçalarımızın bu şekilde modelleme sonrası analizlerini yapacağız.

3. MATERYAL VE METOT

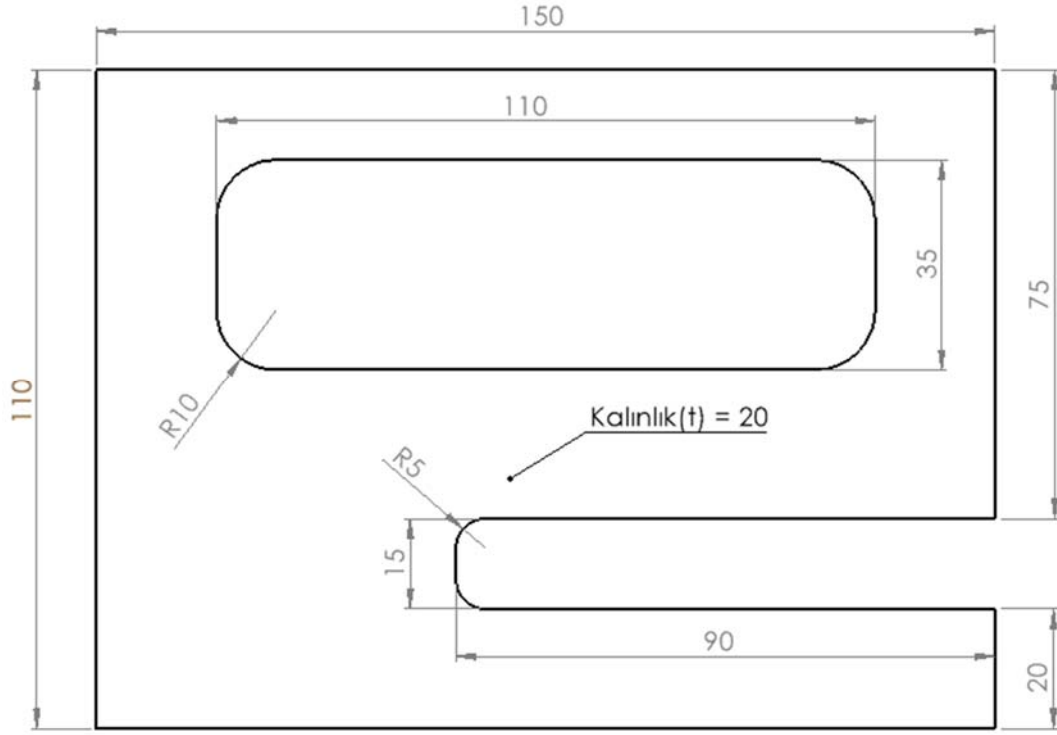
3.1. Poşet taşıma aparatının 3B modelinin belirlenmesi

Bu çalışmada tek kancalı ve çift kancalı olmak üzere 2 adet poşet taşıma aparatı tasarlanmıştır. Bu tasarımlar mevcut poşet taşıma aparatları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Literatürde çok farklı tiplerde poşet taşıma aparatları tasarlanmıştır (Şekil 3.1).

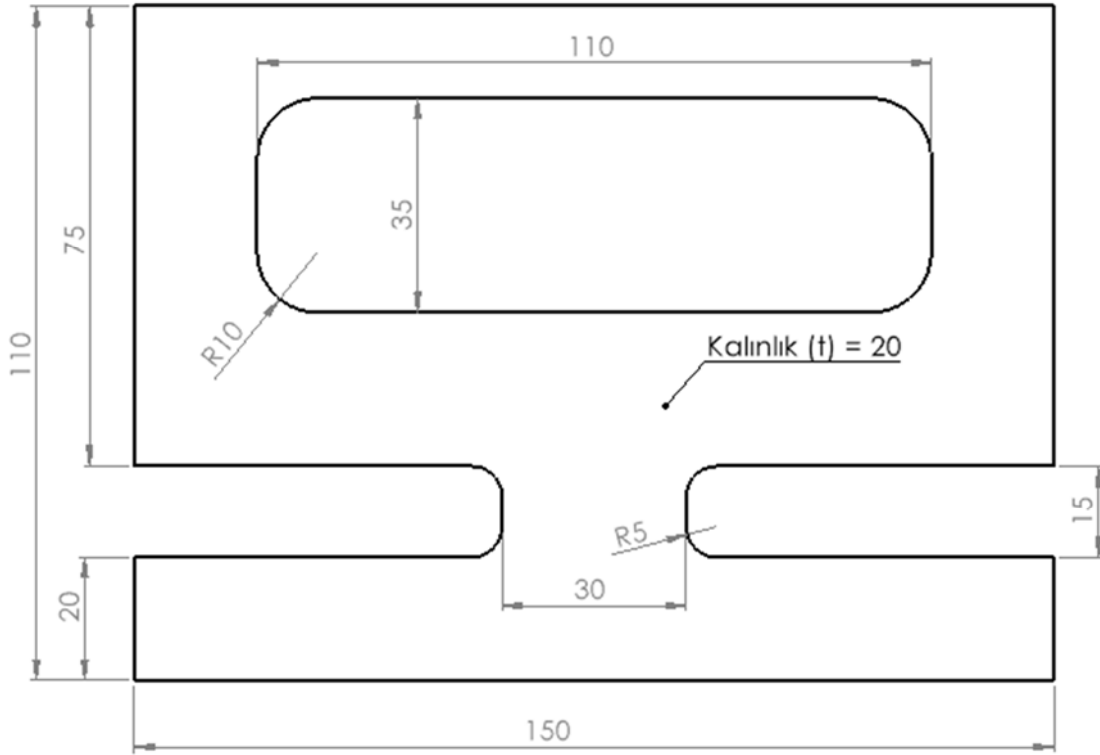


Resim 3.2. Poşet taşıma aparatları

Bizim çalışmamızda 2 çeşit poşet taşıma aparatı tasarlanacaktır. Tasarlanan aparatlar yukarıda şekil 3.1'de mevcut poşet taşıma aparatlarından esinlenerek tasarlanmaya çalışılacaktır. Yapılan tasarımlar Topoloji optimizasyonu yapılarak %50 hacim azaltma sonrası malzemenin mekanik özellikleri karşılaştırılacaktır. Son olarak malzememizin 3D printer yazıcı ile yazdırıp mekanik testleri yapılacak ve ANSY verileri ile karşılaştırma yapılacaktır.



a)

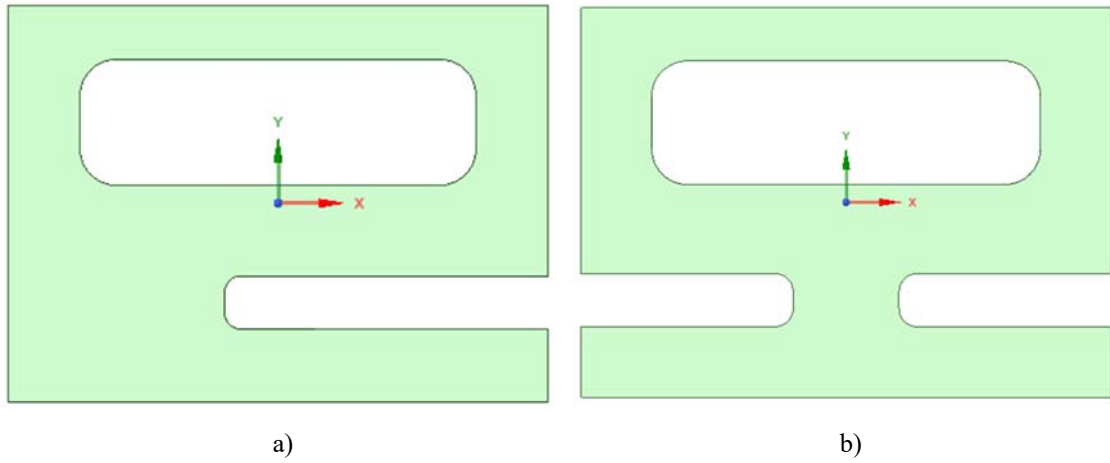


b)

Şekil 3.1. a) Tek ve b) Çift kancalı poşet taşıma aparatları teknik ölçüleri

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere poşet taşıma aparatı boyutlandırılması yapılmıştır. Yaptığımız boyutlandırma piyasada kullanılan malzeme ve kullanılabilirlik açısından gerekli şartlar ön görülerek tasarlanmıştır.

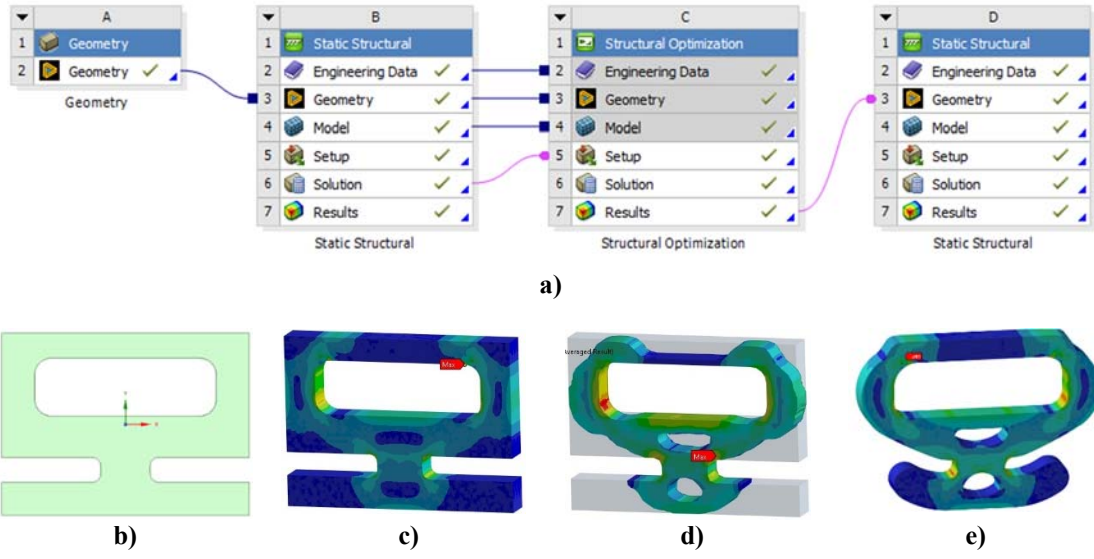
Çalışmamızdaki tasarım en temel prensiplere dayanmaktadır. Parçaların 3B modelleri normal bir kişinin el formuna ve geometrisine uygun olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan tek kancalı ve çift kancalı poşet taşıma aparatlarının 3B modelleri Şekil 3.2 ’de gösterilmektedir. Şekil 3.2 ’de gösterilen geometrilere uygun olarak tek ve çift kancalı poşet taşıma aparatının 3B modelleri Spaceclaim 2020 programında yapılmıştır.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan kancalı poşet taşıma aparatların 3b modelleri a) Tek kancalı model b) çift kancalı model

3B modellemesi yapılan parçamızın Statik özelliklerinin analizi için Static Structural ekranında model analizine alınmaktadır. Model analizine alınan 3B parçamız şekil 3.3 c) ‘de görüldüğü üzere kayma gerilmesi ve maksimum yer değiştirme analizi yapılmaktadır. Analizi yaparken parçamızı şekil 3.3 c)’de tutma yerinde kırmızı ile görülen kısımdan sabitlenmiştir. Yine parçamız altta kanca yerlerine her kanca için 50 N kuvvet uygulanarak yapılmıştır. Parçamızın malzemesi PLA olarak seçilmiştir.

Yapılan analiz sonucuna Structural optimization (Topoloji optimizasyonu) ekranına eklenerek parçamızın gerilme analiz değerlerine göre % 50 kütle azaltma yöntemi ile topoloji optimizasyonu yapılarak şekil 3.3. ‘de görülen parçamız elde edilmiştir.



Şekil 3.3. a) Analiz şeması, b) 3B model, c) 3b Model analizi, d) Topoloji modeli, e) Üretime hazır model

Şekil 3.3 'de optimizasyon sonucu bir öneri model elde edilmiştir. Elde edilen model güncel kullanım şartları ve piyasadaki malzemeler gözetlenerek yeniden modellenecektir. Bu şartlardan bazıları takılan poşet düşmemesi için gerekli kanca ve tutma yerinin kuvvet birikmesi sonucu kırılma olasılığı gibi hesaplamalar dışında oluşabilecek öngörülen risklerin etkisi sonucu elde edilmiştir.

3.2. Taguchi analizi

Eklemeli imalatın üretim proseslerinin çeşitliliğinden dolayı otomotiv, havacılık, tıp, tekstil, eğitim, elektrik-elektronik, mimari, inşaat, gıda, mühendisliğin bütün alanları vb. olmak üzere literatürde birçok alanda kullanılmaktadır (Jadhav ve Jadhav, 2022; Shahrubudin vd., 2019). Endüstride eklemeli imalat, geleneksel imalat süreçleri kullanılarak daha zor ve uzun süreçler sonucunda ortaya çıkarılan üç boyutlu (3D) kompleks ve konsept nesnelerin daha kısa sürelerde ve daha uygun maliyetler ile kullanılmasını sağlamaktadır. Bu teknoloji, tasarım ve üretim sürecinin hızının ve esnekliğinin artırılmasını sağlamaktadır (Medellin-Castillo ve Zaragoza-Siqueiros, 2019).

Eklemeli imalat yöntemleri geleneksel imalata göre gün geçtikçe imalat sektöründeki ağırlığını artırmaktadır. Bunun sebebi olarak, kompleks parçaların insan eli değmeden

kolayca üretilebilmesinin yaygınlaşması, kişiye özel üretimlerin gerçekleştirilmesi ve bunların uygun ücretler seviyesinde olması olarak gösterilebilir(Kam, Ipekci ve Şengül 2023). (Abeykoon, Sri-Amphorn ve Fernando 2020) eklemeli imalatın geleneksel imalata göre avantajlarını şu şekilde sunmaktadırlar; karmaşık parçaların ek yeri olmadan üretilmesi, daha düşük malzeme ve işçilik maliyeti, yüzey kalitesinin iyi olması, daha az enerji talebi, işlem sıcaklığının kolay bir şekilde kontrol edilebilmesi, işlem karmaşıklığının az olması, üretim sürecinin hızlı olması, gerçek boyutlara yakın üretimin gerçekleştirilmesi, kısa teslim süresi, geleneksel üretime kıyasla toplam maliyetin daha düşük olması vb. olarak gösterilebilir. Eklemeli imalat, üretim metotları ve stratejilerine göre temel olarak fused deposition modeling (FDM), stereolithography (SLA), direct ink writing (DIW), selective, laser melting (SLM), selective laser sintering (SLS), electron beam melting (EBM), laminated object manufacturing (LOM), binder jetting (BJ), etc şeklinde çeşitlendirilebilir (Ji-Hong Zhu 2016). Kullanım kolaylığı, kolay erişilebilirliği, hızlı üretimi, cihaz ve malzeme maliyetinin düşük olması, termoplastik polimerlerinin işleme kabiliyeti, vb. özelliklerinden dolayı FDM en yaygın olan yöntemlerin başında gelmektedir.

FDM teknolojisi, sektörde yaygın olarak kullanılan Polylactic acid (PLA), Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), Nylon, Polycarbonate (PC), Polystyrene (PS), Nylon, Polyether-ether-ketone (PEEK) gibi termoplastik malzemelere dayanan bir malzeme ekstrüzyon işlemidir ve düşük maliyetli 3D yazıcıların artık sektörde mevcut olduğu bir seviyeye kadar ilerlemiştir(Doshi, Mahale vd. 2022). Fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler bakımından diğer termoplastikler ile karşılaştırıldığında en yaygın kullanılan malzeme PLA olarak görülmektedir. PLA düşük süneklik, yüksek gerilme mukavemeti ve biyobazlı parçalanabilir bir malzeme vb. özelliklerinden dolayı otomotiv, elektronik, mekanik başta olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Babbar, Sharma vd. 2021).

Eklemeli imalat teknolojisi literatürde, 3D Baskı (3DB), Hızlı Prototipleme (HP) ve katı serbest form teknolojisi olarak ta isimlendirilmektedir. 1980'lerden sonra ortaya çıkan bu teknoloji sayesinde hiçbir kalıp sistemine gerek duyulmadan sıfırdan parçanın üretilebilmesi sağlanmaktadır. 3D baskı işlemi için öncelikle parçanın veya montajın üç

boyutlu katı modeli bilgisayar destekli tasarım (BDT) programları yardımıyla oluşturulmalıdır. 3D modelin 3D baskı cihazı tarafından tanınması için öncelikle Stereolithography (STL) dosya formatına dönüştürülmeli (Gibson vd., 2015) ve dilimleme programları ile G kodları oluşturulmalıdır. Standart bir 3D yazıcıda, üç ekseninde (x, y ve z) hareket edebilen, tekli veya çoklu besleme seçenekleri sunabilen bir ekstruder yardımıyla ergitilmiş malzemenin katman katman eklenmesiyle nesne oluşturulmaktadır.

3D baskı sektöründe FDM metodunun yaygınlaşmasıyla beraber malzemenin mekanik karakteristiğinin iyileştirilmesi için optimum baskı parametrelerinin belirlenmesi önemli hale gelmiştir. 3d baskının mekanik kalitesini etkileyen ana proses parametreleri; Katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu, baskı hızı, tarama açısı ve duvar kalınlığı olarak gösterilebilir(Ahmad, Wong ve Ghazali 2022). Bunların dışında detay olarak düşünülen ve yine mekanik yapıyı etkileyen birçok parametre vardır (Bakır, Atik ve Özerinç 2021). Belirlenen bütün parametrelerin ana amacı daha az malzeme kullanarak en kısa sürede mekanik olarak daha kararlı bir yapıyı ortaya koymaktır. Literatürde her yazar kendi belirlediği senaryolara göre belirli 3d baskı proses parametreleri kullanarak hedefledikleri sonuçları elde etmeye çalışmışlardır (Abeykoon, 2020 #35}Abeykoon vd., 2020; Atakok vd., 2022; Beylergil vd., 2023; Gotkhindikar ., 2023; Heidari-Rarani vd., 2022; Kam vd., 2023; Mazen vd., 2022; Sajjad vd., 2023; Tünçay, 2023). FDM metoduyla oluşturulan parçaların mekanik davranışlarının belirlenmesi için birtakım testler yapılmaktadır. Bu testler sayesinde proses parametrelerinin birbirleriyle etkileşimleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Termoplastik parçaların FDM metoduyla üretimi için yayınlanmış bir standart bulunmamakla birlikte, genel olarak plastiklerin mekanik testleri için çok sayıda standart mevcuttur (Bakır, Atik ve Özerinç 2021). FDM metodunda kullanılan ve plastikler için geçerli olan genel mekanik testler; Çekme testi, eğilme testi, basma testi, darbe testi, sertlik testi ve yüzey pürüzlülüğü testi olarak sıralanabilir.

3D baskı parametrelerinin termoplastik PLA malzemelerin çekme, basma, eğilme, darbe, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için kapsamlı bir çalışma yürütülmüştür. Bu konuda literatür hacmi önemlidir ve çeşitli proses parametrelerin yukarıda belirtilen çeşitli özellikler üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir

şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, 3D baskı parametrelerinin termoplastik PLA malzemelerinin mekanik dayanımlarının bütünü (Çekme testi, eğilme testi, basma testi, darbe testi, sertlik testi ve yüzey pürüzlülüğü) üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. Çalışmamız, böyle bir araştırma boşluğunun doldurulmasını sağlamak ve bu alanda çalışma yapmak isteyenlere temel oluşturmayı hedeflemektedir. Bu çalışma ile FDM metoduyla üretilen parçaların temel proses parametrelerinin mekanik testler (Çekme testi, eğilme testi, basma testi, darbe testi, sertlik testi ve yüzey pürüzlülüğü) üzerindeki etkileri amaçlanmıştır. Deney tasarımı planlamak için Taguchi L16 ortogonal dizi kullanılmış ve buna istinaden deneyler ve istatistik çalışmaları yapılmıştır. Bu deney çalışmasında beş adet 3d baskı proses parametresi dikkate alınmıştır: Katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu, baskı hızı, raster açısı ve duvar kalınlığı. Proses parametreleri arasındaki etkileşimleri incelemek için Sinyal/Gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) dikkate alınmıştır. Ayrıca deney numunelerinin iç yapı ve hasar durum analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Deneysel tasarım ve optimizasyon

Araştırmada deneysel tasarım ve analiz yöntemi olarak Taguchi yöntemi kullanılmıştır.

Taguchi analizlerinin yürütülme sıralaması aşağıdaki sırayla devam etmektedir:

- İncelenecek parametrelerin ve seviyelerin belirlenmesi,
- Uygun ortogonal dizinin seçilmesi,
- Belirlenen parametrelerin ve seviyelerin ortogonal dizinin sütunlarına aktarılması,
- Ortogonal dizi kullanılarak deneylerin gerçekleştirilmesi,
- Sinyal-gürültü oranlarının hesaplanması,
- Doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesi (Raja, Verma vd. 2022)

Araştırmada Taguchi analizi için kullanılan 3D baskı proses parametreleri Çizelge 3.1 ve seviyeleri 3.2’de verilmiştir. Her bir parametre için dört seviye belirlenmiştir.

Çizelge 3.1 3D yazıcı parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Açıklama	Seviye
Tabaka kalınlığı (mm)	Fdm yönteminde baskı işlemi katmanların üst üste yığılması ile olur. Tek bir düzlem katmanın kalınlığı burada temsil edilmektedir	Çalışmada 0.1, 0.15, 0.2 ve 0.25 mm kullanılmıştır.
Dolgu yoğunluğu (%)	Son baskıda katı parçanın bütüne yüzde oranı olarak tanımlanır.	Hafif ve mukavemetli olmayan parçalar için %5'e kadar, mukavemet gerektiren parçalar için %100'e kadar değerler kullanılabilir. Burada %25, 50, 75 ve 100 kullanıldı.
Yazdırma hızı (mm/s)	Yazdırma sırasında ekstrudere bağlı nozulun hızı	Çalışmalarda sıklıkla kullanılan değerler olarak 40, 50, 60 ve 70 mm/s belirlendi.
Tarama açısı (°)	Baskıda parçanın iç kısmının üretimi esnasında nozzle'ın x eksenine ile yaptığı açı olarak tarif edilebilir. Ayrıca bkz. şekil X	Çalışmalarda sıklıkla kullanılan değerler olarak 0, 30, 45 ve 75 derece belirlendi.
Duvar kalınlığı (mm)	Baskı sırasında parçanın en dış kısmında oluşan katı parçanın kalınlığıdır. Ayrıca bkz. şekil X	Çalışmada duvar kalınlığı 0,6, 0,9, 1,2 ve 1,5 mm olarak belirlendi.

Bir veya bir dizi çıktı tepkisine giriş işlem parametrelerinin etkisini elde etmek için sistemli bir yöntem olan Deney Tasarımı yöntemi kullanılmaktadır. Birçok deney tasarım yöntemini genellikle FDM sistemlerinin işlem parametrelerini optimize etmek için Taguchi yöntemi, tam faktöriyel tasarımlar, varyans analizi ve bulanık mantık gibi yöntemler kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, genellikle geleneksel yöntemlerden farklıdır. Bu yöntem, ürün ve süreç tasarımı aşamasında kalite tasarımına vurgu yapar, oysa geleneksel yöntemler üretim süreci sırasında veya ürün üretildikten sonra kalite kontrol ve denetim üzerinde odaklanır.

Taguchi yöntemi, istenen sonuçları elde etmek için Varyans Analizi (ANOVA) veya Sinyal/Gürültü oranını (S/N oranı) kullanır.

ANOVA yöntemi, bireysel üretim süreci parametrelerinin nihai özellikler üzerindeki genel etkisini ayırt etmek için farklı gruplar arasındaki varyansı değerlendirir. Tersine, S/G oranı yöntemi, farklı gürültü koşulları altında nominal değere ilişkin yanıtta

değişimi tanımlar. Sonuçlar daha sonra ortalama çıkış yanıtına dayalı olarak proses parametrelerinin manipülasyonu yoluyla değerlendirilir. ANOVA geleneksel olarak her parametrenin çıktı üzerindeki yüzdesel etkisini ayrı ayrı incelerken uygulanır. Bunun tersine, amacın çok yanıtı bir sürecin optimizasyonu olduğu senaryolarda S/N yöntemi kullanılır. Bu yöntem, birden fazla parametrenin çıktı üzerindeki yüzde katkısını ve etkisini dikkate alır. Sonuç olarak, bu çalışma, hedefin çok yanıtı bir sürecin optimizasyonu olduğu göz önüne alındığında, S/N yöntemini kullanarak katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu, baskı hızı, tarama açısı ve duvar kalınlığı için en uygun koşulları eş zamanlı olarak belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu metodolojide, deneysel sonuçlarla elde edilen ortalama mekanik özelliklerden elde edilen deneysel değer ile hedef değer arasındaki eşitsizliği ölçmek için bir kayıp fonksiyonu kullanılır. Bu tutarsızlık daha sonra Sinyal-Gürültü (S/N) oranına dönüştürülerek kalite ve değişkenlik arasındaki etkileşimin değerlendirilmesine olanak sağlar (Heidari-Rarani, Ezati vd. 2022).

Sonucun duruma ne kadar iyi uyduğuna bağlı olarak üç farklı S/N oranı vardır; (a) “performans özelliğinin en aza indirilmesi durumunda daha düşük olan daha iyidir”, (b) “nominal daha iyi” ve (c) “daha büyük daha iyidir”. S/N oranı Denklem tarafından verilen “daha büyük olan daha iyidir” şeklinde seçilmiştir. Bu çalışma mümkün olan en yüksek Çekme, basma, üç noktalı eğilme, çentikli darbe mukavemetlerini ve sertliği ve yüzey pürüzlülüğünü elde etmeyi amaçlamaktadır.

$$S/N = -10 \log \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x \frac{1}{Y^2} \right] \quad (3.1)$$

Burada n ve Y sırasıyla veri noktalarının sayısı ve ikinci veri noktasının değeridir. En iyi mukavemet direncini sunan optimum parametreler, en yüksek S/N oranına sahip olanlardır.

Katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu, baskı hızı, tarama açısı ve duvar kalınlığı için dört seviye içeren kapsamlı bir faktöriyel tasarım kullanıldığında, tüm olası permütasyonları kapsayacak şekilde 16 numunenin üretilmesi ve test edilmesi gerekecektir. Ancak, böyle bir yaklaşımın hem zaman hem de filament tüketimi açısından verimsiz olduğu

düşünülmektedir. Taguchi yöntemi kullanılarak, alternatif olarak bir L16 ortogonal dizi seçilmiştir. Özünde bu, 1024 deney yapmak yerine sadece 16 deney yapılması gerektiği anlamına gelmektedir. Taguchi'nin on altı deneyinin ayrıntıları, ilgili süreç parametreleriyle birlikte çizelge 3.2 'de özetlenmiştir. Mekanik test parçalarının üç boyutlu modelleri bilgisayar destekli tasarım programı olan SolidWorks 2023 (Dassault Systèmes) ile oluşturulmuştur. CAD programı ile .stl formatına dönüştürülen 3d model, Simplify 3D programı ile baskı simülasyonu yapılmış ve G koduna dönüştürülmüştür. Tasarlanan deney numuneleri PLA baskı parametrelerine uygun olarak üretilmiştir (Sajjad, Butt vd. 2023).

Araştırmada baskı malzemesi olarak PLA seçilmiştir. Araştırma kapsamında PLA kullanılmasının temel nedeni, bu plastik malzemenin ABS'ye göre daha fazla avantaja sahip olmasıdır (Frățilă ve Rotaru 2017). PLA, daha düşük toksisite içeren ve daha düşük sıcaklıklar gerektiren temiz kaynaklardan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilir bir termoplastik polyester malzemedir (Atakok, Kam ve Koc 2022).

Çizelge 3.2 L16 ortogonal dizisi ile deney tasarımı

Test Numarası	Katman Kalınlığı (mm)	Dolgu yoğunluğu (%)	Yazma Hızı (mm/s)	Tarama açısı (°)	Duvar Kalınlığı (mm)
1	0.10	25	40	0	0.6
2	0.15	25	50	30	0.9
3	0.20	25	60	45	1.2
4	0.25	25	70	75	1.5
5	0.25	50	40	30	1.2
6	0.20	50	50	0	1.5
7	0.15	50	60	75	0.6
8	0.10	50	70	45	0.9
9	0.15	75	40	45	1.5
10	0.10	75	50	75	1.2
11	0.25	75	60	0	0.9
12	0.20	75	70	30	0.6
13	0.20	100	40	75	0.9
14	0.25	100	50	45	0.6
15	0.10	100	60	30	1.5
16	0.15	100	70	0	1.2

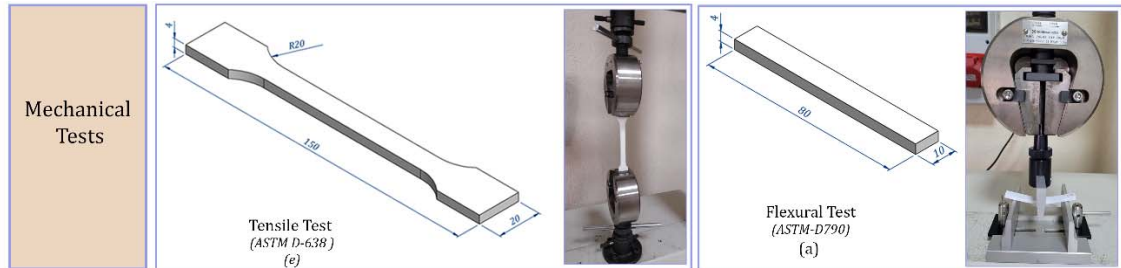
3.2.3. Numune Hazırlama ve Mekanik Testler

Mekanik test parçalarının üç boyutlu modelleri bilgisayar destekli tasarım programı olan Solidworks 2023 (Dassault Systèmes) ile oluşturulmuştur. CAD programı ile .stl formatına dönüştürülen 3d model, Simplify 3D programı ile baskı simülasyonu yapılmış ve G koduna dönüştürülmüştür. Tasarlanan deney numuneleri PLA baskı parametrelerine uygun olarak üretilmiştir (Sajjad, Butt vd. 2023).

Araştırmada baskı malzemesi olarak PLA seçilmiştir. Araştırma kapsamında PLA kullanılmasının temel nedeni, bu plastik malzemenin ABS'ye göre daha fazla avantaja sahip olmasıdır (Frätilä ve Rotaru 2017). PLA, daha düşük toksisite içeren ve daha düşük sıcaklıklar gerektiren temiz kaynaklardan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilir bir termoplastik polyester malzemedir (Atakok, Kam ve Koc 2022).

3.2.3.1. Mekanik Test Metodu

Termoplastik parçaların FDM metoduyla üretimi ve bunların mekanik testleri ile ilgili standart bulunmamasıyla birlikte, plastik parçaların mekanik testleri ile ilgili birçok standart mevcuttur. Bu çalışmada FDM metoduyla üretilen parçaların temel proses parametrelerinin mekanik testler üzerindeki etkilerini detaylı olarak inceleyeceğiz. Çalışmada kullanılacak mekanik test yöntemleri ve içeriklerine ait numune geometri ölçüleri Şekil 3.4'de gösterilmiştir. FDM, herhangi bir mekanik test yöntemi için gerekli olan numune geometrisini direk yazdırabilir. FDM metodu final ölçü boyutlarında üretim yaptığı için herhangi bir son işleme gerek kalmamaktadır.



Şekil 3.4. Mekanik Testler (a) Çekme Testi, (b) Üç Nokta Eğme testi

PLA malzemesi ile üretilen numunelerin boyutlandırılması ve test işlem prosedürleri; çekme testi için ASTM D-638 standardı (Gotkhindikar, Singh ve Kataria 2023) , üç nokta eğme testi için ASTM-D790 standardı (Abouelmajd, Bahlaoui vd. 2022) standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Polimer malzemeler üzerinde gerçekleştirilen mekanik testlerde malzemenin dayanımı hakkında akma dayanımı, elastisite modülü ve çekme dayanımı gibi kavramlar kullanılmaktadır. Bu araştırmada malzemenin dayanımı dikkate alındığında çekme dayanımı kavramı kullanılacaktır.

3.2.3.2. Çekme Test Kurulumu

Yukarıda belirtildiği gibi PLA malzemenin çekme testi ASTM D-638 standardına göre yapılmıştır. Standartlara göre her bir tasarım noktası için beş adet numune hazırlanmıştır. Çekme test cihazı olarak Shimadzu deney test cihazı kullanılmıştır ve cihazın yer değiştirme oranı 0.1 mm/dk olarak alınmıştır. Her bir numune oda sıcaklığında yarı statik çekme testi altında test edilmiştir. Numunenin test cihazına bağlantı düzeneği resim 3.2’de gösterilmektedir.



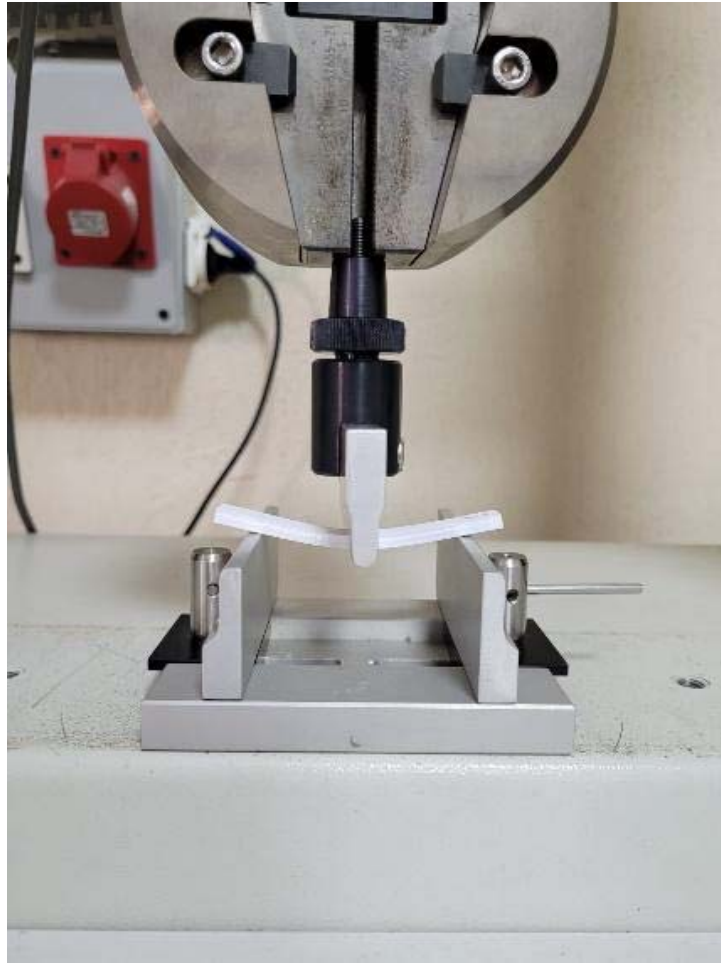
Resim 3.2. PLA numunesi çekme testi

Çekme testi prosedüründe çekme gerilmesi, çekme gerinimi ve elastisite modülü parametreleri dikkate alınmaktadır. Biz çalışmamızda çekme gerilmesi değerini dikkate aldık.

$$\text{Çekme Gerilmesi } (\sigma_{\text{ç}}) = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

Denklemdaki parametreler; $\sigma_{\text{ç}}$ çekme gerilmesini (MPa), P kuvveti (N) ve A test başlamadan önceki parçanın kesit alanını belirtmektedir.

3.2.3.3. Üç Nokta Eğme Testi



Resim 3.3. PLA parçalarının Çekme testi

Üç nokta eğme testi sonucunda PLA malzemesinin eğilme gerilmesi, eğilme gerinimi ve elastisite modülü kavramları dikkate alınmaktadır. Üç nokta eğme testi için Shimadzu marka test cihazı kullanılmış ve test sırasında üst çenenin parçaya etki eden yer değiştirme oranı 0.1mm/dk olarak belirlenmiştir. Test için beş adet numune kullanılmıştır. Termoplastik PLA numunelerin üç nokta eğme testi ASTM-D790 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir test düzeneği resim 3.3’de gösterilmiştir.

Homojen elastik malzemelerde maksimum eğilme gerilmesi numunenin dış yüzeyinde ve ortasında oluşmaktadır. Eğilme gerinimi maksimum gerilmenin meydana geldiği orta açıklıktaki test numunesinin dış yüzeyindeki bir elemanın uzunluğundaki nominal kesirli değişim olarak tanımlanmaktadır. Elastisite modülü ise elastik limit dahilinde gerilimin karşılık gelen gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu değerlerin denklemleri (denklem. 3.3) aşağıda verilmektedir.

$$\text{Eğme gerilmesi}(\sigma_f) = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.3)$$

Denklemlerdeki parametreler; σ orta noktadaki gerilme (MPa), P yük sapma eğrisi üzerinde belirli bir noktada yük (N), L destek aralığı (mm), b test edilen kiriş genişliği (mm) ve test edilen kiriş derinliği (mm), ϵ_f dış yüzeyde gerginlik (mm/mm), D ışının merkezinin maksimum sapması (mm), E_b bükülmede esneklik modülü (MPa), m yük-sapma eğrisinin başlangıçtaki düz çizgi kısmına teğet eğimi (N/mm) olarak belirtilmektedir.

3.2.4. Test sonuçları tartışması ve kullanılacak yöntem seçimi

Araştırmada farklı 3D baskı parametrelerinden oluşan deney tasarımlarına ait numuneler üzerinde gerçekleştirilen mekanik testler yardımıyla parametrelerin termoplastik PLA malzemeler üzerindeki etkinlikleri incelenmiştir. Mekanik test sonuçlarının ortalama değerleri çizelge 3.3’te gösterilmiştir. Çalışmanın istatistiksel analizi Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak Taguchi yöntemi ile mekanik test sonuçlarının değerlendirilmesi işlemi S/N

diyagramlarının yorumlanmasıyla yapılmaktadır. Araştırmada elde edilen S/N diyagramları “en büyük en iyi” kriterine göre gerçekleştirilmiş ve yorumlanmıştır. “En büyük en iyi” kriteri araştırma çıktı değerlerini maksimum yapan parametreleri bulmaktadır.

Çizelge 3.3 Test Sonuçları

Test Numarası	Çekme dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
1	18.59	88.71
2	27.29	102.85
3	33.00	111.67
4	46.25	102.47
5	35.12	100.77
6	29.16	134.14
7	42.64	97.64
8	20.21	119.90
9	35.79	134.49
10	42.33	125.69
11	36.04	105.15
12	29.72	90.31
13	66.75	126.62
14	61.73	123.42
15	52.74	118.09
16	55.81	123.42

3.2.4.1. Çekme testi sonuçlarına göre

Anova fit general linear model Analiz sonucunda elde edilen faktörlerin ve etkileşimlerin etkileri Çizelge 3.4’te sunulmuştur. Araştırmanın sonuçlarını tahmin etmek için ayrıca fitregresyon model analizi gerçekleştirilmiştir.

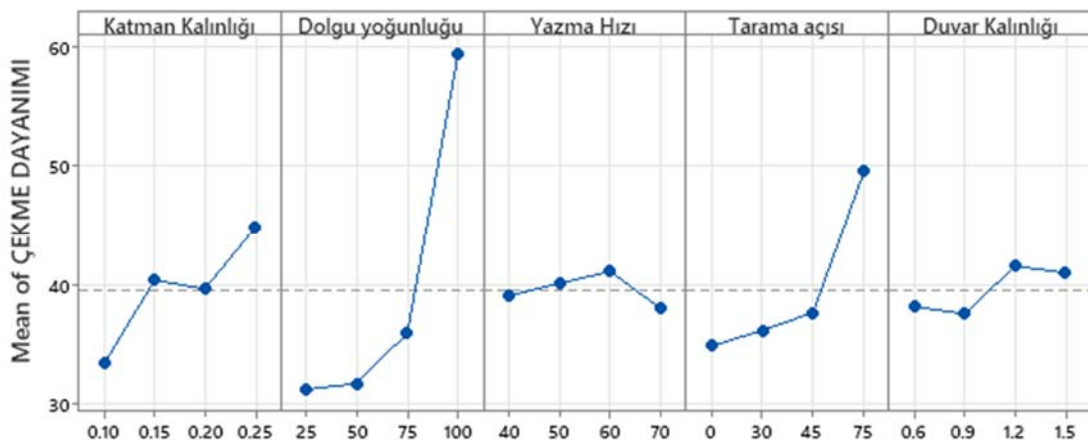
Aşağıdaki hesaplamalarda çekme mukavemetini %95’lik bir konfirmans aralığı (CI) ile tahmin etmek için doğrusal regresyon denklemini vermektedir. Buna ek olarak kullanılan bütün proses parametrelerinin çekme gerilmesi üzerindeki cebirsel etkileri verilmiştir.

Çizelge 3.4 Çekme testinde S/N oranları için Varyans ANOVA'sı

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-	P-Value
Infill Density (%)	1	1556.87	55.21%	1556.87	1556.87	26.31	0.000
Print Speed (mm/s)	1	2.70	0.10%	2.70	2.70	0.05	0.835
Raster Angle (°)	1	420.63	14.92%	420.63	420.63	7.11	0.024
Wall Thickness (mm)	1	20.74	0.74%	20.74	20.74	0.35	0.567
Layer Thickness (mm)	1	227.08	8.05%	227.08	227.08	3.84	0.079
Error	10	591.67	20.98%	591.67	59.17		
Total	15	28135,9.6	100.00%				

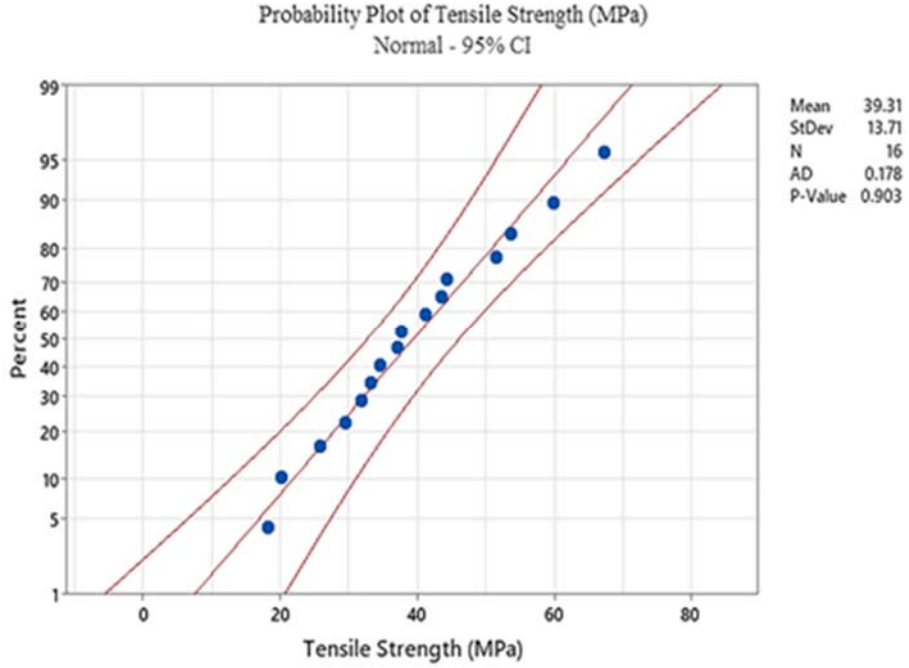
$$\begin{aligned} \text{Tensile Stress (MPa)} = & -3.2 + 0.3529 \text{ Infill Density (\%)} - 0.037 \text{ Print Speed (mm/s)} \\ & + 0.1896 \text{ Raster Angle (}^\circ\text{)} + 3.39 \text{ Wall Thickness (mm)} \\ & + 67.4 \text{ Layer Thickness (mm)} \end{aligned}$$

Proses parametrelerinin katkı oranlarına bakıldığında (Çizelge3.4) sırasıyla dolgu yoğunluğu (55.21%), raster açısı (14.92%) ve katman kalınlığı (8.05%), çekme mukavemeti değerlerinin belirlenmesinde en kritik faktörler olarak görülmüştür. Anova test sonuçlarına (Çizelge 3.4) ve S/N oranlarına (Şekil 3.5) bakıldığında dolgu yoğunluğunun 4. seviyesinde, printer hızının 3.seviyesinde, raster açısının 4. seviyesinde, duvar kalınlığının 3. veya 4. seviyesinde ve katman kalınlığının 4. seviyesinde FDM proses parametrelerinin maksimum çekme mukavemeti değerlerini elde etmek için kullanıldığı gösterilmiştir. Bu proses parametreleri ile en iyi çekme mukavemeti tahmini üretildiğinde S/N oranının 40.2389 ve çekme dayanımının 75.6725 MPa olduğu elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Çekme mukavemeti için S/N oranları

İstatistik analizde modelleme sonucunda elde edilen çekme mukavemetinin normal olasılık grafiği Şekil 3.6 'da sunulmuştur. Modelin doğruluğu grafik üzerindeki verilerle görülmektedir.



Şekil 3.6. Çekme geriliminin olasılık grafiği

Normallik grafiğinin p-değerleri 0,05'in üzerinde olduğundan dolayı ve artıklar normal dağılım izlediğinden dolayı deneysel çalışma ile matematiksel modelin uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca dağılımın merkezi eksene yakın olması deneysel modelin dengeli ve doğru olduğunu göstermektedir.

3.2.4.2. Eğme Testi Sonuçlarına Göre

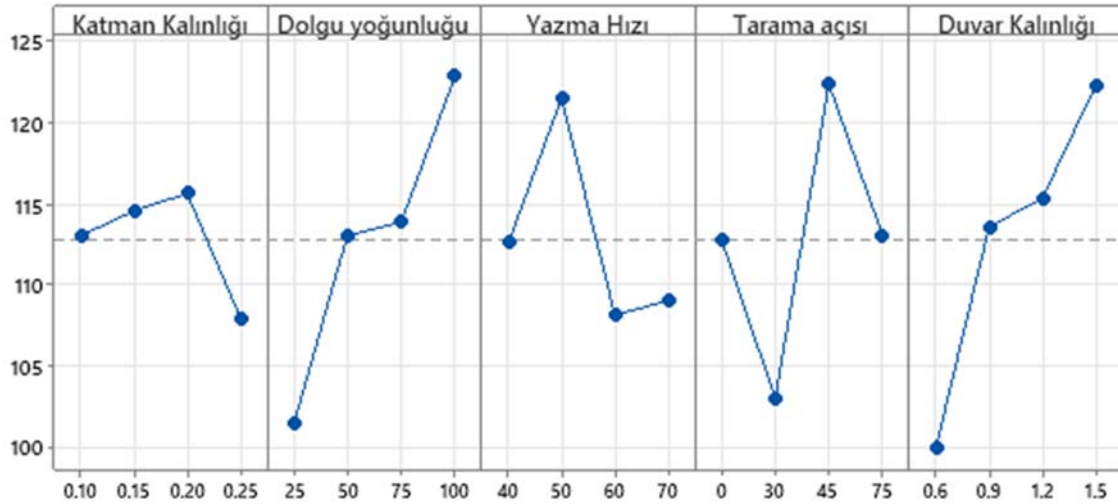
Taguchi analizi verilerine göre Tablo 7'de FDM proses parametrelerinin etkinlikleri % olarak gösterilmiştir. Eğilme dayanımına göre katkısı en fazla olan parametreler sırasıyla duvar kalınlığı (28.40%) ve dolgu yoğunluğu (25.66%) olarak görülmektedir. Printer hızı, raster açısı ve katman kalınlığının etkileri yaklaşık olarak 0.9%-3.6% aralığında değişmektedir.

Çizelge 3.5 Üç nokta eğilme testinde S/N oranları için Varyans ANOVA'sı

Source	DF	Seq SS	Contributi on	Adj SS	Adj MS	F- Value	P- Value
Infill Density (%)	1	850.08	25.66%	850.08	850.08	6.39	0.030
Print Speed (mm/s)	1	117.57	3.55%	117.57	117.57	0.88	0.369
Raster Angle (°)	1	32.67	0.99%	32.67	32.67	0.25	0.631
Wall Thickness (mm)	1	940.91	28.40%	940.91	940.91	7.07	0.024
Layer Thickness (mm)	1	41.16	1.24%	41.16	41.16	0.31	0.590
Error	10	1330.79	40.17%	1330.79	133.08		
Total	15	3313.18	100.00%				

$$\text{Bending Strength (MPa)} = 88.9 + 0.261 \text{ Infill Density (\%)} - 0.242 \text{ Print Speed (mm/s)} + 0.053 \text{ Raster Angle (}^\circ\text{)} + 22.86 \text{ Wall Thickness (mm)} - 28.7 \text{ Layer Thickness (mm)}$$

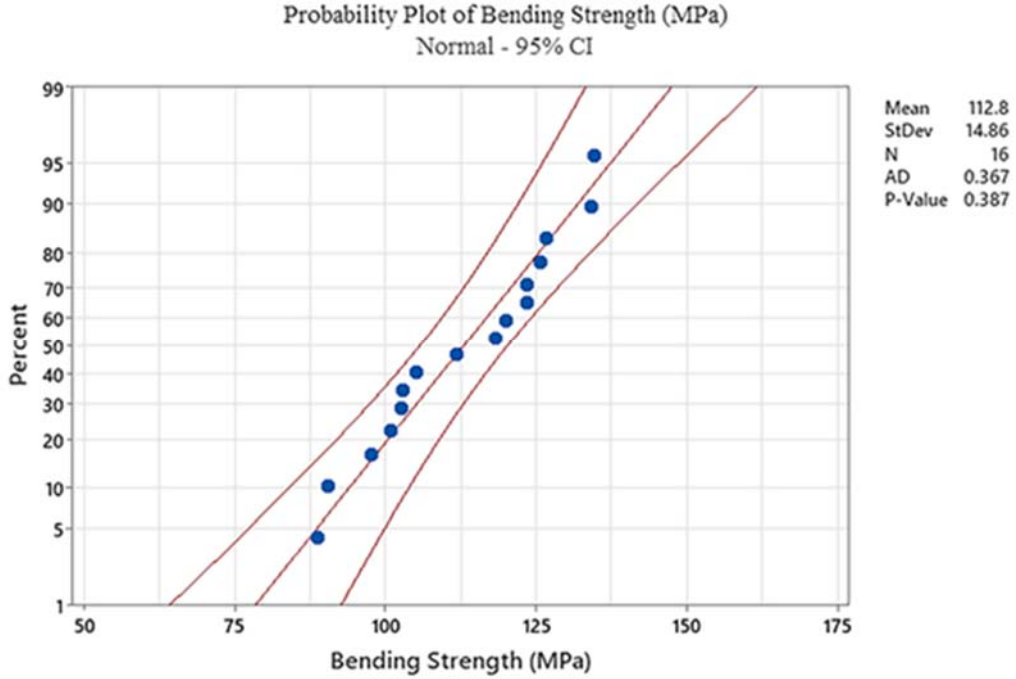
Dolgu yoğunluğu ve duvar kalınlığı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. En az katkıya sahip olan parametre raster açısı (0.99%) ve en yüksek katkıya sahip parametre ise duvar kalınlığı (28.40%) olarak bulunmuştur. Kompresyon dayanımı için S/N grafiğinde kullanılan faktörlerin seviyeleri Şekil 3.7 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Bükülme mukavemeti için S/N oranları

Doluluk oranı dördüncü seviyede (100%), printer hızı ikinci seviyede (50 mm/s), raster açısı üçüncü seviyede (45°), duvar kalınlığı dördüncü seviyede (1.5 mm) ve katman kalınlığı üçüncü seviyede (0.20 mm) olacak şekilde FDM işlem parametrelerinin

kullanılması optimum kompresyon dayanımı sağlamıştır. Eğilme dayanımı için normal olasılık grafiği şekil 3.8 'de verilmiştir.



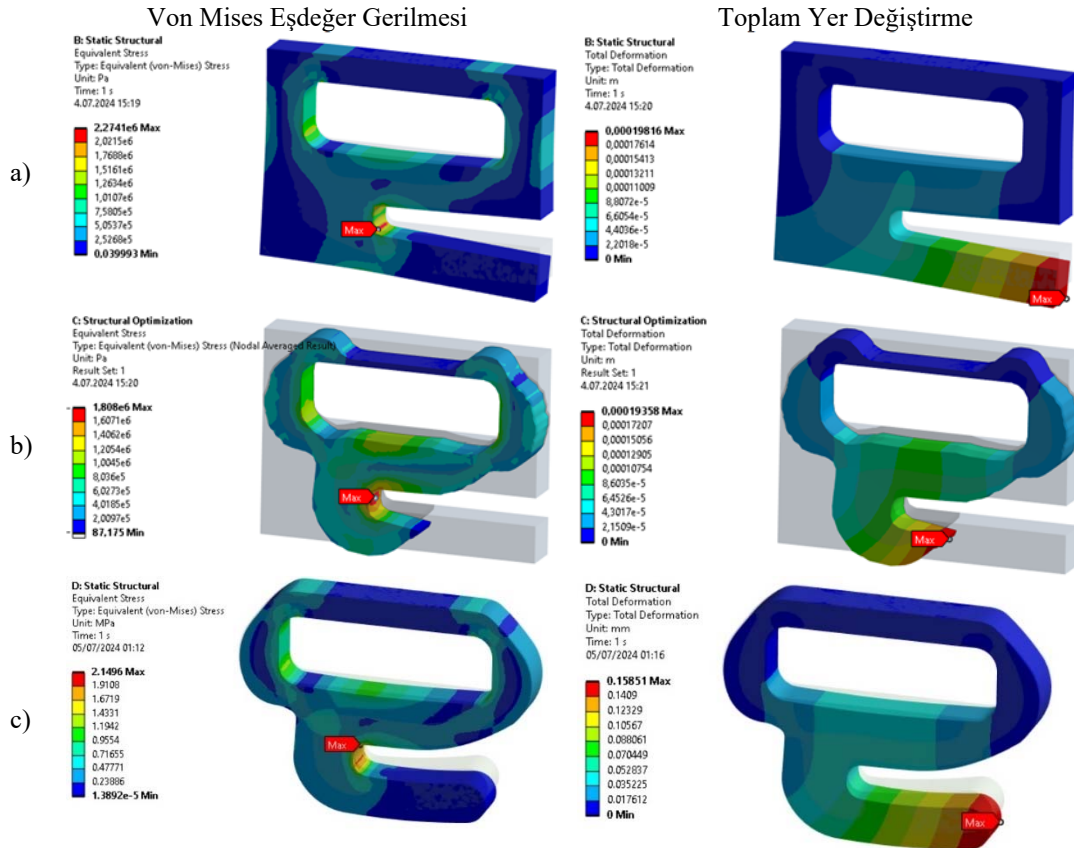
Şekil 3.8. Bükülme geriliminin olasılık grafiği

Olasılık grafiği dikkate alındığında deneysel çalışma ile matematiksel modelin uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca olasılık grafiğinde tasarım noktalarının merkez eksene yakın olduğu görülmektedir. Dengeli bir dağılım olduğu için kurulan modelin doğruluğu görülmektedir. Anova test sonuçları ve S/N oranları dikkate alındığında dolgu yoğunluğunun 4. seviyesinde, printer hızının 2. seviyesinde, raster açısının 3. seviyesinde, duvar kalınlığının 4. seviyesinde ve katman kalınlığının 3. Seviyesinde olması durumunda maksimum eğilme mukavemeti değeri elde edilmektedir. Ayrıca bu parametrik değerleri ile eğilme mukavemeti tahmini üretildiğinde S/N oranının 44.1325 ve çekme dayanımının 153.430 MPa olduğu elde edilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Parça tasarımı ve analizi

Yapılan araştırma sonucunda kancalı poşet taşıyıcımızın hacmi %50 azaltılmıştır. Parçamızın ağırlığı 0,27262 kg iken topoloji optimizasyon sonucunda 0,13631 kg olarak %50 ağırlık azaltılmış olmuştur. Parçamızın yeniden modellenerek parçamızın ağırlığı 0,19757 kg olarak %27,5 oranda azaltılmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere tek kancalı poşet taşıyıcı aparatın topoloji optimizasyonu öncesi, topoloji optimizasyonu ve sonrası parçamızın statik analiz ve deformasyon analizi sonuçları gösterilmiştir.



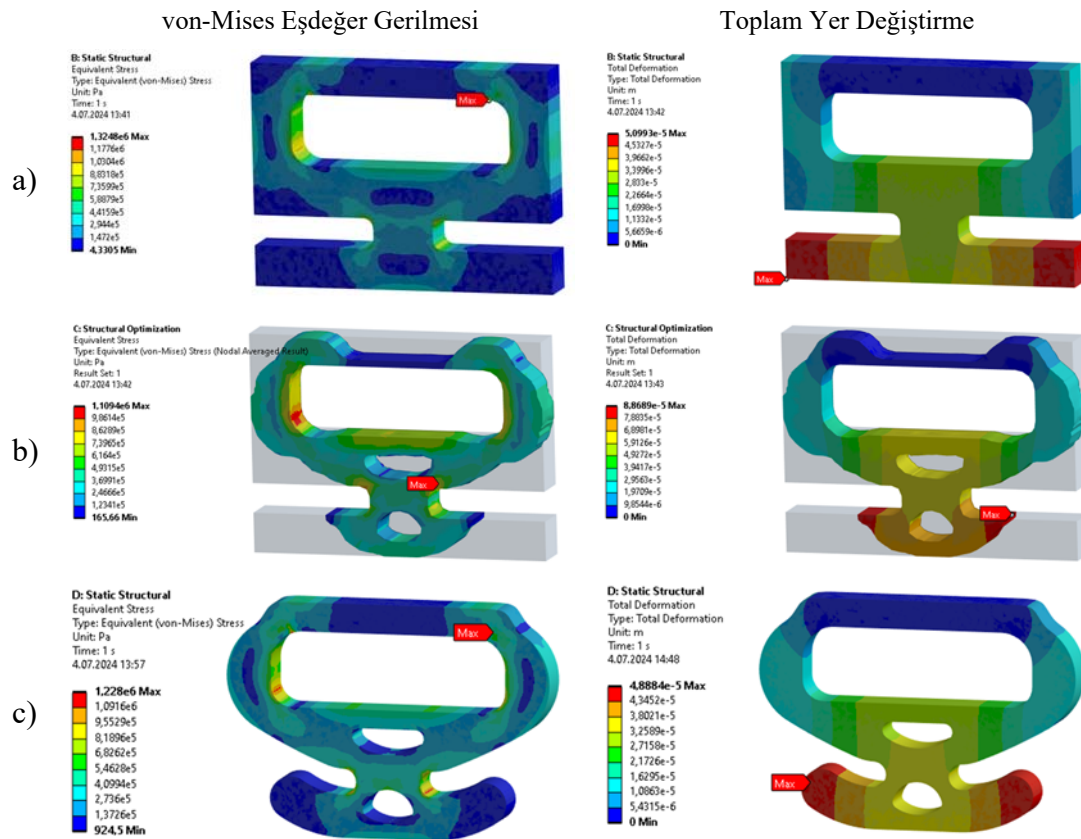
Şekil 4.1. Tek kancalı poşet taşıma aparatı sonlu elemanlar analiz sonuçları a) Topoloji optimizasyonu öncesi b) topoloji optimizasyonu c) Topoloji optimizasyonu sonrası

Topoloji optimizasyonu öncesinde gerçekleştirilen statik analiz sonuçlarına göre tek kancalı poşet taşıyıcı aparat üzerinde maksimum von Mises eşdeğer gerilme kanca dibinde görülmüş ve değeri 2.27 MPa olarak elde edilmiştir. Toplam yer değiştirme ise

kanca ucunda bulunmuştur.

Optimizasyon işleminde kanca üzerindeki geometrik değişim açık bir şekilde gözlenmiş ve maksimum gerilme değeri yine kanca dibinde görülmüştür. Gerilme değeri 1.8 MPa olarak gözlenmiştir. Gerilme değerleri kanca dibinde maksimum olarak görülse bile el tutamağı köşelerinde de kayda değer gerilme değerleri bulunmuştur.

Optimizasyon sonucunda parça geometrisinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiş ve parça ergonomisi hem ele hem de poşet taşıma görevine uygun hale dönüştürülmüştür. Bu işlem sonucunda gerçekleştirilen statik analiz sonuçlarına göre maksimum gerilme değeri 2.14 MPa olarak elde edilmiş ve kancanın dip kısımlarında gözlenmiştir. Çift kancalı poşet taşıma aparatının topoloji optimizasyonu prosedürü şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Çift kancalı poşet taşıma aparatı sonlu elemanlar analiz sonuçları a) Topoloji optimizasyonu öncesi b) topoloji optimizasyonu c) Topoloji optimizasyonu sonrası

Topoloji optimizasyonu öncesinde parçamız üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre maksimum von Mises eşdeğer gerilmesinin elin çift kancalı poşet taşıyıcı aparatını tuttuğu köşelerde oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.2-a). Gerilme değeri olarak maksimum 1.32 MPa bulunmuştur. Yer değiştirme sonuçlarına bakıldığında en büyük değerin kancanın uçlarında olduğu görülmüş ve büyüklüğünün 0.05 mm olarak elde edildiği gözlenmiştir.

Topoloji optimizasyon ile parçanın tasarımında gözle görülebilir şekilde değişimler olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.2-b). En büyük değişim parçanın hacminde oluşmuşken parçanın kanca kısmı ile el kısmı arasında iki adet küçük boşluk meydana gelmiştir. Parça üzerindeki maksimum gerilme değeri 1.1 MPa olarak parçanın kanca diplerinde ve kol tutamağı kısımlarında görülmüştür. En büyük yer değiştirme kanca uçlarında gözlenmiş ve değeri 0.08 mm olarak bulunmuştur.

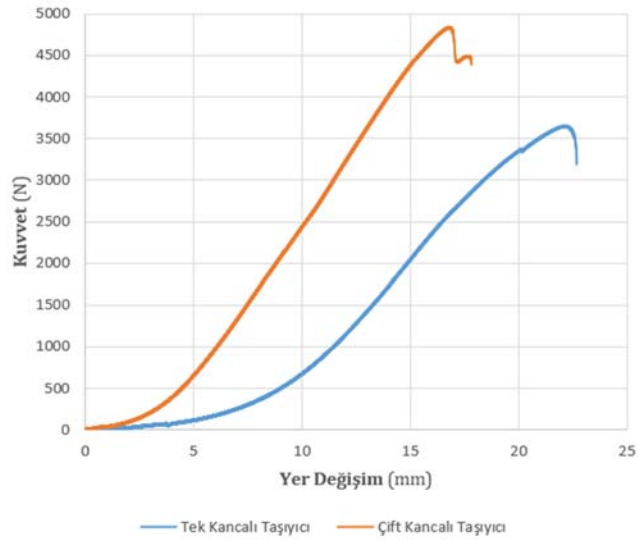
Topoloji optimizasyonu sonucuna göre yapılan iyileştirmeler sonucunda gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre maksimum gerilme değeri 1.22 MPa olarak el tutamağı köşelerinde ve kanca diplerinde olduğu gözlenmiştir.

Taguchi analizi sonuçlarına göre en büyük gerilme değerlerini veren giriş parametrelerine göre Tek ve Çift kancalı poşet taşıma aparatı Eİ ile PLA malzemesinden üretilmiştir. Tek ve çift kancalı poşet taşıyıcı aparatlarına ait gerçekleştirilen çekme test uygulaması ve sonuçları Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Tek Kancalı Poşet Taşıyıcı



Çift Kancalı Poşet Taşıyıcı



Şekil 4.3. Tek ve Çift kancalı poşet taşıyıcı aparatlarının çekme test uygulaması ve sonuçları

Grafik incelendiği zaman çift kancalı poşet taşıma aparatı çekme dayanımının tek

kancalıya göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çift kancalı parçanın yaklaşık olarak 470 kg'lık kuvvette deformeye uğradığı, buna karşın tek kancalı parçanın yaklaşık olarak 360 kg'lık kuvvette bozulduğu gözlenmiştir. Mekanik test sonucunda şekli bozulan parçalar incelendiği zaman hasarların ya kol tutamak kısımlarında olduğu ya da kanca diplerinde bulunduğu görülmüştür (Şekil 4.3). Bu sonuçlar nümerik analizi kanıtlar niteliği taşımaktadır. Nümerik analizde gerilme değerlerinin maksimum olduğu bölgeler kol tutamağı ve kanca dipleriydi (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Literatürde yapılan topoloji optimizasyon ve eklemeli imalat araştırmaları ortak noktası daha az hacim ile daha iyi parça üretebilmek olduğu öngörülmüştür. Topoloji optimizasyonu ile tasarlanan parçaların genel sorunu karışık şekle sahip olması ve bu durumunda üretimi zorlaştırmasıdır. Bu parçaların daha az hata ile üretilmesi için eklemeli imalat yöntemi kullanılmaktadır. Çizelge 5.1’ de topoloji optimizasyonu öncesi, topoloji optimizasyonu ve sonrası kütle, maksimum von Mises eşdeğer gerilme ve toplam yer değiştirme verilerinin karşılaştırıldığı görülmektedir.

Çizelge 5.1 Tek kancalı poşet taşıma aparatı için optimizasyon öncesi, optimizasyon ve sonrası değerlerin karşılaştırılması

Değerler/Sonuçlar	İlk Tasarım	İyileştirilmiş 1.Tasarım	% Değişim	İyileştirilmiş 2.Tasarım	% Değişim
Kütle (kg)	0,283	0,150	-47	0.198	-30
Maksimum von Mises Eşdeğer Gerilme (MPa)	2,274	1,808	-20,49	2,149	-5,50
Toplam Yer Değiştirme (mm)	0,198	0,194	-2	0,158	-20

Çizelge 5.1 incelendiği zaman optimizasyon öncesi tasarım ile optimizasyon ve sonrası tasarımlar arasındaki farklar görülmektedir. İyileştirilmiş 1. Tasarım optimizasyon ile ortaya çıkan tasarımdır. Bu çalışmada bu tasarımın direk kullanılması ergonomi ve dayanım açısından uygun olmadığı için İyileştirilmiş 2. Tasarım yapılmıştır. Böylece daha ergonomik ve aynı görevi üstlenen dayanımı yüksek tasarım ortaya çıkarılmıştır. Optimizasyon sonucunda parça üzerinde %30 kütle azaltımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca gerilme değerinde de %5.5 oranında azalma meydana gelmiştir.

Çizelge 5.2’de çift kancalı poşet taşıma aparatına ait optimizasyon verileri gösterilmiştir. Bu veriler ile optimizasyon işleminin ne kadar etkili olduğu görülmektedir. Verilen bilgilere göre çift kancalı aparatın İyileştirilmiş 1. Tasarım aşamasında kütle azaltımı %50 oranında gerçekleşirken gerilme dayanımı azaltımı %15.98 olarak bulunmuştur. Bu aşamadaki tasarım ergonomik ve tasarım açısından uygun olmadığı için geometrik olarak

iyileştirmeler yapılmış ve İyileştirilmiş 2. Tasarım ortaya çıkarılmıştır. Bu tasarım ile İlk Tasarım arasındaki kütle azaltma %27.52 oranında gerçekleştirilmişken gerilme dayanımı azaltımı % 7.57 oranında elde edilmiştir.

Çizelge 5.2 Çift kancalı poşet taşıma aparatı için optimizasyon öncesi, optimizasyon ve sonrası değerlerin karşılaştırılması

Değerler/Sonuçlar	İlk Tasarım	İyileştirilmiş 1.Tasarım	% Değişim	İyileştirilmiş 2.Tasarım	% Değişim
Kütle (kg)	0,27262	0,13631	-50	0,19757	-27,52
Maksimum von Mises Eşdeğer Gerilme (MPa)	1,32	1,109	-15,98	1,22	-7,57
Toplam Yer Değiştirme (mm)	0,05	0,088	24	0,048	-4

Yapılan bu çalışma ile tek ve çift kancalı poşet taşıma aparatı üzerinde kütle azaltımı ve gerilme dayanımlarında iyileştirme gerçekleştirilmiştir. Çalışma sayesinde her alanda yapılan tasarımlarda topoloji optimizasyonu kullanılarak parçaların ergonomileri ve geometrik yapıları iyileştirilebilir. İleriki çalışmalarda topoloji optimizasyonunun yanında parça iç yapılarında gözenekli yapılar kullanılarak kütle azaltımları daha da artırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abeykoon, C., Vd. (2020). "Optimization Of Fused Deposition Modeling Parameters For Improved Pla And Abs 3d Printed Structures." *International Journal Of Lightweight Materials And Manufacture* **3**(3): 284-297.
- Abouelmajd, M., Vd. (2022). "Experimental And Numerical Study Of The Influence Of Fff Process Parameters On The Flexural Properties Of 3d Printed Medical Devices And Personal Protective Equipment." *International Journal Of Modelling, Identification And Control* **40**(3): 219-230.
- Ahmad, N., Vd. (2022). "A Systematic Review Of Fused Deposition Modeling Process Parameters." *Soft Science* **2**(3): 11.
- Anonim (2020). Eklemeli İmalat Teknolojileri Yol Haritası (Eityh) Odak Teknoloji Ağı (Otağ) Sonuç Raporu. T. C. C. S. S. Başkanlığı: 130.
- Anonim (2023). İstanbulda Eklemeli İmalat Ekosistemi.
- Astm (2012). Standard Terminology For Additive Manufacturing Technologies. Annual Book Of Astm Standards Book.
- Atakok, G., Vd. (2022). "Tensile, Three-Point Bending And Impact Strength Of 3d Printed Parts Using Pla And Recycled Pla Filaments: A Statistical Investigation." *Journal Of Materials Research And Technology* **18**: 1542-1554.
- Aydın, M., Vd. (2019). "Farklı Yazdırma Parametrelerinde Pla Filamentin İşlem Performansının İncelenmesi." *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry* **3**(2): 102-115.
- Babbar, A., Vd. (2021). "Functionalized Biomaterials For 3d Printing: An Overview Of The Literature." *Additive Manufacturing With Functionalized Nanomaterials*: 87-107.
- Bakır, A. A., Vd. (2021). "Mechanical Properties Of Thermoplastic Parts Produced By Fused Deposition Modeling: A Review." *Rapid Prototyping Journal* **27**(3): 537-561.
- Bozer, M. Y. (2023). Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Parçalarda Rassal Titreşim Tabanlı Topoloji Optimizasyonu / Topology Optimization Design For Additively Manufactured Parts Based On Random Vibration. Makine Mühendisi, Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı /

Makine Mühendisliği Bilim Dalı.

- Doshi, M., Vd. (2022). "Printing Parameters And Materials Affecting Mechanical Properties Of Fdm-3d Printed Parts: Perspective And Prospects." *Materials Today: Proceedings* **50**: 2269-2275.
- Frățilă, D. Ve H. Rotaru (2017). *Additive Manufacturing—A Sustainable Manufacturing Route*. Matec Web Of Conferences, Edp Sciences.
- Gotkhindikar, N. N., Vd. (2023). "Optimized Deep Neural Network Strategy For Best Parametric Selection İn Fused Deposition Modelling." *International Journal On Interactive Design And Manufacturing (Ijidem)*: 1-10.
- Görür, H. (2018). "Lightweight Design For An Engine Structural Part By Using Topology Optimization For Additive Manufacturing."
- Gülcan, O., Vd. (2021). "The State Of The Art Of Material Jetting—A Critical Review." *Polymers* **13**(16): 2829.
- Gülcan, O., Vd. (2022). "Ağırlık Azaltma Amacıyla Elektron Işını İle Ergitme Yöntemiyle Üretilen Bir Uçak Parçasının Tasarımı, Topoloji Optimizasyonu Ve Testi." *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry* **6**(2): 207-217.
- Heidari-Rarani, M., Vd. (2022). "Optimization Of Fdm Process Parameters For Tensile Properties Of Polylactic Acid Specimens Using Taguchi Design Of Experiment Method." *Journal Of Thermoplastic Composite Materials* **35**(12): 2435-2452.
- Ji-Hong Zhu, W.-H. Z., Liang Xia (2016). "Topology Optimization İn Aircraft And Aerospace Structures Design."
- Kahraman, F. Ve M. Küçük (2020). "Otomotiv Endüstrisinde Topoloji Optimizasyonu İle Ağırlık Azaltma Uygulaması Üzerine Bir Araştırma." *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*(20): 623-631.
- Kam, M., Vd. (2023). "Investigation Of The Effect Of Fdm Process Parameters On Mechanical Properties Of 3d Printed Pa12 Samples Using Taguchi Method." *Journal Of Thermoplastic Composite Materials* **36**(1): 307-325.
- Koçak, A. T. (2023). *Uçak Braketinde Topoloji Optimizasyonu Ve Analizi*, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Konal, M. (2023). *Konteynır Gemisi Ambar Kapağının Topoloji Optimizasyonu Yöntemiyle Tasarım İyileştirmesi*. Yüksek Lisans. Karabük, Karabük

Üniversitesi: 98.

- Mirzababaei, S. Ve S. Pasebani (2019). "A Review On Binder Jet Additive Manufacturing Of 316l Stainless Steel." *Journal Of Manufacturing And Materials Processing* **3**(3): 82.
- Nohut, S. Ve M. Schwentenwein (2022). "Vat Photopolymerization Additive Manufacturing Of Functionally Graded Materials: A Review." *Journal Of Manufacturing And Materials Processing* **6**(1): 17.
- Öğüçlü, Ö. Ve Ç. Yıldırım (2022). "Geri Dönüşüm Makinalarında Topoloji Optimizasyonu İle Ağırlık Azaltma Uygulaması."
- Öney, Ç. K. (2021). *Eklemeli İmalat Teknolojileri Ve Medikal Uygulamaları*. Fen Bilimleri Enstitüsü. Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi.
- Özsoy, K. Ve B. Duman (2017). "Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği." *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry* **1**(1): 36-48.
- Özsoy, K., Vd. "Havacılık, Uzay Ve Savunma Sanayi İçin Eklemeli İmalat İle Metal Parça İmalatı."
- Raja, S., Vd. (2022). "Development And Experimental Analysis Of Polymer Based Composite Bipolar Plate Using Aquila Taguchi Optimization: Design Of Experiments." *Polymer Composites* **43**(8): 5522-5533.
- Sajjad, R., Vd. (2023). "Impact Of Multiple Infill Strategy On The Structural Strength Of Single Build Fdm Printed Parts." *Journal Of Manufacturing Processes* **89**: 105-110.
- Savaşkan, P. D. T. (2009). *Malzeme Bilgisi Ve Muayenesi*.
- Seppala, J. E., Vd. (2017). "Weld Formation During Material Extrusion Additive Manufacturing." *Soft Matter* **13**(38): 6761-6769.
- Singh, R., Vd. (2020). "Powder Bed Fusion Process İn Additive Manufacturing: An Overview." *Materials Today: Proceedings* **26**: 3058-3070.
- Sürmen, H. K. (2019). "Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar." *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* **24**(2): 373-392.
- Vuijk, W. (2020). "Shape And Topology Optimized Tshd Midsection."
- Yalçın, B. Ve B. Ergene (2017). "Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-D Eklemeli İmalat

Yöntemi Ve Metalurjisi." Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi 9(3): 65-88.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://media.licdn.com> 07/01/2023

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Celalettin Mert
Doğum Yeri ve Tarihi : Bolvadin / 27.09.1993
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : 05367052403

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bolvadin Anadolu Lisesi (2007 – 2011)
Lisans : Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri
Fak. Makine Mühendisliği Böl., (2011– 2015)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Makine
Mühendisliği Yüksek lisans, (2021 – 2024)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: Teksan Mühendislik (2015 – 2015)

: Türk Standartları Enstitüsü (2017 – Devam Ediyor)

Yayınları (SCI ve diğer) :

Mert, C., ve Verim, Ö. Tersine Mühendislik Yaklaşımıyla Tarım Makine Parçasının
Özellik Tabanlı Rekonstrüksiyon Stratejisiyle Üç Boyutlu Modellenmesi Ve
Değerlendirilmesi.