



**EKLEMELİ İMALATTA ÇOK PARÇALI MONTAJLARIN PARÇA
SÖKME KARMAŞIKLIĞI YÖNTEMİ KULLANILARAK
KONSOLİDASYONU**

Yeliz AÇIKEL

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Yeliz AÇIKEL

08/ 01/ 2024

EKLEMELİ İMALATTA ÇOK PARÇALI MONTAJLARIN PARÇA SÖKME KARMAŞIKLIĞI YÖNTEMİ KULLANILARAK KONSOLİDASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Yeliz AÇIKEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemleri ile imali mümkün olmayan karmaşık geometrileri üretmeyi sağlayan bir üretim teknolojisidir. İyi bir tasarımcının imalat yöntemlerine hâkim olması ve tasarımlarını bu doğrultuda şekillendirmesi gerekmektedir. Tam da bu amaç doğrultusunda tasarımcılar karmaşık yapıya sahip tasarımlarını, geleneksel imalat yöntemleri ile üretebilecek şekilde birden fazla parçalı, hiyerarşik yapılar ve alt montajlar halinde oluştururlar. Eklemeli imalat bu noktada tasarımcılar için bir çözüm noktası sağlamaktadır. Karmaşık yapıları üretebilme özelliğinden dolayı çok parçalı yapıların belli kurallar içinde birleştirilerek üretilebilmesine imkân sağlar. Parça konsolidasyonu olarak tabir edilen bu yöntem sayesinde daha az sayıda parçadan oluşan tasarımları mümkün kılar. Bu çalışma parça konsolidasyonunu matematiksel bir karşılığa dayandırarak, eklemeli imalat için tasarım kuralları belirlemektedir. Çok parçalı yapıları ürün sökme karmaşıklığına göre analiz ederek, yapıyı oluşturan alt parçalardan hangilerinin konsolide edilebileceğini gösteren bir yöntem üzerinde çalışılmıştır. Ürün sökme karmaşıklığına dayandırılan yöntem tasarımın her bir alt detayı için tek parça karmaşıklık indeksi hesaplar. Tek parça karmaşıklık indeksi yüksek olan detaylar konsolide edilebilecek adaylar olarak tanımlanır. İlgili yönteme göre çok parçalı yapılar belirlenen kurallara göre konsolide edilebilir. Konsolide edilmeye aday olan parçalar, eklemeli imalat yöntemi kriterleri göz önüne alınarak değerlendirilir ve eklemeli imalat ile üretiminin uygunluğu kontrol edilir. Uygun olan parçalar konsolide edilecek şekilde, parçanın topolojik optimizasyonu yapılır. Çıkan sonuçlar karşılaştırılarak tasarım gereksinimlerine göre uygunluğu değerlendirilir. Kullanılan yöntem örnek bir durum çalışmasına da uygulanmıştır. İlk tasarıma göre 5 parçadan oluşan bir montaj yapısı, konsolidasyon sonrası tek parçaya düşürülmüştür. Parça sayısında %80 oranında elde edilen kazanımın yanında, ağırlıkta da %82 oranında azalma gözlemlenmiştir. Üretim analizleri gerçekleştirilen yapı için maliyet anlamında %27,5 oranında iyileşme görülmüştür.

Bilim Kodu : 91439

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, parça konsolidasyonu, topoloji optimizasyonu, ürün sökme karmaşıklığı, karmaşık yapı

Sayfa Adedi : 96

Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

PART CONSOLIDATION OF MULTIPLE-PART PRODUCTS USING PRODUCT
DISASSEMBLY COMPLEXITY ON ADDITIVE MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

Yeliz AÇIKEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Additive manufacturing gives an opportunity to produce complex geometries which is not possible using conventional manufacturing methods. An ideal designer should understand manufacturing methods and create his/ her designs in this respect. For this reason, designers create multiple-parts, hierarchical structures and sub-assemblies on their designs to produce using conventional manufacturing methods. At this point additive manufacturing gives a solution to designers. Thanks to the production of complexity geometries on additive manufacturing technology, multiple-part products may be consolidated within some design rules. It is possible to have less part count on designs by means of part consolidation method. On this thesis work, part consolidation is based on a mathematical process and some design rules are obtained. Multiple-part products are analyzed per product disassembly complexity and a method is proposed to show which parts may be consolidated on related product. According to product disassembly complexity method, for each part of a product, a single part complexity index is calculated. Parts that have high single part complexity index are defined candidates for part consolidation process. Multiple-part products may be consolidated per determined design rules. Part consolidation candidates are evaluated per additive manufacturing restrictions and checked the possibility to produce using this technology. For new consolidated module, topology optimization is performed. Results are evaluated per design requirements. For this method, a case study is worked. Initial design has 5 part count. After consolidation process, part count is decreased only 1. 80% gain is obtained on part count, 82% on total weight. Cost analysis is calculated and 27,5% gain is obtained per product.

Science Code : 91439

Key Words : Additive manufacturing, part consolidation, topology optimization,
product disassembly complexity, complex geometry

Page Number : 96

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde çok değerli katkılarda bulunan ve bu süreç boyunca bana her türlü desteği sağlayan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a.

Yorumları, desteği ve bilgisi ile çalışmaya katkıda bulunan çalışma arkadaşım Dr. Remzi Ecmel ECE'ye

Teknik anlamda bana çok yardımcı olan ve bu süreçte beni destekleyen arkadaşım Evren KUTLU'ya

Yine bu süreçte bana destek olan ve manevi olarak her zaman yanımda hissettiğim, çalışma arkadaşlarıma,

Tez çalışmam için sağladığı her türlü destek için Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ'ye,

Hayatımın her aşamasında bana maddi, manevi destek olan ve yardımlarını bu süreçte de esirgemeyen anne ve babama,

Tez çalışmam sürecinde beni destekleyen, yardım eden eşim Hakan Hakkı AÇIKEL'e ve bana güç veren biricik kızım Ayşe Duru AÇIKEL'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Eklemeli İmalat	5
2.1.1. Eklemeli imalatın avantajları	5
2.1.2. Eklemeli imalat teknolojisinden yararlanan endüstriler.....	6
2.1.3. Eklemeli imalatta kısıtlamalar.....	8
2.2. Eklemeli İmalatın Temelleri.....	9
2.2.1. Foto-heykel yöntemi	10
2.2.2. Topografya yöntemi.....	11
2.2.3. Malzeme biriktirme yöntemi	12
2.3. Eklemeli İmalat İçin Tasarım (DFAM).....	13
2.4. Eklemeli İmalatta Tasarım Metotları	18
2.4.1. Topolojik Optimizasyon.....	18
2.4.2. Parça Entegrasyonu ve Tamiri	20
2.4.3. Parça Konsolidasyonu	21

3. PARÇA KONSOLİDASYONUNA ADAY OLACAK PARÇALARIN BELİRLENMESİ.....	25
3.1. Adım 1 – Ürün Bağımlılık Analizi.....	27
3.2. Adım 2 – Tek Parçanın Karmaşıklık Analizi	30
3.2.1. Ürün sökme karmaşıklığı (PDC).....	30
3.2.2. Tek parça karmaşıklık indeksi (SCCI)	35
3.3. Adım 3 – Modüllerin Belirlenmesi	42
3.3.1. Bitişiklik matrisinin (A) oluşturulması.....	43
3.3.2. Markov matrisinin (M) oluşturulması.....	45
3.4. Adım 4 – Modüllerin Eklemeli İmalat Açısından Değerlendirilmesi	51
3.5. Adım 5 – Ürünün Ürün Sökme Karmaşıklığı Açısından Değerlendirilmesi.....	52
4. KONSOLİDE YAPININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU ve YAPISAL ANALİZİ.....	57
4.1. Konsolide Yapının Topoloji Optimizasyonu	57
4.2. Orijinal Yapının Yapısal Analizi	63
4.3. Konsolide Yapını Yapısal Analizi.....	64
5. ÜRETİM ve MALİYET DEĞERLENDİRMESİ.....	71
5.1. Ön Prototip Üretimi	71
5.2. Geleneksel Metotlar ile İmalat, Maliyet Analizi ve Değerlendirmesi	74
5.3. SLM Yöntemi ile İmalat, Maliyet Analizi ve Değerlendirmesi	74
6. ÇALIŞMA SONUÇLARI ve TARTIŞMALAR.....	77
6.1. Çalışma Sonuçları ve Değerlendirmeler	77
6.2. Karşılaştırmalar ve Tartışmalar	80
7. SONUÇLAR ve İLERİKİ ÇALIŞMALAR.....	83
7.1. Sonuçlar	83

	Sayfa
7.2. İleriki Çalışmalar	85
KAYNAKLAR	87
EKLER.....	91
EK-1. Durum çalışmasını oluşturan parçaların ölçüleri	92
EK-2. Eklemeli imalat tezgâhlarının genel görünümü	95
ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Geleneksel imalata göre avantajları	6
Çizelge 2.2. Eklemeli imalattan yararlanan endüstriler- a	7
Çizelge 2.3. Eklemeli imalattan yararlanan endüstriler- b.....	8
Çizelge 3.1. Manuel sökme için sökme özellikleri	33
Çizelge 3.2. Manuel sökme için değerler	34
Çizelge 3.3. Durum çalışması için belirlenen manuel sökme değerleri	40
Çizelge 5.1. Geleneksel metotlar ile üretim maliyetleri kırılımı.....	74
Çizelge 5.2. SLM simülasyon için kullanılan proses parametreleri.....	75
Çizelge 5.3. SLM ile üretim maliyetleri kırılımı.....	76
Çizelge 6.1. Belirlenen kriterlere göre ilk ve son durum karşılaştırılması.....	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Geleneksel imalata göre eklemeli imalat performansı.....	5
Şekil 2.2. Merdiven etkisi	9
Şekil 2.3. Farklı sipariş miktarları ve üretim yöntemlerine göre ürün başına maliyet....	16
Şekil 2.4. İç kanalların fonksiyon yönlü tasarımı	17
Şekil 2.5. Vana girişinin detayı.....	18
Şekil 2.6. 2B Tasarım bölgesinin topolojik optimizasyonu: a – sınır koşullar, b – farklı hacim kesirlerindeki sonuçlar, c – farklı filtre yarıçapı ile sonuçlar, d – düğüm sayısına göre sonuçlar	20
Şekil 2.7. Hava alığı örneği.....	23
Şekil 3.1. Parça konsolidasyonuna aday olacak parçaların belirlenmesi için kullanılan yöntemin adımları	25
Şekil 3.2. Durum çalışması - menteşe bağlantı parçasının genel yapısı ve genel ölçüleri	26
Şekil 3.3. DSM örneği ve eşleniği olan düğüm bağlantı diyagramı	27
Şekil 3.4. DSM örneği	28
Şekil 3.5. Durum çalışması için alt montajı oluşturan parçalar ve tanımlamaları	28
Şekil 3.6. Durum çalışması için parçalar arası ilişkileri gösteren düğüm bağlantı diyagramı.....	29
Şekil 3.7. Durum çalışması için düğüm bağlantı diyagramı esas alınarak oluşturulan DSM.....	30
Şekil 3.8. Karmaşıklık Seviyeleri	32
Şekil 3.9. Alfa (karşı parça açısına dik döndürme) ve beta (karşı parça doğrultusunda döndürme) simetri açılarının gösterimi.....	35
Şekil 3.10 Durum çalışması için parçalar arası ara yüz bağlantılarının tanımlanması ...	37
Şekil 3.11 Durum çalışması için oluşturulan DSM (düğüm noktalarına kendi döngülerinin eklenmiş hali).....	43
Şekil 3.12. Durum çalışması için oluşturulan Bitişiklik matrisi A	45

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Durum çalışması için oluşturulan Markov matrisi M.....	47
Şekil 3.14. N_y parçalı yapılarda konsolidasyon yaklaşımı.	55
Şekil 4.1. Durum çalışması için kullanılan kabuller ve kısıtlar.	57
Şekil 6.1. Durum çalışmasının aşamalara göre yapısı	78
Şekil 6.2. Karşılaştırma kriterleri ve elde edilen sonuçlar	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Willeme'nin sanat atölyesinden bir kesit.....	10
Resim 2.2. Munz tarafından amaçlanan katman üretim sistemi	11
Resim 2.3. Topografik rölyef haritaları için gerekli kalıpların yapım metodu	12
Resim 2.4. Kaynak biriktirme yöntemi ile oluşturulan metalik objeler	12
Resim 2.5. Tahta kalem kapağı ilk tasarım (aşağıda), müşteri geri dönüşüne göre son tasarım (yukarıda).....	15
Resim 2.6. Eklemeli imalat için topolojik optimizasyonu yapılmış mafsallık parçası. (A) ilk tasarım, (B) topolojik optimizasyona göre yeni tasarım, (C) eklemeli imalat ile üretilmiş mafsallık.....	18
Resim 2.7. Eklemeli imalat ile kabartma eklenen hibrit muhafaza	21
Resim 2.8. Jet motoru kapak mandalının konsolidasyonu (A) 5 parçadan oluşan ilk tasarım, (B) tek bir parça olarak konsolide edilmiş yeni tasarım, (C) eklemeli imalat ile üretilmiş jet motoru kapak mandalı.....	22
Resim 3.1. Markov matrisinin MATLAB programında gösterimi.....	48
Resim 3.2. Expansion adımının oluşturulması.....	48
Resim 3.3. Inflation adımının oluşturulması.....	49
Resim 3.4. Normalize edilerek elde edilen Markov matrisi.....	49
Resim 3.5. 2. iterasyonda elde edilen Markov matrisi	49
Resim 3.6. 3. iterasyonda elde edilen Markov matrisi	50
Resim 3.7. 4. iterasyonda elde edilen Markov matrisi	50
Resim 3.8. 5. iterasyonda elde edilen Markov matrisi	50
Resim 3.9. 6. iterasyonda elde edilen Markov matrisi	51
Resim 3.10. Markov matrisi sonucu konsolide edilebilen parçaların görünümü	51
Resim 3.11. Durum çalışması için PDC hesaplanması	54
Resim 4.1. Konsolide parçanın 3B katı modellenmesi ve eksenlerinin genel gösterimi	58

Resim	Sayfa
Resim 4.2. Autodesk Fusion 360 - model üzerinde tanımlanan bölgelerin genel görünümü (a) korunması beklenen bölgeler, (b) kaldırılması beklenen bölgeler, (c) tanımlanan başlangıç geometrisi, (d) tanımlanan tüm bölgelerin görünümü.	59
Resim 4.3. Autodesk Fusion 360 - yapı üzerine tasarım koşullarını uygulanması (a) deliğe gelen yükler, (b) yüzeylere gelen yükler	60
Resim 4.4. Autodesk Fusion 360 – yapı üzerine kriterlerinin uygulanması, (a) belirlenen kütle hedefi ve güvenlik faktörü, (b) belirlenen üretim hedefleri	60
Resim 4.5. İlk optimizasyon sonucunun 3B katı model görünümü, (a) Autodesk Fusion 360 genel görünümü, (b) CATIA V5 genel görünümü.....	61
Resim 4.6. (a) İlk optimizasyonun düzenlenmiş olan 3B katı model görünümü, (b) ikinci optimizasyon öncesi tasarım koşullarının ve kriterlerinin 3B model üzerinde tanımlanması.....	62
Resim 4.7. İkinci optimizasyon sonucunun 3B katı model görünümü, (a) Autodesk Fusion 360 genel görünümü, (b) CATIA V5 genel görünümü	62
Resim 4.8. Orijinal yapının yapısal analizi, (a) ağ yapısının genel görünümü, (b) analiz girdilerini model üzerine uygulanmış halinin genel görünümü ...	63
Resim 4.9. Orijinal yapının yapısal analiz sonuçları, (a) gerilme dağılımı sonuçları, (b) yer değiştirme sonuçları	64
Resim 4.10. İlk yapısal analiz sonuçları, (a) analize sokulan yapının 3B katı model görünümü, (b) yapısal analizde elde edilen yer değiştirme sonuçları (c) yapısal analizde elde edilen güvenlik faktörü sonuçları, (d) yapısal analizde elde edilen gerilme dağılımı sonuçları.....	65
Resim 4.11. İkinci yapısal analiz sonuçları, (a) analize sokulan yapının 3B katı model görünümü, (b) yapısal analizde elde edilen yer değiştirme sonuçları (c) yapısal analizde elde edilen güvenlik faktörü sonuçları, (d) yapısal analizde elde edilen gerilme dağılımı sonuçları.....	67
Resim 4.12. Üçüncü yapısal analiz sonuçları, (a) analize sokulan yapının 3B katı model görünümü, (b) yapısal analizde elde edilen yer değiştirme sonuçları (c) yapısal analizde elde edilen güvenlik faktörü sonuçları, (d) yapısal analizde elde edilen gerilme dağılımı sonuçları.....	68
Resim 4.13. Elde edilen yapısal analiz sonuçlarının tasarım yapılarına göre karşılaştırılması	69
Resim 5.1. Konsolide yapının GrabCAD programında oryantasyonu	71

Resim	Sayfa
Resim 5.2. Ara yüz programında parça geometrisi ve desteklerin genel görünümü	72
Resim 5.3. Propotip imalatı gerçekleştirilen parçanın genel görünümü ve ölçüleri	73
Resim 5.4. Prototip imalatı gerçekleştirilen parçanın temizlenmiş hali ve ölçüleri.....	73
Resim 5.5. Konsolide yapının Materialise Magic programında oryantasyonu ve parça geometrisi ile desteklerin genel görünümü	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Bitişiklik matrisi
CI	Parça karmaşıklık indeksi
C_k	k' nıncı parçanın ortalama sökme zorluk faktörü
C_{c,j}	j' nıncı özelliğin sökme zorluk faktör değeri
C_{i,n}	n' nıncı ara yüz özelliğinin sökme zorluk faktör değeri
E_e	Young modülü
E₀	Malzemenin young modülü
E_{min}	Boşluk bölgesindeki malzemenin young modülü
F	Global kuvvet faktörü
f	Saptanmış hacim kesri
I_k	k' nıncı parçanın ortalama sökme zorluk faktörü
in	inç
J	Parça karmaşıklığı için özellik sayısı
J	Joule
K	Global katılık matrisi
k₀	FE katılık matrisi
mm³	Milimetre küp
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
M	Markov matrisi
N	Ara yüz karmaşıklığı için özellik sayısı
N_c	Toplam parça sayısı
N_i	Toplam ara yüz sayısı
N_y	Yapıdaki parça sayısı
n_c	Tek olan parça sayısı
n_i	Tek olan ara yüz sayısı

Simgeler**Açıklamalar**

p	Cezalandırma faktörü
p_k	k' nıncı komponentin sayısı
sa	saat
s	saniye
N	FE adedi
U	Global yer değıştirme faktörü
u_e	FE yer değıştirme faktörü
$V(x)$	Son hacim
V_0	İlk hacim
w_k	Ara yüz karmaşıklık indeksinin ağırlık değeri
W	Watt
x_e	Sözde- yoğunluk parametresi
α	Alfa simetri açısı
β	Beta simetri açısı
°	Derece
II	Ara yüz karmaşıklık indeksi
\$	Dolar

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ASA	Akrilonitril stiren akrilat
DFAM	Design for additive manufacturing
DFM	Design for manufacturing
DFMA	Design for manufacturing and assembly
DFX	Design for excellence
DSM	Design structure matrix
FDM	Fused deposition modeling
FE	Finite element
MCL	Markov cluster algorithm
SIMP	Solid isotropic material with penalization
PDC	Product disassembly complexity

Kısaltmalar**Açıklamalar****SCCI**

Single part complexity index

SLM

Selective laser melting

SLS

Selective laser sintering

TO

Topolojik optimizasyon

2B

2 Boyutlu

3B

3 Boyutlu

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat son yıllarda hızla gelişen, tasarımcıya imalat açısından esneklik sağlayan, talaş kaldırılmadan ham malzemenin katmanlar halinde yığılması ile imal edildiği bir üretim yöntemi olarak tanımlanabilir. Eklemeli imalat hali hazırda birçok sektörde yerini almış olmakla birlikte, karmaşık yapıların imalatında da büyük avantaj sağlamaktadır.

DFMA (imalat ve montaj için tasarım), üretim ile montaj maliyetlerini ve zorluklarını azaltmayı, mümkün olan en minimum değere çekmeyi hedefleyen bir yaklaşımdır. Tasarımcılar DFMA kistaslarını göz önünde bulundurarak tasarımlarını gerçekleştirirler. Montaj zamanının, zorluklarının ve maliyetinin düşürülmesi için temelde 2 kriter vardır. Bunlar parça sayısının azaltılması ve bağlayıcıların elimine edilmesidir [1]. Eklemeli imalat çok parçalı yapıların konsolidasyonuna imkân sağlayarak montaj işçiliklerini azaltır ya da tamamen ortadan kaldırır. Tüm bunlar da maliyeti doğrudan etkileyen faaliyetlerdir.

Geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilecek parçalar detaylı olarak analiz edilmeli, parçanın imalinde hangi ilave takımların, hangi yöntemlerin kullanılacağına dikkat ile karar verilmelidir. Eklemeli imalat yönteminde ise bunun tam aksine tezgâhın nasıl çalıştığı, üretilecek parçanın ölçüleri gibi çok temel bilgiler yeterli olacaktır [2].

Eklemeli imalat yüksek karmaşıklıkta geometrilere sahip parçaları rahatlıkla imal edebilen bir üretim metodudur. CNC tezgâhı ile imal edilecek bir parçaya göre büyük avantajları bulunmaktadır. İmalatı gerçekleştirilecek parçalar bazı geometrik özelliklerinden dolayı üretilemeyebilir. Bu yüzden özel yöntemler, takımlar gibi ihtiyaçlar doğabilir. Eklemeli imalat bu gibi kısıtlamalar bulunmaz, özel yöntemlere gerek kalmaz [2]. Yani eklemeli imalat yöntemi kullanılarak, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen karmaşık geometriye sahip parçalar rahatlıkla üretilebilir.

Tasarımcıların doğru ve fonksiyonel bir tasarım gerçekleştirebilmeleri için belki de en önemli kıstas, imalat yöntemlerine hâkim olmalarıdır. İdeal bir tasarımcının tasarımına şekil verirken, istenilen fonksiyonları yerine getirmesinin yanında, nasıl üretileceğini de göz önünde bulundurması gerekmektedir. Yakın zamana kadar tasarımcılar bu amaç doğrultusunda sadece geleneksel imalat yöntemlerini göz önünde bulundurarak

tasarımlarını gerçekleştirmişlerdir. Ancak gelişen teknoloji ve sunduğu avantajlar ile eklemeli imalat yaygınlaşmaya, geleneksel imalat yöntemlerinin yerini almaya başlamıştır.

Araştırmanın Amacı

Eklemeli imalat her ne kadar çok parçalı yapıların konsolidasyonuna olanak sağlasa da hangi parçaların konsolide edilebileceği ile ilgili çalışmalar literatürde sınırlı sayıda bulunmaktadır. Parça konsolidasyonu bugüne kadar daha çok sezgisel yaklaşımlar ile gerçekleştirilmiştir. Bu da tasarımcının tecrübesi ve tasarımın fonksiyonlarını çok iyi bilmesi ile sağlanabilmiştir.

Bu tez çalışmasındaki amaç; hangi parçaların konsolidasyona aday olduğunu belirleyen matematiksel bir yaklaşım sergilemektir. Bu yaklaşım PDC (ürün sökme karmaşıklığına) dayandırılmakta olup, montajı oluşturan her bir detayın sökme zorluk katsayısı hesaplanır. Montajı oluşturan her bir detay parçanın birbiri ile ilişkisi göz önünde bulundurularak bir bitişiklik matrisi elde edilir. Oluşturulan matris, MATLAB programında MCL (Markov zinciri algoritması) yöntemi ile çözdürülür. İteratif bir çalışma olan bu yaklaşımda matris zamanla kararlı bir yapıya ulaşır. Bir süre sonra matriste elde edilen değerler durağanlaşır ve değişmez. Tam bu noktada montajı oluşturan hangi parçaların konsolide edilebileceği bilgisine ulaşılmış olur.

Matristen elde edilen sonuç daha sonra eklemeli imalat ile üretim yapılacak şekilde değerlendirilmektedir. Eklemeli imalat tezgahları için $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ lük üretim hacmi kabulü ile ilerlenmiştir. Ek olarak bu çalışmada aynı malzemeden oluşan ürünler ve detay parçalar üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Araştırmanın Hedefleri

- Ürünü oluşturan parçalardan hangilerinin konsolide edilebileceğinin somut olarak belirlenmesi,
- Ürünü oluşturan parçaların konsolide edilerek ağırlık kazanımı sağlanması ve ilk duruma göre karşılaştırılması,
- Ürünü oluşturan parçaların konsolide edilerek parça sayısının azaltılması. Bu sayede montaj işçiliklerinin ve bağlayıcı gereksinimlerini azaltılması,

- Ürüne ait parçaların konsolidasyonu ile ilgili tasarım kurallarının ortaya konulması,
- Konsolide edilmiş yapının topoloji optimizasyonlarının gerçekleştirilmesi. Elde edilen yeni yapının yapısal analizlerinin gerçekleştirilerek tasarım gereksinimlerini karşılayacak şekilde uyumlu hale getirilmesi,
- Konsolide yapının, ilk duruma göre üretim maliyet analizlerinin gerçekleştirilerek, değerlendirilmesidir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Eklemeli imalat yöntemi tanımlanarak, avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Eklemeli imalatın tarihçesi hakkında bilgi verilerek, DFAM konusu ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. 3. bölümde ise parça konsolidasyonuna aday parçaları belirlemek için kullanılan yöntemin adımları detaylı olarak açıklamıştır. Bu adımlar tek tek anlatılarak hem teorik bilgiler verilmiş, hem de durum çalışması ile uygulaması gerçekleştirilmiştir. 3. bölüm sonunda ürünü oluşturan parçalardan hangilerinin konsolide adayları olduğu net bir biçimde ortaya konulmuştur. 4. bölümde ise konsolide yapı için topoloji optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yeni yapı için ağırlık açısından kazanımlar elde edilmiştir. 4. bölümde konsolide yapı için yapısal analizler de gerçekleştirilmiş olup, ilk tasarım için gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları ile kıyaslamaları ortaya konulmuştur. 5. bölümde ise elde edilen konsolide yapı için üretim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Geleneksel imalata göre maliyet analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. 6. bölümde tüm çalışma boyunca elde edilen sonuçlar ortaya konularak karşılaştırmalı olarak verilmiştir. 7. bölümde ise elde edilen sonuçlar ortaya konulmuş, gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

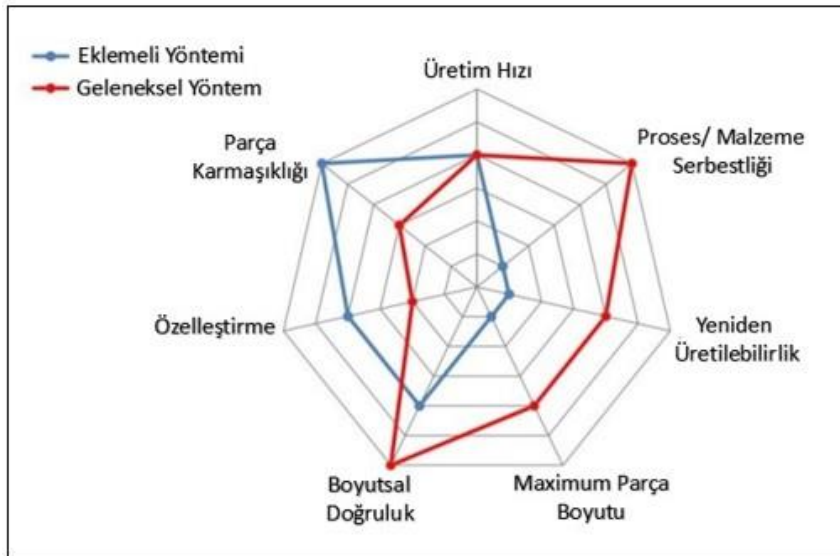
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, istenilen şekillerin malzemelerin katmanlar halinde yığılması ile oluşturulması temeline dayanır. Eklemeli imalat; düşük üretim hacimlerinde, tasarım karmaşıklığı yüksek olan parçalarda ve tasarım değişikliklerinin sık olarak gerektiği durumlarda oldukça avantajlıdır. Kompleks geometriye sahip parçalar için, geleneksel imalat yöntemlerinde kullanılan tasarım kısıtlarını ortadan kaldırır [3].

2.1.1. Eklemeli imalatın avantajları

Eklemeli imalat, parçaların herhangi bir takım güzergâhını ya da kalıpların yeniden kullanılması gibi süreçlerin yönetiminin düşünülmesine gerek kalmadan parça imalatına izin veren bir yöntemdir. Bu durum geleneksel imalat yöntemleri ile kıyaslandığında birçok avantaj sağlamaktadır (Şekil 2.1). Bu da parçalar için limitsiz karmaşık yapıya imkân sağlar. Ayrıca tasarımcılara hayal güçlerini sınırlamalarına gerek kalmayan bir serbestlik olanağı sağlar ve tasarımcılar kullanıcının fonksiyonel gereksinimlerini göz önüne alarak yaratıcı ürünleri tasarlayabilirler. Eklemeli imalat ile üretilen bazı prototipler, başka hiçbir yöntem ile imal edilemezler. Başka bir küre içinde serbestçe hareket eden bir küre buna örnektir [4].



Şekil 2.1. Geleneksel imalata göre eklemeli imalat performansı [4]

Eklemeli imalatın, geleneksel yöntemlere göre avantajlarını gösteren maddeler aşağıda özetlenmiştir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Geleneksel imalata göre avantajları [5]

Uygulama Alanları	Avantajları
Hızlı Prototip Üretme	Prototipi ivmelendirerek satışa çıkarma süresini azaltmak Ürün geliştirmeyi de içeren maliyeti azaltma Yenilik konusunda şirketleri daha efektif ve rekabetçi hale getirmek
Yedek Parça Üretimi	Tamir süresini azaltmak İş gücü maliyetlerini düşürmek Antrepo maliyetlerinden kaçınmak
Küçük Hacimli İmalat	Küçük partiler uygun maliyetli olarak üretilebilir Takım için yapılan yatırımlar elimine edilir
Özelleştirilmiş Tek Parçalar	Düşük maliyetle kullanıcıya göre özelleştirilmiş üretim yapılabilir Özelleştirilmiş, yerine geçen parçaların hızlı üretimi Yeniden tasarım dezavantajlarını elimine etmek
Çok Karmaşık İş Parçaları	Çok karmaşık parçaları çok düşük maliyetlerde üretir
İşleme Tezgâhı İmalatı	Tamir süresini azaltmak İş gücü maliyetlerini düşürmek Düşük maliyetle kullanıcıya göre özelleştirilmiş üretim yapılabilir
Hızlı Üretim	Direkt olarak bitmiş ürünler imal edilir Az sayıdaki parçaların imalatı daha masrafsızdır
Komponent Üretimi	Düşük maliyetle kullanıcıya göre özelleştirilmiş üretim yapılabilir Kalite artar Tedarik zincirini kısaltır Gelişimi de barındıran maliyetleri azaltır Ek parçaların elimine edilmesine yardım eder
Yerinde ve Talep Edildiğinde Yer Değiştirilen Özelleştirilmiş Parçaların Üretimi	Depolama ve nakliye maliyetleri elimine edilir Aksama sürelerini engelleyerek tasarruf sağlar Tamir maliyetlerini oldukça azaltır Tedarik zincirini kısaltır Geniş envanter ihtiyacını azaltır Ürün yaşam döngüsü eğilimine izin verir
Hızlı Tamir	Tamir zamanında önemli ölçüde azalma Tamir edilen komponentlerin güncel tasarımda modifiye edilebilmesi olanağı

2.1.2. Eklemeli imalat teknolojisinden yararlanan endüstriler

Eklemeli imalat etkileri ile günümüzde kabul görmüş bir teknoloji olup, fonksiyonelliği sayesinde çeşitli endüstrilerde kullanılır hale gelmiştir [5]. Eklemeli imalat uygulamaları 2 ana kategori altında toplanmıştır: hızlı prototipleme ve component üretimi. Bu 2 kategorinin endüstride eklemeli imalat aracılığıyla uygulamaları verilmiştir [6].

Çizelge 2.2. Eklemeli imalattan yararlanan endüstriler- a [5]

Endüstri	Uygulamaları	Sağlanan Faydalar
Havacılık	Prototipleme Komponent üretimi Hava aracı ağırlığını azaltma Airbus için motor komponentleri Uçuş sertifikalı donanımlar Uydu komponentlerinin üretimi	Çok karmaşık parçaları çok düşük maliyetlerde üretir Ürün yaşam döngüsü eğilimine izin verir Nesneler uzak yerlerden üretilebilir, nesnelerin sevkiyatında bir kısıtlama yoktur Tedarik süresindeki kısalma, envanter ve maliyetlerdeki azalmayı göstermektedir Astronotlar için talep üzerinde üretim sağlar Direnç yaratan ve ağırlık ekleyen fazla parçaları elimine eder
Otomotive	Prototipleme Komponent üretimi Araç ağırlığını azaltma Yarış arabaları için soğutma sistemi	Fazla parçaların elimine edilmesine yardım eder Piyasaya hız kazandırır Gelişimi de barındıran maliyetleri azaltır Tamir maliyetlerini azaltır Envanteri azaltır Arabaların gelecekteki görünümelerini ve fonksiyonlarını etkin olarak değiştirebilir Kaliteyi artırır
İşleme Tezgâhı Üretimi	Prototipleme Kavrama sistemi ağırlığını azaltma Küçük paketlemeler için kol-sonu	Özelleştirilmiş, yerine geçen parçaların hızlı üretimini sağlar Daha verimli ve hafif tasarımları mümkün kılar
Sağlık Hizmetleri ve Tıp	İşitme cihazları, implantlar ve protezlerin üretimi İnsan organlarının üretimi Vücut parçalarının ve kemiklerin yeniden yapılması Kalça eklemi ve kafatası implantları Robotik eller	Ameliyat süresini ve maliyetini azaltır Operasyon sonrası komplikasyon riskini azaltır Tedarik süresini azaltır

Çizelge 2.3. Eklemeli imalattan yararlanan endüstriler- b [5]

Endüstri	Uygulamaları	Sağlanan Faydalar
Dişçilik ve Diş ile İlgili Teknolojiler	Diş kopyalama Kişiye uygun hale getirilmiş hassas diş Diş ve ortodonti uygulamaları Prototipleme	Yeni malzeme kullanımında büyük potansiyeller içerir Tedarik süresini azaltır Protezler sadece 1 günde, bazen ise birkaç saatte üretilebilir
Mimari ve Konstrüksiyon	Yapıların ölçekli modellerini üretme Yapıların bileşenlerini basma	%60 hafif, ölçekli modeller üretilebilir Tedarik sürelerini %50-80 oranında azaltır Modellerin ön izlemesi sayesinde, yeniden üretimden kaynaklı zaman ve maliyeti azaltır Yapım süresini ve iş gücünü azaltır Özelleştirmeyi artırır Yoksulluk çeken alanlar için üretim maliyetini düşürerek, düşük maliyetli evleri mümkün kılar
Perakende / Giyim	Ayakkabı ve giyim Moda ve tüketici eşyaları Tüketici sınıfı gözlükler Titanyum gözlük çerçeveleri Dayanıklı plastik ve metal bisiklet aksesuarlarının imalatı	Talebe bağlı stil ve uygunluk sağlar Tedarik zinciri maliyetlerini azaltır Ürünleri az miktarlar halinde, gerçek zamanlı olarak oluşturur ve teslim eder. Tamimiyle daha iyi ürünler oluşturulur Ürünler piyasaya daha hızlı sürülür
Yiyecek	Çikolata ve şeker Kraker, pizza, makarna gibi yassı yiyecekler	Sıkıştırılarak üretilebilen yiyeceklerde katman katman üretim özelliği sayesinde 3 boyutlu ürünler elde edilir Maliyetleri düşür

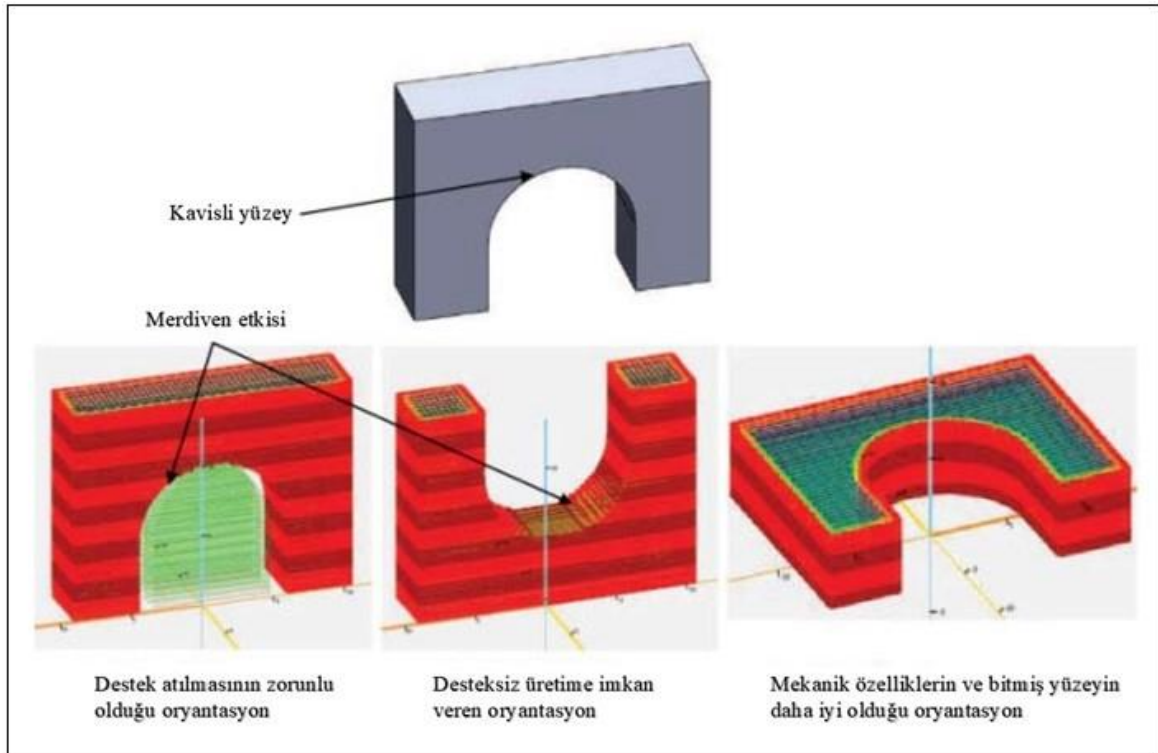
2.1.3. Eklemeli imalat kısıtlamalar

Eklemeli imalat için majör olan kısıtlamalar aşağıda listelenmiştir.

- Belirsiz boşluklar (porozite): Eklemeli imalat ürünlerinin en önemli özelliği gözenekli yapıya sahip olmalarıdır. Bu da direkt olarak ürünün kalitesi ve mekanik performansı ile ilgilidir. Bununla birlikte, bitmiş ürünün boşluklarını ölçmek hala çok zordur [7].
- Çok yönlü beceri gereksinimleri: Eklemeli imalat teknolojisi çok yönlü beceri gerektirmektedir. Bunun sonucu olarak bu durum endüstriyi üretim yöntemlerine entegre etmek için yavaşlatmaktadır [7].
- Bitmiş üründe bozuk yüzey kalitesi: Bitmiş ürünlerin yüzey durumu kötü olmak ile birlikte (kaba merdiven etkisi, Şekil 2.2), işleme sonrası ekstra zaman gerekmektedir [7].
- Güven eksikliği: Proses hala tam olarak anlaşılamamış olup, deneysel parametrelere dayanmaktadır [7].
- Sadece küçük parçalar için olması: Şu ana kadar eklemeli imalat, yoğunlukla küçük parçaların imalatında kullanılmaktadır [7].

Yukarıda bahsedilen kısıtlamalara ek olarak aşağıdaki kısıtlamalar da eklenebilir.

- Kapalı olan yapılar için malzeme içeride sıkışıp kalabilir. Malzemenin tahliyesi ön görülmelidir. Boşaltma deliğini eklenmesi buna bir örnektir [4].
- Malzemelerin ergime sıcaklığı, eritmeyi yapacak kaynağın gücüne göre ayarlanmalıdır [4].
- Malzemelerin kristal plastisiteleri hesaba katılmalıdır. Sıcaklık değişimleri, malzeme fazlarında farklılıkların oluşmasına neden olabilir [4].
- Malzeme kısıtlamaları mevcuttur. Örneğin, ahşap ya da cam uygulanamaz [4].
- Çok yönlü malzeme kullanılarak yapılan üretimlerde, uyumluluk kıstası çalışılmalıdır [4].
- Üretim stratejisi ve parça pozisyonlaması, mekanik cevaplar ve yüzey durumları açısından önemlidir (Şekil 2.2) [4].



Şekil 2.2. Merdiven etkisi [4]

2.2. Eklemeli İmalatın Temelleri

Eklemeli imalatın temelleri neredeyse 150 yıl öncesine dayanır. 2 boyutlu katmanlar kullanılarak topografik harita ve foto-heykel yöntemleri ile yapıların oluşturulması önerisi ile ortaya çıkmıştır [8, 9]. Malzeme biriktirme de 3. yöntem olarak eklenebilir [10].

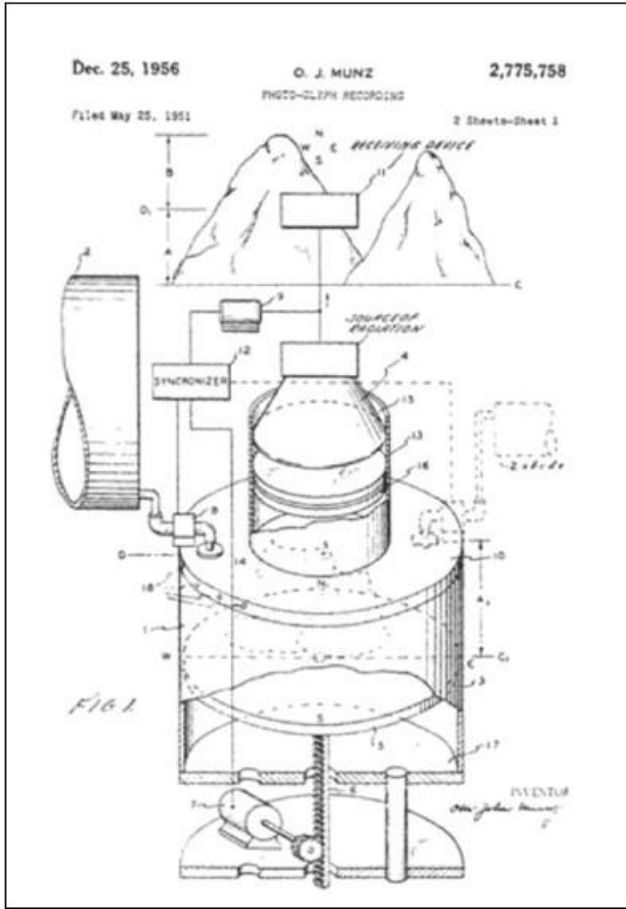
2.2.1. Foto-heykel yöntemi

Bu teknik 19. yy'da 3B nesnelerin kopyasını oluşturmak için kullanılmıştır. En eski teknik olup, 1860'ların başında François Willeme tarafından ortaya konulmuştur [10]. Teknik; yuvarlak bir odada, aralarında eşit mesafe bulunan 24 adet kameranın eş zamanlı olarak görüntü alması ve sonrasında her bir fotoğraf silüetinin 1/24 olarak dilimlenmesi esasına dayanır (Resim 2.1). Her bir fotoğraftan alınan silüetler, zanaatkârlar tarafından heykelin her bir bölümünü ortaya çıkarmak için kullanılır [9, 10].



Resim 2.1. Willeme'nin sanat atölyesinden bir kesit [10]

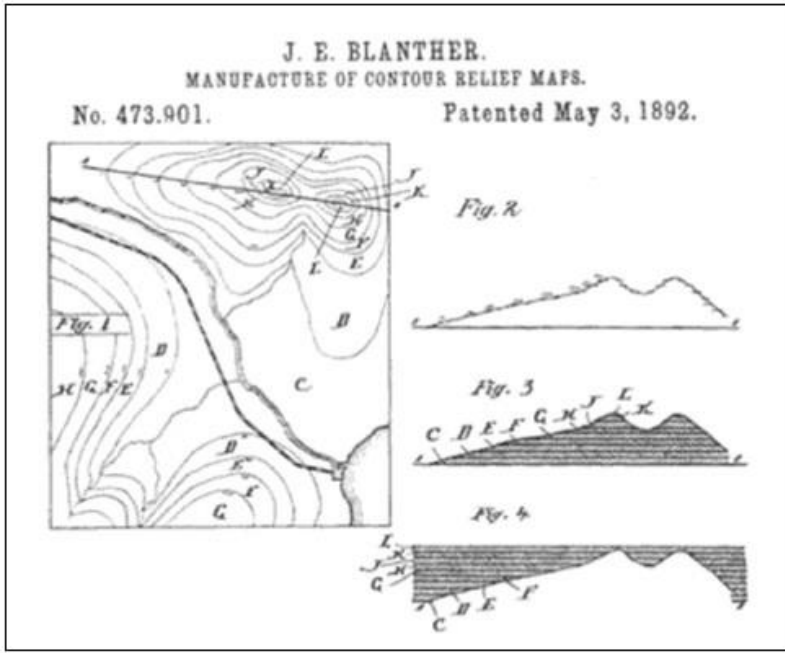
1956'da Munz, katmanlı bir imalat sistemi geliştirmiştir. Taranan objenin her bir kesiti, saydam ıslıl emülsiyona maruz bırakılarak, katmanların üretimi sağlamıştır (Resim 2.2) [9].



Resim 2.2. Munz tarafından amaçlanan katman üretim sistemi [9]

2.2.2. Topografya yöntemi

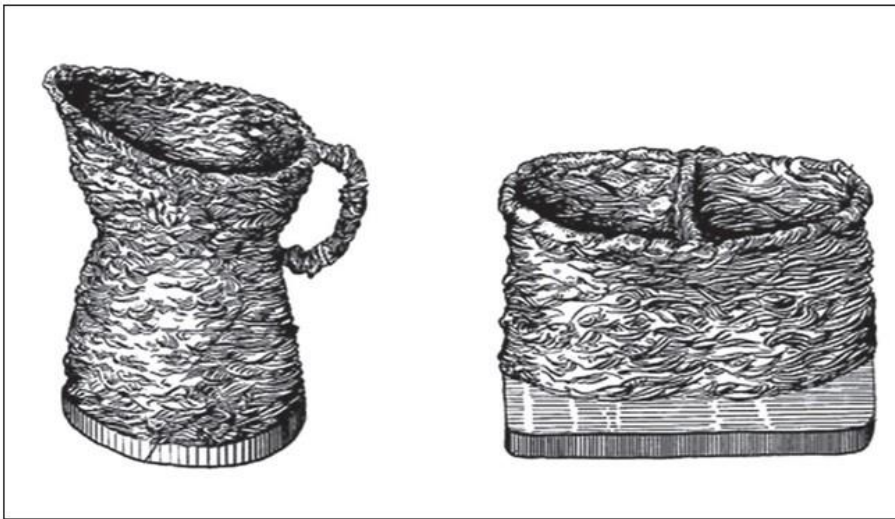
Topografik rölyef haritaları için gerekli kalıpların yapımında kullanılmak üzere 1980'lerin başında Blanter tarafından önerilmiştir. Pozitif ve negatif 3B yüzeylerin, topografik kontör çizgileri boyunca kesilmiş balmumu plakalar halinde monte edilmesi ile oluşur (Resim 2.3) [9, 10].



Resim 2.3. Topografik rölyef haritaları için gerekli kalıpların yapım metodu [9, 10]

2.2.3. Malzeme biriktirme yöntemi

Bu yöntem hareket eden bir kaynak tarafından, sabit oranda malzeme biriktirilmesi esasına dayanır. Literatüre geçen ve bilinen en eski patent örneği Baker tarafından ortaya konulmuştur. 1925'te dekoratif nesneler üretebilecek bir hareketli kaynak kafası ortaya koymuştur [10]. Resim 2.4'te birkaç örnek gösterilmiştir.



Resim 2.4. Kaynak biriktirme yöntemi ile oluşturulan metalik objeler [10]

2.3. Eklemeli İmalat İçin Tasarım (DFAM)

Tasarım; imalatın ilk adımı olup, ürünün son maliyetini etkileyen en önemli karar noktasıdır. 1980'lerden beri, ürünlerin kolay imalatı ve montajı için tasarımcılara yol gösterecek analiz teknikleri geliştirilmektedir. Bu tekniklerin varlığı ise imalat endüstrisinde ürün maliyetlerini düşürme, kaliteyi arttırma gibi birçok gelişmeye katkıda bulunmuştur [11].

Üretim, montaj ve performans için yapılan tasarım anlayışları birbirinden bağımsız olmaktan çok birbirleri ile ilişki içindedirler. Bu 3 görüşü bir ilişki içinde düşünerek çalışmak, eklemeli imalat tasarımının tüm avantajlarını daha iyi kavrayarak çalışmayı saplamaktadır. DFX (mükemmellik için tasarım) hedefleri aşağıda özetlenmiştir [12];

- Kolay montaj,
- Kolay tamir ve bakım,
- Tekrar kullanılabilirlik ve geri dönüşüm,
- Üretim ve montaj maliyetlerini azaltma,
- Sökme zorluğunu azaltma.

Ayrıca geleneksel DFX için kullanılan tasarım kuralları gruplanarak aşağıda verilmiştir [12].

- Tasarımı basitleştirin: yapıları fonksiyonellik gereksinimlerini sağlayarak basitleştirin;
- Parça sayısını minimize edin,
- Parçaları entegre edin,
- Çalışma parçalarını modüler alt montajlara ayırın,
- Montajdaki malzeme çeşitlerini minimize edin,
- Komponentleri standartlaştırın,
- Çok fonksiyonlu parçalar oluşturun,
- Üretimi kolay olan tasarımlar yapın,
- Montajı, pozisyonlaması, taşınması, birleştirmesi, ulaşılabilirliği kolay olan tasarımlar yapın,
- İnce plakalar kullanmaktan kaçının,

- İkinci operasyonlardan kaçının,
- Ayarlamaları elimine edin,
- Ferromanyetik malzemeler kullanın.

DFAM, temelinde DFM (üretim için tasarım) anlayışını barındıran bir terimdir. DFAM, eklemeli imalat ile üretilcek komponentler için özelleştirilmiş bir kategoridir. Diğer imalat yöntemlerine göre çok daha az kısıtları olan, optimizasyona açık ve çıktısı olan komponentler çok daha değerlidir. DFAM konusunda Gao, Yang and Zhao, Kumke, Laverne, Rosen, Thompson tarafından birçok farklı inceleme yapılmıştır [13].

Başka bir çalışmada ise eklemeli imalat fırsatlarının farkına varılarak bazı majör tasarım kuralları belirlenmiştir ve bu kurallar aşağıda listelenmiştir [12, 14].

- Eklemeli imalat yöntemlerinin avantajlarını kullanın.
- Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen tasarımlar oluşturun.
- Geleneksel mekanik tasarım prensiplerini düşünmeyin. Önceden üretilmiş malzeme boyutlarını, koordinat sistemlerini ve üretim için bazı gerekli simetri eksenlerini düşünmenize gerek yoktur.
- Montajlardaki parça sayısını fonksiyonları entegre ederek azaltın. Örneğin; bağlantılar ve esnek alanlar tek adımda üretilir. Böylece montaj maliyetleri oldukça azalır.

Bununla birlikte bazı araştırmacılar, ürün fonksiyonelliğini ve eklemeli imalat için üretim kısıtlarını hesaba katarak genel tasarım metodlarını formüle etmişlerdir [15]. Son çalışmalarında ise, 3 adımdan oluşan aşağıdaki DFAM yöntemini amaçlamışlardır [16, 17].

Bunlardan ilki parça oryantasyonudur ve bu adımda parçanın tasarım amacı olan fonksiyonel yüzeyler belirlenir ve seçilen eklemeli imalat yöntemi ile bu yüzeylerin doğruluğu ve yüzey gereksinimlerinin sağlanıp sağlanamayacağı uyumuna bakılır. Bunu yaparken de parçanın tüm üretimindeki zaman ve maliyet dikkate alınır.

İkinci adım fonksiyonel optimizasyondur ve bu adımda malzeme ile üretim yöntemi dikkate alınarak optimum parça geometrisi belirlenir. Yazarlar bu aşamada topolojik optimizasyon önermektedirler.

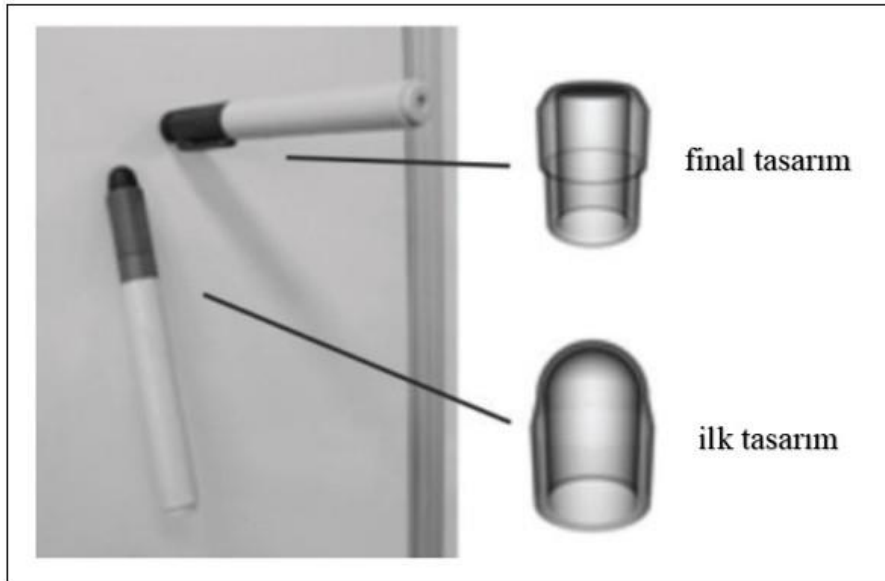
Diğer bir adım üretim yollarının optimizasyonudur ve bu adımda parçanın fonksiyonelliğini ve mekanik özelliklerini sağlayacak şekilde, üretim proses planı ve spesifik takım ihtiyaçları maliyet ve zamanı da amaçlayarak optimize edilir.

Eklemeli imalat için belirlenen komponentler, aşağıda açıklanan 2 farklı tasarım stratejisini takip ederek bu yöntemin avantajlarından yararlanabilirler [18].

Üretim Etkin Tasarım Stratejisi

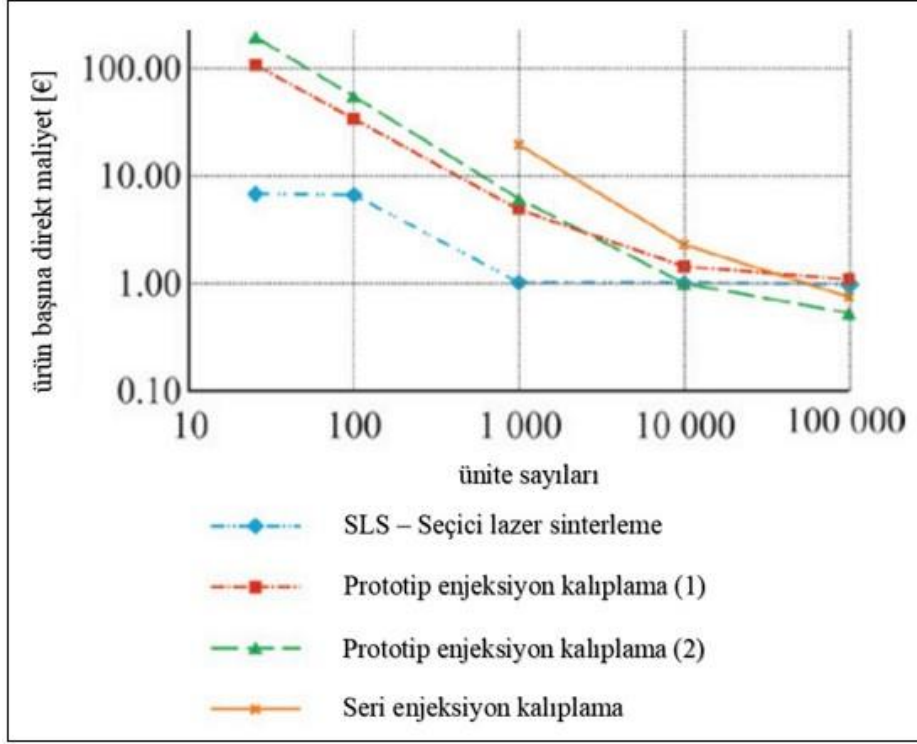
Bu strateji, eklemeli imalatı bir üretim teknolojisi olarak kabul eder. Tasarımcı geleneksel tasarımlarını sürdürür ve diğer üretim teknolojilerinin tasarım kurallarına uyar. Üretim etkin tasarım stratejisi özellikle müşteri eksenli bir ürünün seri imalatında kullanılabilir. Diş implantları bu konuda önde gelen örneklerindendir [18].

Memox tahta kalemi kapakları da bu strateji için örnektir. Gereksinim tahta kalemlerinin beyaz tahta üzerinde durmasıdır. Bu amaçla tahta kalemi kapağına mıknatıs yerleştirilmiştir. Temel gereksinim tahta kaleminin beyaz tahta üzerinde tutunması ve bu durumun tüm ticari tahtalarda uygulanabilmesidir. Tanımlana gereksinim ve kullanıcı testlerine göre Resim 2.5'te görülen ilk ve son tasarımlar şeklini [18].



Resim 2.5. Tahta kalemi kapağı ilk tasarım (aşağıda), müşteri geri dönüşüne göre son tasarım (yukarıda) [18]

Tasarın son şeklini aldıktan sonraki adım doğru üretim teknolojisi kullanılarak ürünün hızlı bir şekilde imal edilmesidir. Ürünün piyasaya başarılı bir giriş yapması için fiyat çok önemlidir. Farklı şirketlerden 3 aydan az zamanda pilot ürünler imal etmeleri istenmiştir. Teklif verenler Şekil 2.3'te belirtilmiştir.



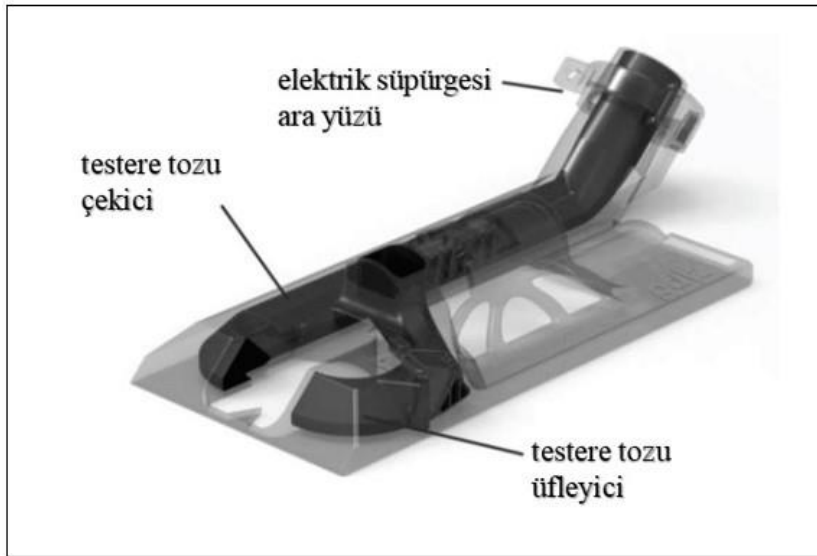
Şekil 2.3. Farklı sipariş miktarları ve üretim yöntemlerine göre ürün başına maliyet [18]

Eklemeli imalat tedarikçisi ürünleri SLS (seçici lazer sinterleme) yöntemi ile üretmeyi teklif etmiştir. Prototip takım şirketleri (1) ve (2) ise, 3 haftalık teslim zamanı ile prototip enjeksiyon kalıplama önermişlerdir. 4. şirket ise seri imalatlar yapan bir kalıp üreticisidir ve ürünler imal etmek için çelik malzemeden bir enjeksiyon kalıp takımı önermiştir. Enjeksiyon kalıbı yüksek karmaşıklıkta olduğu için ön görülen teslim tarihi 3 ay olarak belirlenmiştir. Şekil 2.3'te, ilk 1000 parçada SLS yönteminin, enjeksiyon kalıplama yöntemi maliyetlerinden önemli ölçüde az olduğu görülmektedir. Mevcut durumda 10 000'den fazla parçada bile eklemeli imalatın, enjeksiyon kalıpla üretimden daha avantajlı olduğu görülmektedir. İşte bu noktada üretim etken ile, fonksiyon etken tasarımın ayrımı açıklığa kavuşmaktadır [18].

Fonksiyon Etkin Tasarım Stratejisi

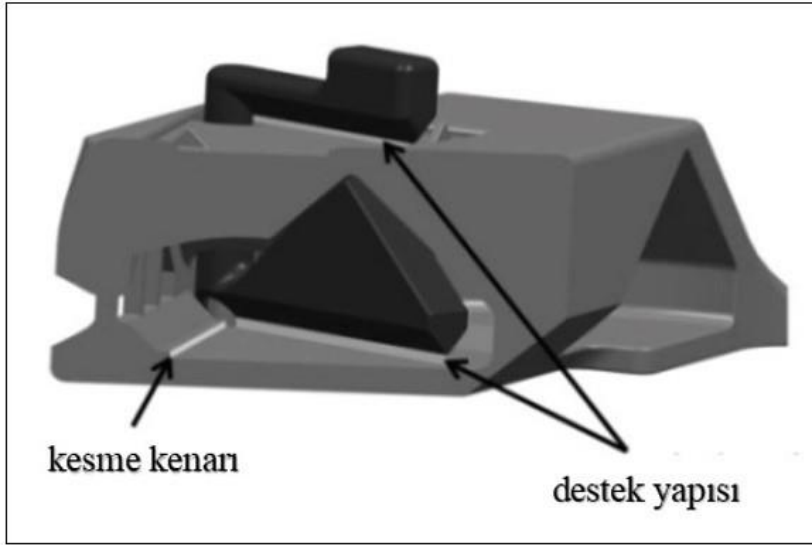
Bu strateji, ürünün fonksiyonlarını geliştirmek için eklemeli imalat karakteristiklerinden yararlanır. Eklemeli imalatın tasarım özgürlüklerindeki tüm potansiyelleri kullanarak, geleneksel imalata aktarılan kurallar majör düzeltmelere gerek kalmadan ortadan kalkar [18].

Fonksiyon etken tasarım stratejisi için bir örnek de ticari makinalı testere özelinde verilmiştir. Testere talaşı üfleyici kesim alanını temiz tutsa da, bu talaşların taşınması için eklenen toz çekici iş parçasını oldukça kirletmektedir. Bu yüzden ürünün fonksiyonunu geliştirecek ve üfleyici ile çekicinin yeniden pozisyonlanması sağlayacak bir tasarım çalışması yapılmıştır [18].



Şekil 2.4. İç kanalların fonksiyon yönlü tasarımı [18]

Üretim yöntemi olarak SLM (seçici lazer ergitme) seçilmiştir ve üretim için gerekli destek yapılarını azaltıp, bu yapıların üretim sonrası kaldırılmalarından doğacak maliyetleri azaltmak için üçgen şeklinde kanal kesitleri tercih edilmiştir. Destek yapılarının kaldırmak için, kesme kenarı eklenmiştir (Şekil 2.5) [18].



Şekil 2.5. Vana girişinin detayı [18]

2.4. Eklemeli İmalatta Tasarım Metotları

Eklemeli imalat metodunda tasarım ve süreçlerin güçlü bir bağı bulunmaktadır. Bu yüzden parça tasarımlarında eklemeli imalatın tüm faydalarından yararlanabilmek için, süreçlerin sınırlarını ve esnekliklerini iyi anlamak önemlidir. İleriki bölümlerde eklemeli imalat parçalarının tasarımları ve geliştirilmeleri için kullanılan metotlardan bahsedilmiştir [19].

2.4.1. Topolojik Optimizasyon

Eklemeli imalat tasarımlarının ana odak noktası, geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilemeyen geometrilerin ve özelliklerin çok daha kolay ve ekonomik olarak oluşturulmasını sağlayabilmesidir [19]. Bunu yansıtan bir örnek Resim 2.6’da verilmiştir.



Resim 2.6. Eklemeli imalat için topolojik optimizasyonu yapılmış mafsal parçası. (A) ilk tasarım, (B) topolojik optimizasyona göre yeni tasarım, (C) eklemeli imalat ile üretilmiş mafsal [19]

Topolojik optimizasyon (TO), verilen bir problem için tasarım bölgesi içinde optimum malzeme dağılımını hesaplayan bir yapı optimizasyon yöntemidir. Özelleşmiş yazılımlar ile birlikte birçok TO algoritması bulunmaktadır. Pratikte en yaygın olarak, SIMP (katı izotropik malzeme cezalandırma) algoritması kullanılmaktadır [20]. SIMP algoritması, ilgili kitapta [21] ve makalelerde [22, 23] detaylı bir şekilde tanımlanmıştır.

SIMP, FE (sonlu elemanlar) metodunu baz alan bir algoritmadır. Burada optimizasyon problemini çözmek için, Young modülü E_e belirleyen, özel sözde-yoğunluk parametresi x_e kullanılmıştır [20].

$$E_e(x_e) = E_{min} + x_e^p(E_0 + E_{min}), \quad x_e \in [0,1] \quad (2.1)$$

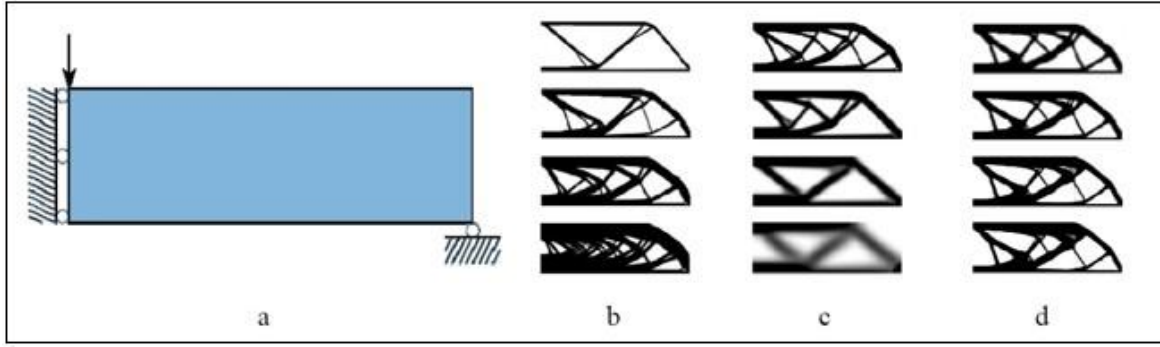
E_0 malzemenin Young modülü, E_{min} boşluk bölgesindeki malzemenin Young modülü, p ise cezalandırma faktörüdür.

SIMP TO algoritmasının matematiksel formülü aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} \min_{x}; \quad c(x) &= \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_1^N E_e(x_e) u_e^T k_0 u_e \\ \text{ilişkilidir:} \quad &\left\{ \begin{array}{l} \frac{V(x)}{V_0} = f \\ \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ 0 \leq x_e \leq 1 \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

c kabul, $\mathbf{U}$ ve $\mathbf{F}$ global yer değiştirme ve kuvvet faktörleri, $\mathbf{K}$ global katılık matrisi, u_e FE yer değiştirme faktörü, k_0 FE katılık matrisi, N FE adedi, $V(x)$ ve V_0 son ve ilk hacim, f saptanmış hacim kesridir.

Farklı TO parametrelerine göre elde edilen sonuçlar Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. 2B Tasarım bölgesinin topolojik optimizasyonu: a – sınır koşullar, b – farklı hacim kesirlerindeki sonuçlar, c – farklı filtre yarıçapı ile sonuçlar, d – düğüm sayısına göre sonuçlar [20]

Metal eklemeli imalat parça tasarımında TO temel hedefi, parçanın önceden tanımlanan işlevsel gereksinimlerini sağlayarak herhangi bir akma ya da kopmaya uğramadan ağırlık ve hacminin azaltılmasıdır. Topolojik optimizasyonu, eklemeli imalatla bir tasarım aleti olarak kullanırken, karşılaşılan bazı zorluklar mevcuttur [19].

- Topolojik optimizasyon yazılımı; FE ile bağlantılı olarak kullanılıyor ise çevresel etmenlerin ve sınır koşullarının bu ortamda yeterli olarak tanımlanması önemlidir. FE ortamı ilgili gereksinimleri temsil etmek için yeterli olmaz ise sonuçlar kullanışsız olabilir.
- Topolojik optimizasyon sonucu oluşturulan geometriler ve özellikler mevcut eklemeli imalat yöntemleri ile kolay üretilmeyebilir. İnce duvarlar, çıkıntılar, karmaşık destek yapıları ikincil operasyonlar olarak kolayca kaldırılamayabilirler.
- Topolojik optimizasyon sonucu oluşturulan geometriler ve özellikler, gerilme yığılma bölgeleri oluşturmalarından ötürü yapısal sınırlamalara sahip olabilir ve periyodik yük kopmalarına daha duyarlı olabilirler.
- Topolojik optimizasyon sonucu oluşturulan geometriler ve özellikler malzeme anormalliklerine ve bozukluklarına daha yatkın olabilirler.

2.4.2. Parça Entegrasyonu ve Tamiri

Parça entegrasyonu kavramı yapı imalatında yeni olmasa da eklemeli imalat içeriği olarak komponentleri birleştirme ya da alt montajları bir araya getirmede eklemeli imalat malzemesini kullanmak yeni bir terimdir. Parça entegrasyonunun faydalı olması uygulamaya bağlı olsa da ayrı olan parçaları eklemeli imalat yöntemi ile entegre etmek

montaj işçiliklerini azaltır. Resim 2.7’de verilen örnekte bir uçak motoru muhafazasına eklemeli imalat ile kabartma eklenmiştir [19].

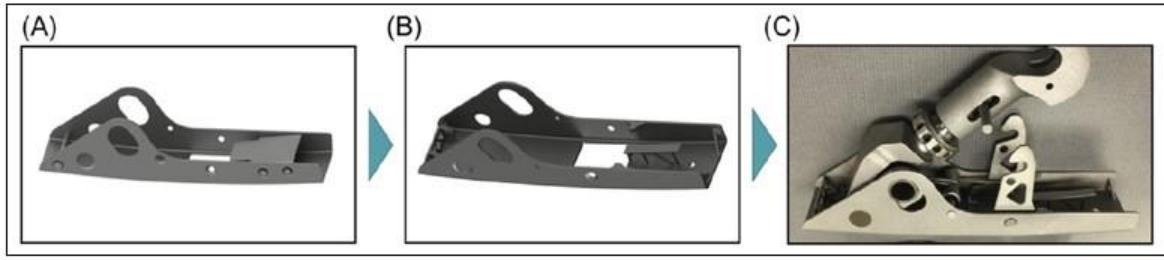


Resim 2.7. Eklemeli imalat ile kabartma eklenen hibrit muhafaza [19]

2.4.3. Parça Konsolidasyonu

Eklemeli imalat ürünlerin karmaşıklığını ortadan kaldıran bir yöntemdir. Bu yüzden bazı komponentlerin ayrı olarak üretilip, sonradan montajlanma gereksinimi ortadan kalkmıştır. Bunun yerine tek bir eklemeli imalat yönteminde üretilebilecek şekilde birleştirilebilirler. İşte bu çoklu parçaları birleştirme işlemine “parça konsolidasyonu” adı verilmektedir [24, 25]. Parça konsolidasyonunun birkaç farklı açıdan yararları bulunmaktadır. Öncelikle yorucu montaj operasyonlarından kaçınılarak daha verimli ürünler elde etmeyi sağlar. Montaj takımlarına örneğin fiktürler ve bağlayıcılara ihtiyaç kalmaz ve ürün maliyeti düşer. Parça sayısının azalması, ürünün idamesindeki karmaşıklığı da azaltır [25].

Parça konsolidasyonu metodu, parçanın fonksiyonel gereksinimlerini sağlayacak şekilde, çok parçalı bir komponentin, parça sayısını minimize ederek yeniden tasarlanmasını içerir [19]. Resim 2.8’de bir uçak motor kapağı mandalı örneği verilmiştir. İlgili montaj konsolide edilerek, tek bir parça olarak yeniden tasarlanmıştır. Metottaki zorluk genel olarak konsolide yönteminin değerlendirilmesi değil, hangi parçaların konsolide edileceğini seçmektir.

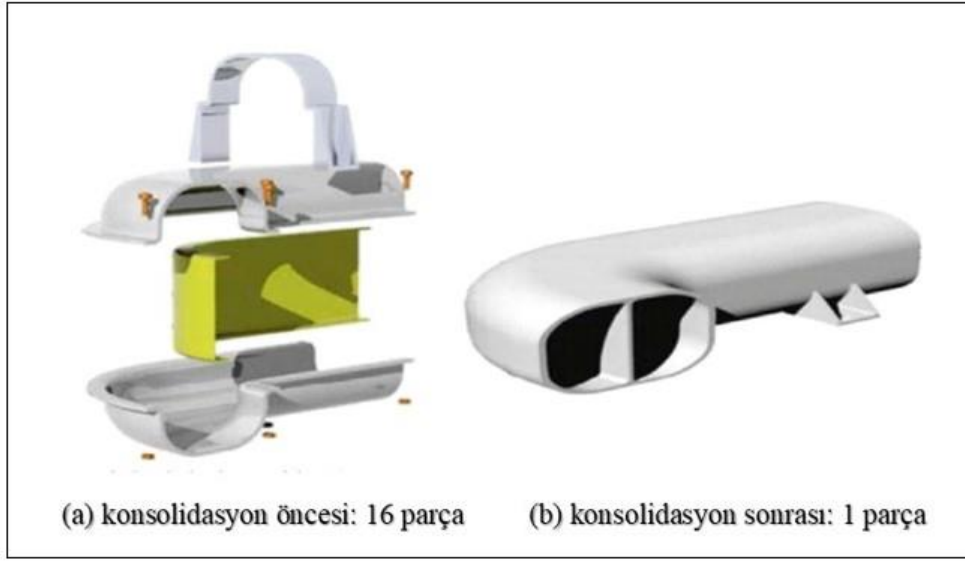


Resim 2.8. Jet motoru kapak mandalının konsolidasyonu (A) 5 parçadan oluşan ilk tasarım, (B) tek bir parça olarak konsolide edilmiş yeni tasarım, (C) eklemeli imalat ile üretilmiş jet motoru kapak mandalı [19]

Parça konsolidasyonu ile ilgili bir kaç yayım bulunmaktadır. Becker ve arkadaşları [14], eklemeli imalata parça konsolidasyonu prensiplerini tartışarak, yararlarına vurgu yapmışlardır. Atzeni ve arkadaşları [26], çok parçalı bir enjeksiyon kalıplama montajını konsolide ederek, ürün maliyetini karşılaştırmışlardır. Konsolide edilen parçanın, orta hacimli üretim için daha verimli olduğunu belirtmişlerdir. Ponche ve arkadaşları [15], fonksiyonel yüzey ve hacim temelli parça konsolidasyonu metodu amaçlamışlardır. Buna benzer bir fikir Yang ve arkadaşları [24] tarafından uygulanmıştır. Çalışmalarını fonksiyonel yüzey ve hacim temelli olarak, fonksiyon entegrasyonu üzerinde yapmışlardır. Ek olarak hafif tasarımlar için yapısal bir optimizasyon adımı çalışılmıştır.

Becker ve arkadaşları [14] ile Yang ve arkadaşları [24], konsolide edilen parçanın yapısal performansını geliştirmek için topolojik optimizasyon üzerinde çalışmışlardır. Konsolide edilen parçanı ile ilk tasarımdaki çok parçalı montaj kıyaslanarak, yapısal performansın güçlendiğini öne sürmüşlerdir [14, 24, 26]. Liu ise eklemeli imalatla performansın parçayı yığma yönüne bağlı olduğunu iddia ederek bu konuda çalışmalar yapmıştır [25].

Parça konsolidasyonu ile ilgili ilk olan ve en iyi bilinen çalışma uçak hava alığıdır. Şekil 2.7’de 16 parçadan oluşan çok parçalı hava alığı montajı, konsolidasyon sonrası 1 parçaya düşürülmüştür [2].

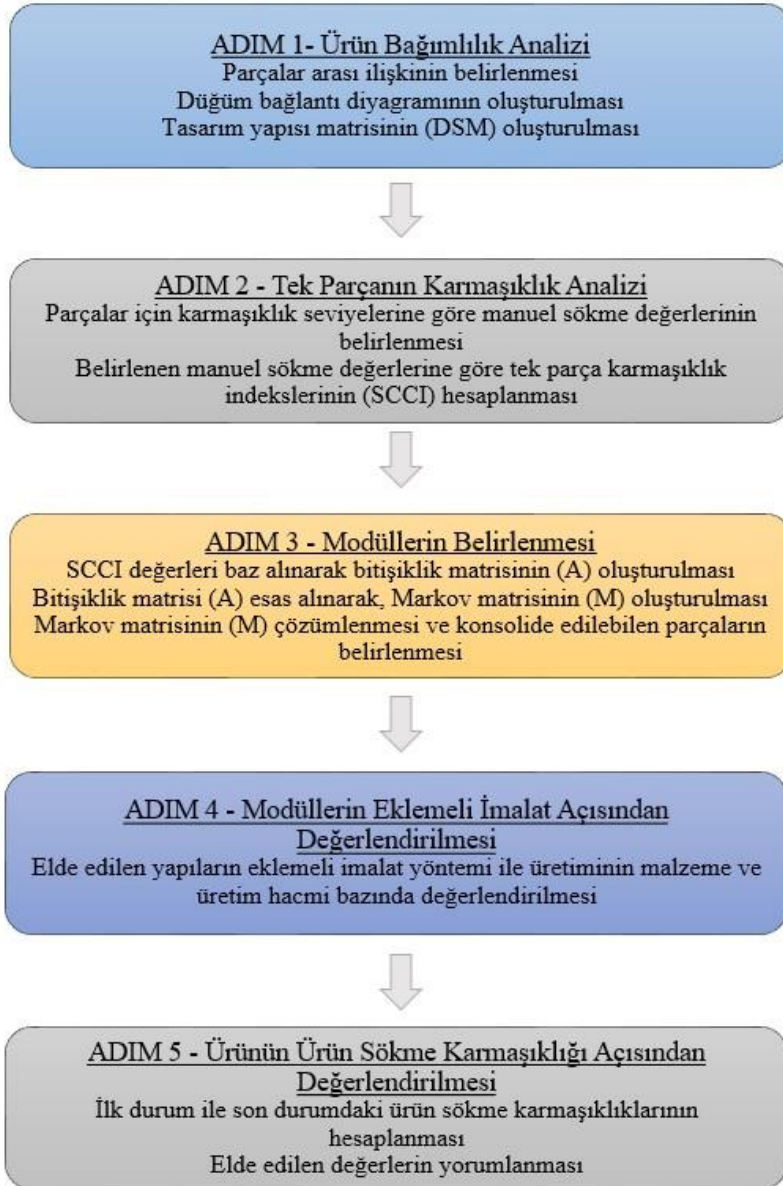


Şekil 2.7. Hava alığı örneği [2]

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda DFAM konusunda amaçlanmış birçok çalışma ve belirlenmiş tasarım kuralları bulunmaktadır. Ancak parça konsolidasyonu kavramı için çok parçalı bir montajda, konsolide işlemine hangi parçaların aday seçilebileceği ile ilgili sınırlı olarak araştırma mevcuttur. Parçaların seçiminde tasarımcının deneyimi ve ürünün fonksiyonel gereksinimlerini çok iyi anlaması büyük rol oynamaktadır. Bu konudaki boşluk tasarım aşamasında net bir tasarım çerçevesinin belirlenmemiş olmasıdır. Bu tez tam da bu amaç doğrultusunda, parça konsolidasyonu için yeni tasarım kuralları belirlemek üzerine yoğunlaşmış ve çalışmalar bu doğrultuda şekillenmiştir.

3. PARÇA KONSOLİDASYONUNA ADAY OLACAK PARÇALARIN BELİRLENMESİ

Bu bölümde parça konsolidasyonuna aday olacak parçaları belirlemek amacıyla kullanılacak yöntemin adımları tanımlanmıştır (Şekil 3.1) ve her bir adım detaylı olarak açıklanmıştır. Bu adımlar temel olarak PDC yöntemine dayandırılmaktadır. Kullanılan bu yöntemde ürünü oluşturan parçaların ilişkileri incelenmiş ve parça bazında sökme zorluğu hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Yöntemde, ürünü oluşturan parçaların arasındaki ilişki baz alınarak, karmaşıklığı yüksek olan parçaların konsolidasyonu amaçlanmaktadır [27].

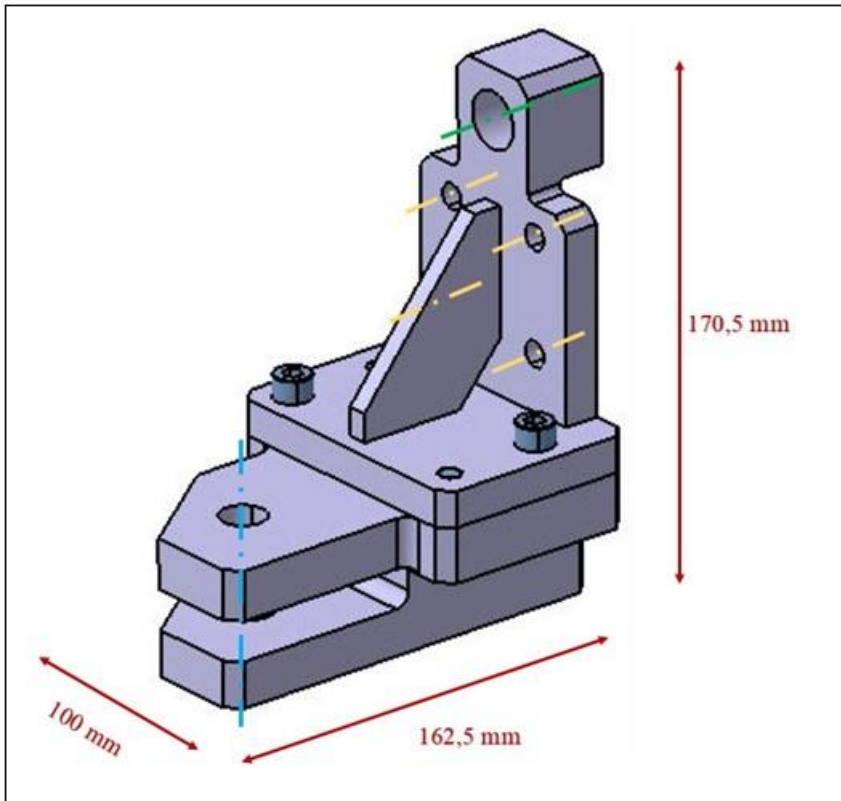


Şekil 3.1. Parça konsolidasyonuna aday olacak parçaların belirlenmesi için kullanılan yöntemin adımları

Şekil 3.1’de amaçlanan metot örnek bir durum çalışması ile desteklenmiştir. Bu bölümün devamında Şekil 3.1’de verilen adımların gerçekleştirilmesinde kullanılan metotlardan bahsedilmiş olup, bu metotların durum çalışması üzerine nasıl uygulandığı açıklanmıştır.

Durum Çalışmasının Tanımlanması

Hava araçlarında hareketli yüzeyler arasında dönme eksenini oluşturmaya yarayan yapı menteşe bağlantı parçası olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.2’de bu bağlantı parçasını, montaj takımlarında doğru pozisyonlamak için kullanılan bir alt-montaj yapısı görülmektedir. Yapının her bir parçası S235JR malzeme olmakla birlikte, toplam ağırlığı 4,64 kg’dır. Yapının boyutları Şekil 3.2’de verilmiştir. İlgili alt-montaj 5 farklı detay parçadan oluşmaktadır. Mavi ile gösterilen deliklerin eksenini, menteşe bağlantı parçasını merkezlemeye yararken, sarı ile gösterilen delikler alt-montaj yapısını ana karkasa bağlamak kullanılmıştır. Yapı ana karkas üzerinde hareket ettiği için son konumunu sabitlemeye yarayan delik ise yeşil ile gösterilmiştir.

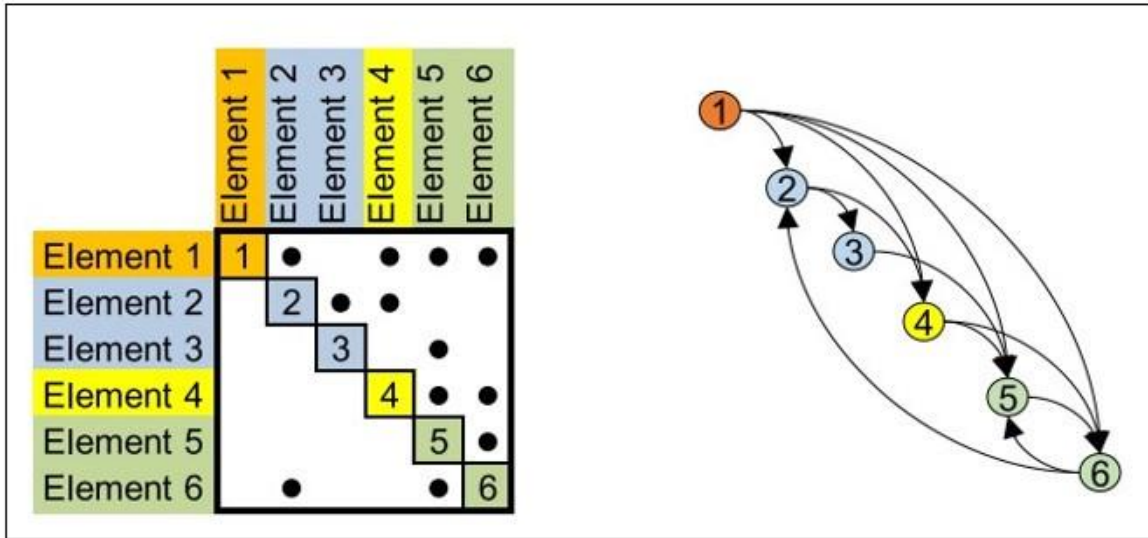


Şekil 3.2. Durum çalışması - menteşe bağlantı parçasının yapısı ve genel ölçüleri

3.1. Adım 1 – Ürün Bağımlılık Analizi

İlk adım, ürünü oluşturan parçalar arasındaki bağımlılığı analiz etmekle başlamaktadır. Parçalar arasındaki ilişkiyi gösteren bir akış oluşturulur. Bu akış komponentin kurgusuna göre enerji, sinyal akışı, ya da parçaların birbiri arasındaki fiziksel ilişkiyi gösteren bir fonksiyonel diyagramıdır. Bu yöntemi uygulamak için komponente DSM (tasarım yapısı matrisi) uygulanır [27].

DSM, aynı zamanda bağımlılık yapısı matrisi olarak da adlandırılır. Karmaşık sistem modellerinin gösterimi ve analizi için kullanılmaktadır. DSM gösterimi temsil ettiği model için sağladığı basitlik ve kısıklıkla avantaj sunmaktadır. Şekil 3.3'te kare bir matrizen oluşan DSM örneği bulunmaktadır. Köşegenler sistem elementlerini temsil ederken, köşegen dışı hücreler elementlerin arasındaki ilişkiyi (bağımlılık, ara yüz, etkileşim vb.) temsil etmektedir. Düğüm bağlantı diyagramı da hangi elementlerin birbiri ile ilişkisi olduğunu göstermektedir [28].



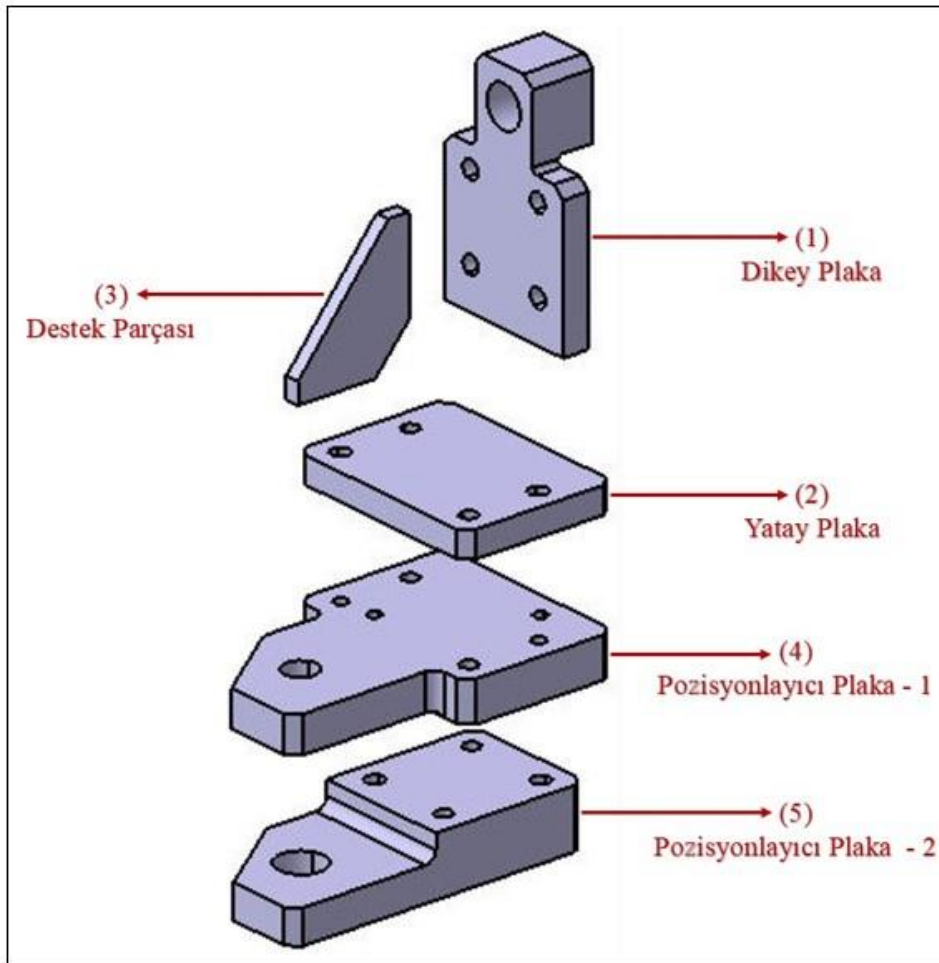
Şekil 3.3. DSM örneği ve eşleniği olan düğüm bağlantı diyagramı [28]

DSM'de birbiri ile ilişkisi bulunan parçaların değeri '1' iken, ilişkisi bulunmayan parçalar '0' değerini alır (Şekil 3.4).

	A	B	C	D	E
A		1	1		
B	1		1		
C	1	1		1	
D			1		1
E				1	

Şekil 3.4. DSM örneği [27]

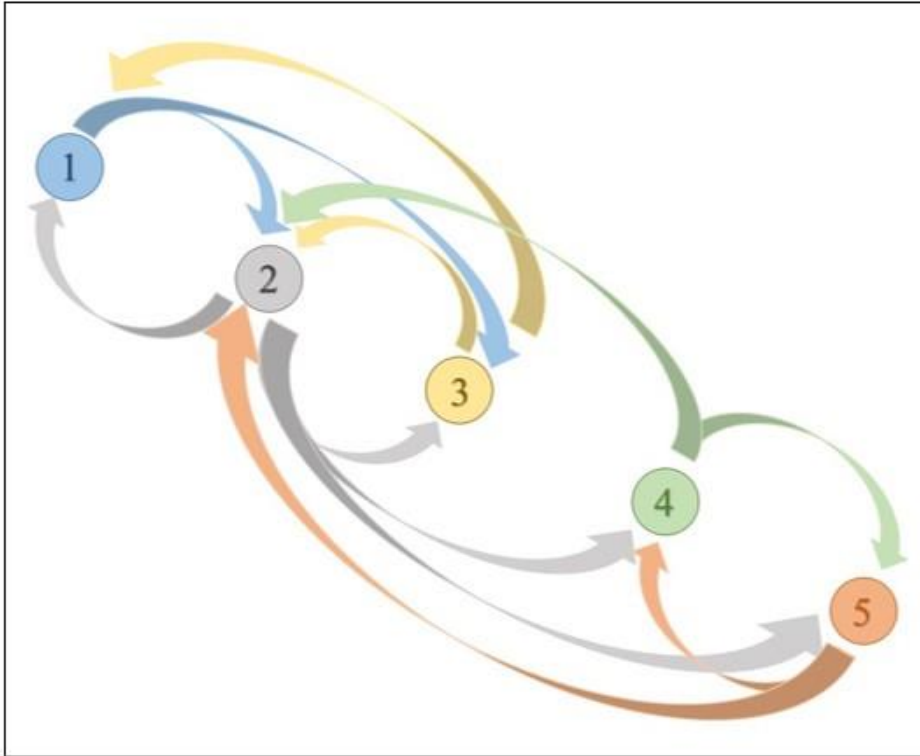
Aşağıda ele alınan durum çalışması için alt montajı oluşturan her bir parça numaralandırılarak, isimlendirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Durum çalışması için alt montajı oluşturan parçalar ve tanımlamaları

- (1) Dikey plaka, alt montajı ana karkasa bağlamaya yarayan dikey yönlü konumlandırılmış bağlantı plakasıdır.
- (2) Yatay plaka, alt montajı ana karkasa bağlamaya yarayan yatay yönlü konumlandırılmış bağlantı plakasıdır.
- (3) Destek parçası, alt montajı ana karkasa bağlamaya yarayan yatay ve dikey yönlü plakalar arası destek için kullanılmış parçadır.
- (4) Pozisyonlayıcı plaka – 1, menteşe bağlantı parçasını konumlandırmak için kullanılan 1. plakadır.
- (5) Pozisyonlayıcı plaka – 2, menteşe bağlantı parçasını konumlandırmak için kullanılan 2. plakadır.

Şekil 3.6’da, durum çalışmasında baz alınan alt montajın her bir parçası için düğüm bağlantı diyagramı verilmiştir. Parçaların birbirleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan diyagramın doğru oluşturulabilmesi için alt montajın tasarım kurgusunu ve fonksiyonunu bilmek önemlidir. Alt montajdaki her bir parçanın işlevi ve amacı da diyagramı oluştururken bilinmesi gereken hususlardandır. İlişki diyagramını oluştururken hem parçalar arasında fiziksel ara ara yüz hem de işlevsellik göz önünde bulundurulmaktadır.



Şekil 3.6. Durum çalışması için parçalar arası ilişkileri gösteren düğüm bağlantı diyagramı

Bir sonraki adım olarak da Şekil 3.6’da oluşturulan düğüm bağlantı diyagramı esas alınarak, DSM oluşturulmuştur (Şekil 3.7).

	(1) Dikey Plaka	(2) Yatay Plaka	(3) Destek Parçası	(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1	(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2
(1) Dikey Plaka		1	1		
(2) Yatay Plaka	1		1	1	1
(3) Destek Parçası	1	1			
(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1		1			1
(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2		1		1	

Şekil 3.7. Durum çalışması için düğüm bağlantı diyagramı esas alınarak oluşturulan DSM

3.2. Adım 2 – Tek Parçanın Karmaşıklık Analizi

İkinci adımda, ürünü oluşturan parçalardan hangilerinin üründen ayrılmasının zor olduğunu belirleyen PDC metodu kullanılmaktadır. Bu metot da SCCI’ya (tek parça karmaşıklık indeksi) dayandırılarak oluşturulmaktadır.

3.2.1. Ürün sökme karmaşıklığı (PDC)

Ürün geri kazanımı, zamanını doldurmuş ürünlerin kendi değerlerinin geri getirilmesi yöntemi olarak tanımlanmıştır [29]. Artık kullanılmayan parçaların ve ürünlerin tekrar kullanıma alınması ile şirketler atıklarını azaltabilir, ürün yaşam döngülerini uzatabilir ve geri kazanım faydalarını geliştirebilirler. Bu nedenle firmalar bu konu üzerinde yoğunlaşmışlardır [30].

Tasarım aşamasında ürün geri kazanımını düşünerek, ürüne bu potansiyelleri vermek bir gerekliliktir. Ürün geri kazanımını arttırmak, ürünü sökme işlemi ile yakından ilgilidir.

Sökme kavramı ise malzemeleri, komponentleri ve alt montajları üründen ayırma işlemine verilen addır [30]. Sökme işlemi, maliyetleri ve zamanı minimize etme ve ayrılan parçaların kalitelerine zarar vermekten kaçınma ile yakından ilgilidir [31]. Sökme işleminde ürün karmaşıklığı tasarıma, parça ve ara yüz sayısına göre artabilir. Ürün sökme karmaşıklığı, ürünün geri kazanım açısından zorluğunu anlayarak ölçülür [32].

Ürünün geri kazanımı için tasarım, ürün karmaşıklığını düşünmeden ürün sökme için tasarım temelli olarak araştırılmıştır. Ishii ve arkadaşları [33], zamanını dolduran ürün için modül bazlı tasarım üzerinde yoğunlaşarak, ürünün sökme zamanı ve maliyetini hesaplayarak, modüllerin uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Yang ve arkadaşları [30] ise yeniden üretim yönteminin verimliliğini geliştirmek için 5 temel yaklaşımda bulunmuşlardır: tasarım ilkeleri, yaşam döngüsü fikri, sökme stratejisinin planlanması, değerlendirme araçları ve mevcut tasarım araçlarının adaptasyonu. Kim ve Moon [34] ise sökme verimliliğini, yeniden kullanılabilirliği ve geri kazanılabilirliği düşünerek ekomodül oluşturan bir tasarım metodu ortaya koymuşlardır.

Bu tez çalışmasında da parça konsolidasyonuna aday olacak parçaların seçimi için PDC metodu kullanılmıştır. Ürün karmaşıklığını azaltmak, komponentlerin daha kolay kavranması, hareket ettirilmesi ve komponent sayısı ile ara yüzlerin azaltılması ile mümkündür. Dolayısıyla, sökme zorluğunu ölçmek için bu özelliklerin göz önünde bulundurulması ve hangi komponentlerin sökülmesinin zor olduğunun anlaşılması gerekmektedir. Karmaşıklık kavramı 2 farklı seviyede incelenebilir; komponent ve ara yüz. Komponent seviyesi ise 4 faktöre ayrılmaktadır: ağırlık etkisi, boyut, simetri ve komponentlerin kavranması. Ara yüz ise parçalar arasındaki bağlantı ile ilgili olup, mekanik bağlantı, mekanik olmayan bağlantı ve takım kullanımı gibi manual sökme operasyonlarını içermektedir [32]. Karmaşıklık kavramı seviyeleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Karmaşıklık seviyeleri [32]

Şekil 3.8’de bahsedilen özellikler ve ilgili tanımlamalar Çizelge 3.1’de verilmiştir [27].

Çizelge 3.1. Manuel sökme için sökme özellikleri [27]

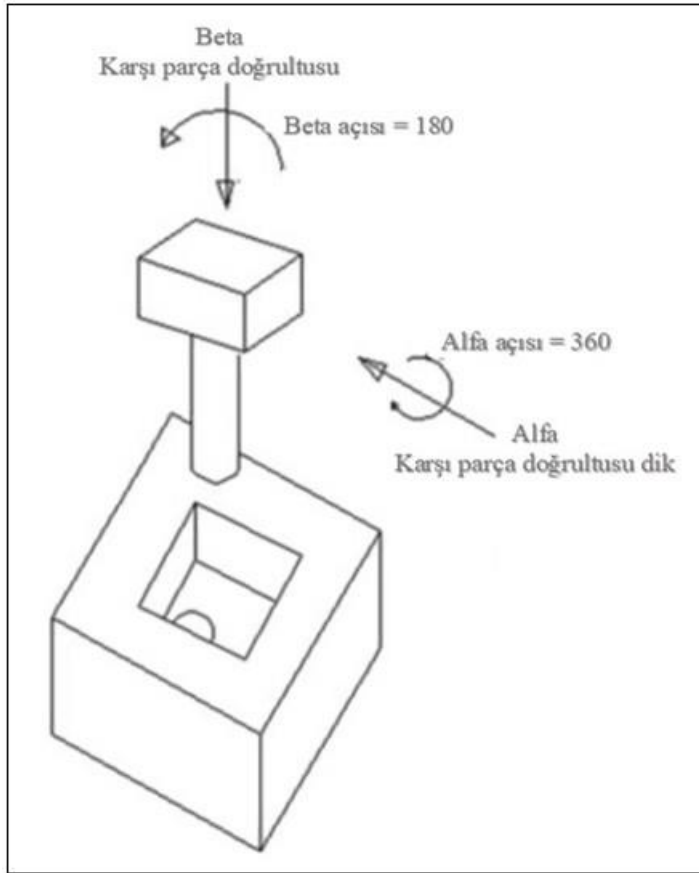
Kategori	Özellik	Tanımlama
Parça	Ağırlık	Bu faktör, parçaların ağırlıklarına göre ne kadar zor pozisyonlandığını ve taşındığını ifade eder. Ağır olan parçalar sökme operasyonu için, ekstra insan gücüne, taşıma takımlarına, parça ve takımların kurulum zamanına gereksinim duyarlar.
	Boyut	Parça boyutu hem montaj hem de sökme operasyonlarında etkisi olan bir faktördür. Parçanın boyutu çok küçük olduğu zaman, sökme operasyonu zamanını geciktirebilir.
	Simetri	Simetri faktörü, ayrılan parçaların doğrultusu ile ilgili sökme işleminin kolaylığını ve sökülen parçanın tekrar takılması sırasındaki zorlukları ifade eder.
	Kavrama ve Manipülasyon	Malzeme özellikleri, parçaların kavranması için (özellikle parçanın hasar görebilmesi ve sağlamlığı açısından) önemli bir role sahiptir. Parçanın hasar görebilme özelliği, parçanın düşme, çarpma ve aşırı kavrama kuvveti gibi durumlarda zarar görmesine neden olabilir. Parçanın sağlamlığı ise, uygulanan bir kuvvete verilen cevap yani deformasyona gösterilen direnç olarak tanımlanabilir. Hasar görebilme özelliği düşük, sağlamlığı yüksek bir parça çalışan tarafından kolayca kavranır. Bu yüzden de sökme zorluk faktörü düşüktür. Tam tersinde ise sökme zorluğu faktörü 1'e yakın olacaktır.
Ara yüz	Mekanik Bağlantıları Sökme İşlemi	Mekanik bağlantılar uygun takımlar ile sökülebiliyorsa, bu durum montajlama ve sökme için tekrarlanabilen bir durumdur. Bu araştırmada 9 çeşit mekanik bağlantı esas alınmıştır: standart kafalı vida/ cıvata, özel kafalı vida/ cıvata, somun ve cıvata, segman, sıkı geçme, perçin/ zımba, pim, silindirik esnek geçme, dirsekli esnek geçme.
	Mekanik Olmayan Bağlantıları Sökme İşlemi	Parçalar kaynak ve kurşun gibi malzemeler ile mekanik olmayacak şekilde birleştirildiğinde, bu bağlantıyı sökmek son derece zordur.
	Düşük/ Yüksek Yoğunlukta Takım Kullanımı	Mekanik ya da mekanik olmayan bağlantılar kullanıldığında, montajlama ve sökme işlemleri için uygun takımlar gerekmektedir. Sökme işlemi için kullanılan takım sayısı ve kullanım yoğunluğu sökme işleminin zorluğunu temsil eden bir sökme özelliği olarak düşünülür.

Manuel sökme için özelliklerin değerleri zorluklara göre 0 ile 1 arasında değişmekte olup bu değerler birimsizdirler. Sökme faktörlerinin spesifik değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Manuel sökme için değerler [30]

Grup	Özellik	Tanımlama	Zorluk faktörü	
Parça	Ağırlık	<4,5 kg	0,50	
		>4,5 kg	1,00	
	Boyut	>15 mm	0,74	
		6 mm' den 15 mm'ye kadar	0,81	
		<6 mm	1,00	
	Simetri ($\alpha+\beta$)	<360	0,70	
		$360 \leq \alpha+\beta \leq 540$	0,84	
		$540 < \alpha+\beta \leq 720$	0,94	
		720	1,00	
	Kavrama ve Manipülasyon	Kolay	0,91	
		Kolay değil	1,00	
	Ara yüz	Mekanik	Standart kafalı vida/ cıvata	0,35
		Bağlantıları	Özel kafalı vida/ cıvata	0,55
Sökme		Somun ve cıvata	0,53	
İşlemi		Segman	0,63	
		Sıkı geçme	0,45	
		Perçin/ Zimba	0,50	
		Pim	0,45	
		Silindirik esnek geçme	0,40	
		Dirsekli esnek geçme	0,33	
		Mekanik Olmayan	Kaynak yöntemi	1,00
Sökme İşlemi		Yapıştırıcı	0,53	
Düşük/ Yüksek		1	0,3/ 0,4	
Yoğunlukta		2 (1 parça için art arda kullanılan)	0,6/ 0,8	
Takım Kullanımı		2'den fazla	1,0/ 1,0	

Parçanın simetrik olması, parçayı pozisyonlamak için gerekli montaj zamanını etkileyen bir geometrik tasarım özelliğidir. Parçanın pozisyonlanması demek, karşı parçaya tam olarak hizalanarak oturması demektir. Bu da ilgili parça ile karşı parçanın eksenlerinin hizalanması ve doğru oturacak şekilde eksen etrafında döndürülmesi ile gerçekleştirilir. Çizelge 3.2'de manuel sökme için parça özelliklerinden olan simetri açılarından alfa açısı (α); ilgili parçanın karşı parça doğrultusuna dik, beta açısı ise (β); ilgili parçanın karşı parça doğrultusunda döndürülmesi ile elde edilir (Şekil 3.9) [33].



Şekil 3.9. Alfa (karşı parça açısına dik döndürme) ve beta (karşı parça doğrultusunda döndürme) simetri açılarının gösterimi

3.2.2. Tek parça karmaşıklık indeksi (SCCI)

PDC, üründen parçaları ayırma sırasında karşılaşılan zorluğu ölçmek için kullanılmaktadır. Sökme zorluğu kavramını parça seviyesinde değerlendirebilmek için PDC modifiye edilerek, SCCI tanımlanmıştır [27]. Parça konsolidasyonu işleminde, SCCI değerleri yüksek olan parçalar gruplanarak, birleştirilebilir.

Sökme özellikleri ve değerleri göz önünde bulundurularak tanımlanan SCCI, parça ve ara yüz tasarımlarını aynı anda göz önünde bulundurarak sökme zorluğunu analiz etmektedir. İlgili denklemler aşağıda verilmiştir [34].

$$SCCI_k = \frac{c_k \sum_1^J c_{c,j} + I_k \sum_1^N c_{i,n}}{\sum_1^J c_{c,j} + \sum_1^N c_{i,n}} \quad (3.1)$$

$$C_k = \frac{\sum_1^J C_{c,j}}{J} \quad (3.2)$$

$$I_k = \frac{\sum_1^N C_{i,n}}{N} \quad (3.3)$$

Burada,

C_k : k' nıncı parçanın ortalama sökme zorluk faktörü

I_k : k' nıncı parçanın ara yüz için ortalama sökme zorluk faktörü

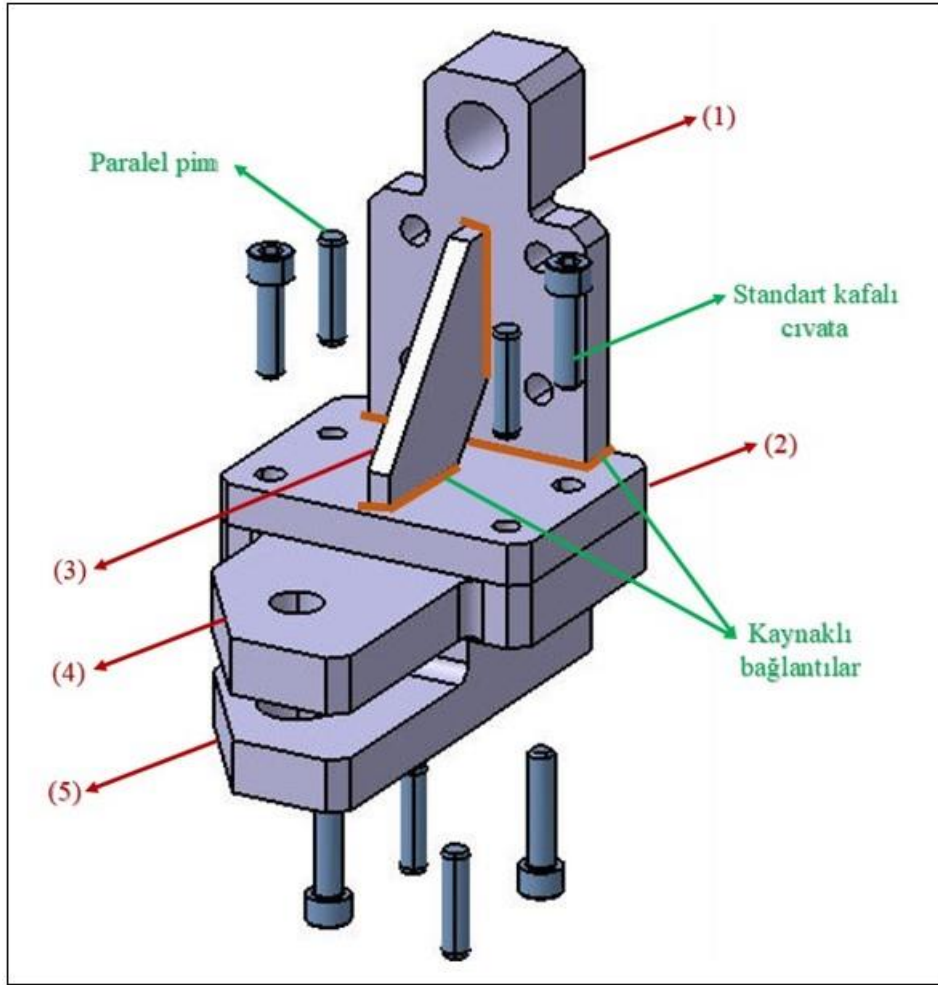
$C_{c,j}$: j' nıncı özelliğin sökme zorluk faktör değeri

$C_{i,n}$: n' nıncı ara yüz özelliğinin sökme zorluk faktör değeri

J : parça karmaşıklığı için özellik sayısı

N : ara yüz karmaşıklığı için özellik sayısı

Ele alınan durum çalışmasında, yukarıda verilen bilgiler esas alınarak her bir parçanın tasarım özelliklerine göre SCCI değerleri hesaplanacaktır. Bunun için durum çalışmasının kapsamındaki alt montajın her bir parçası manuel sökme özelliklerine göre parça ve ara yüz başlıkları altında incelenmesi gerekmektedir (Bkz. Çizelge 3.1 ve 3.2). İlgili alt montajın ara yüz bağlantıları Şekil 3.10'da verilmiştir. Turuncu renk ile gösterilen alanlar, mekanik olmayan bağlantı özelliklerinden kaynak bölgelerini göstermektedir (Bkz. Çizelge 3.1). 1, 2 ve 3 numaralı parçalar arasında kaynak bağlantısı bulunmaktadır. Diğer parçalar arasında ise mekanik bağlantı özelliklerine sahip cıvata ve sıkı geçme pim ara yüz bağlantıları kullanılmıştır (Bkz. Çizelge 3.1).



Şekil 3.10. Durum çalışması için parçalar arası ara yüz bağlantılarının tanımlanması

(1) Dikey plaka

Parça kategorisinde;

- Parça en, boy ve yükseklik bilgileri EK-1’de verilmiştir (111 x 70 x 30 mm).
- Parça ağırlığı 0,68 kg’dır.
- Simetri durumu ise $\alpha = 360^\circ$, $\beta = 360^\circ$ ’dir.
- Kavrama ve manipülasyon olarak da kolay kategorisinde değerlendirilmiştir.

Ara yüz kategorisinde;

- Parça mekanik olmayan bağlantı şekillerinden kaynak ile bağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.10).
- Parçanın sökülebilmesi için ise gereken takım sayısı 1 olup, kullanım yoğunluğu yüksektir.

(2) Yatay plaka

Parça kategorisinde;

- Parça en, boy ve yükseklik bilgileri EK-1’de verilmiştir (100 x 74 x 12,5 mm).
- Parça ağırlığı 0,7 kg’dır.
- Simetri durumu ise $\alpha = 180^\circ$, $\beta = 360^\circ$ ’ dir.
- Kavrama ve manipülasyon olarak da kolay kategorisinde değerlendirilmiştir.

Ara yüz kategorisinde;

- Parça mekanik olmayan bağlantı şekillerinden kaynak ile bağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.10).
- Parçanın sökülebilmesi için ise gereken takım sayısı 1 olup, kullanım yoğunluğu yüksektir.

(3) Destek parçası

Parça kategorisinde;

- Parça en, boy ve yükseklik bilgileri EK-1’de verilmiştir (65 x 55 x 7 mm).
- Parça ağırlığı 0,12 kg’dır.
- Simetri durumu ise $\alpha = 360^\circ$, $\beta = 360^\circ$ ’ dir.
- Kavrama ve manipülasyon olarak da kolay kategorisinde değerlendirilmiştir.

Ara yüz kategorisinde;

- Parça mekanik olmayan bağlantı şekillerinden kaynak ile bağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.10).
- Parçanın sökülebilmesi için ise gereken takım sayısı 1 olup, kullanım yoğunluğu yüksektir.

(4) Pozisyonlayıcı plaka - 1

Parça kategorisinde;

- Parça en, boy ve yükseklik bilgileri EK-1’de verilmiştir (145 x 100 x 19 mm).
- Parça ağırlığı 1,58 kg’dır.

- Simetri durumu ise $\alpha = 360^\circ$, $\beta = 360^\circ$ dir.
- Kavrama ve manipölasyon olarak da kolay kategorisinde değerlendirilmiştir.

Ara yüz kategorisinde;

- Parça mekanik bağlantı şekillerinden standart kafalı cıvata ve sıkı geçme pim ile bağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.10).
- Parçanın sökülebilmesi için ise gereken takım sayısı 2 olup, kullanım yoğunluğu yüksektir.

(5) Pozisyonlayıcı plaka - 2

Parça kategorisinde;

- Parça en, boy ve yükseklik bilgileri EK-1’de verilmiştir (145 x 65 x 28 mm).
- Parça ağırlığı 1,44 kg’dır.
- Simetri durumu ise $\alpha = 360^\circ$, $\beta = 360^\circ$ dir.
- Kavrama ve manipölasyon olarak da kolay kategorisinde değerlendirilmiştir.

Ara yüz kategorisinde;

- Parça mekanik bağlantı şekillerinden standart kafalı cıvata ve sıkı geçme pim ile bağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.10).
- Parçanın sökülebilmesi için ise gereken takım sayısı 2 olup, kullanım yoğunluğu yüksektir.

Yukarıda alt montajı oluşturan her bir eleman, parça ve ara yüz kategorisinde incelenmiştir. Her bir parça tanımlanan manuel sökme özelliklerinden dolayı sökme değerleri almış olup (Bkz. Çizelge 3.2), Çizelge 3.3’te tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.3. Durum çalışması için belirlenen manuel sökme değerleri

Grup	Özellik	(1) Dikey Plaka	(2) Yatay Plaka	(3) Destek Parçası	(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1	(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2
Parça	Ağırlık	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Boyut	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
	Simetri	1	0,84	1	1	1
	Kavrama ve Manipülasyon	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
Ara yüz	Mekanik Bağlantıları Sökme İşlemi	0	0	0	0,45	0,45
	Mekanik Olmayan Bağlantıları Sökme İşlemi	1	1	1	0	0
	Düşük/ Yüksek Yoğunlukta Takım Kullanımı	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8

Çizelge 3.3'te belirlenen manuel sökme değerleri, Eş 3.1, 3.2 ve 3.3 üzerinde yerlerine konularak alt montajın her bir parçası için SCCI değeri hesaplanır. Hesaplamalarda kullanılan;

J : 4 (ağırlık, boyut, simetri, kavrama ve manipülasyon)

N : 3 (mekanik bağlantıları sökme, mekanik olmayan bağlantıları sökme, düşük/ yüksek yoğunlukta takım kullanımı) olarak alınmıştır (Bkz. Çizelge 3.2).

(1) Dikey plaka SCCI hesaplanması

$$C_1 = \frac{0,5 + 0,74 + 1 + 0,91}{4} = 0,788$$

$$I_1 = \frac{0 + 1 + 0,4}{3} = 0,467$$

$$SCCI_1 = \frac{(0,788 \times 3,15) + (0,467 \times 1,4)}{3,15 + 1,4} = 0,689$$

(2) Yatay plaka SCCI hesaplanması

$$C_2 = \frac{0,5 + 0,74 + 0,84 + 0,91}{4} = 0,748$$

$$I_2 = \frac{0 + 1 + 0,4}{3} = 0,467$$

$$SCCI_2 = \frac{(0,748 \times 2,99) + (0,467 \times 1,4)}{2,99 + 1,4} = 0,658$$

(3) Destek parçası SCCI hesaplanması

$$C_3 = \frac{0,5 + 0,74 + 1 + 0,91}{4} = 0,788$$

$$I_3 = \frac{0 + 1 + 0,4}{3} = 0,467$$

$$SCCI_3 = \frac{(0,788 \times 3,15) + (0,467 \times 1,4)}{3,15 + 1,4} = 0,689$$

(4) Pozisyonlayıcı plaka -1 SCCI hesaplanması

$$C_4 = \frac{0,5 + 0,74 + 1 + 0,91}{4} = 0,788$$

$$I_4 = \frac{0,45 + 0 + 0,8}{3} = 0,417$$

$$SCCI_4 = \frac{(0,788 \times 3,15) + (0,417 \times 1,25)}{3,15 + 1,25} = 0,683$$

(5) Pozisyonlayıcı plaka -1 SCCI hesaplanması

$$C_5 = \frac{0,5 + 0,74 + 1 + 0,91}{4} = 0,788$$

$$I_5 = \frac{0,45 + 0 + 0,8}{3} = 0,417$$

$$SCCI_5 = \frac{(0,788 \times 3,15) + (0,417 \times 1,25)}{3,15 + 1,25} = 0.683$$

3.3. Adım 3 – Modüllerin Belirlenmesi

Parça konsolidasyon işlemlerinin yapılabilmesi için, yüksek karmaşıklık değerine sahip parçaları gruplamaya yarayacak olan MCL kullanılarak, parçalar arasındaki ilişki ele alınacaktır.

MCL, stokastik akışa dayanan bir kümeleme algoritmasıdır. Biyolojik ağların kümelenmesinde verimli olduğu görülmüştür. Sıklıkla biyoenformatik içindeki ağları kümelemek için kullanılmaktadır [35].

Zamana karşı rastgele değişiklikleri görmek istediğimiz zaman bu durum stokastik yöntemi içermektedir. Stokastik yöntemin bir çeşidi de Markov zinciri olarak bilinmektedir. Markov zinciri eğitim, sağlık hizmetleri, finans, hava durumu gibi birçok alanda kullanılmaktadır [36]. Yani Markov zinciri, rastgele hareketlerin matematiksel konseptine dayanan hızlı ve ölçeklenebilir bir kümeleme algoritmasıdır. Bu tez çalışmasında Markov zinciri yüksek karmaşıklık değerine sahip parçaların gruplanmasını sağlamak için kullanılmıştır. MCL çözümlenmesi iteratif bir çalışmadır. Çözümleme sonucunda çıkan kümelemenin ayrıntılı olabilmesi için düğüm noktalarının kendilerine döngü eklenir. Bu sayede MCL algoritmasının çıktısı olan kümelerin bağlantısı daha da yüksek bir seviyeye taşınmış olur [37].

Bu amaçla her bir düğüm noktasına kendi döngüleri eklenerek, DSM tekrar oluşturularak, son halini alır (Şekil 3.11).

	(1) Dikey Plaka	(2) Yatay Plaka	(3) Destek Parçası	(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1	(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2
(1) Dikey Plaka	1	1	1		
(2) Yatay Plaka	1	1	1	1	1
(3) Destek Parçası	1	1	1		
(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1		1		1	1
(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2		1		1	1

Şekil 3.11. Durum çalışması için oluşturulan DSM (düğüm noktalarına kendi döngülerinin eklenmiş hali)

3.3.1. Bitişiklik matrisinin (A) oluşturulması

3 numaralı adımda ilk yapılması gereken, alt montajı oluşturan her bir parçanın girdileri ile bitişiklik matrisi A oluşturmaktır. Bitişiklik matrisi A düğüm noktalarındaki ağırlık değerleri ile şekillenmektedir. Hesaplanan SCCI değerleri, tek bir parçanın karmaşıklık değerini vermekle birlikte, SCCI değerleri i ve j parçalarının arasındaki düğüm değerlerine dönüştürülecektir. Bunun için Eş. 3.4 ve 3.5 kullanılmaktadır [27, 32].

$$A(i,j) = \begin{cases} w(i,j) & \text{eğer } i. \text{ ve } j. \text{ parçalar arası ilişki varsa} \\ 0 & \text{yoksa} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$w(i,j) = SCCI_i + SCCI_j \quad (3.5)$$

Adım 2' de hesaplanan SCCI değerleri (Bkz. Bölüm 3.2.2) Eş. 3.4 ve 3.5'te yerlerine konulacak ve parçalar arasındaki ilişkiyi tanımlayan DSM (Şekil 3.11) esas alınarak, bitişiklik matrisi A oluşturulacaktır. Buna göre;

$$w(1,1) = 1,378$$

$$w(1,2) = 1,347$$

$$w(1,3) = 1,378$$

$$w(2,1) = 1,347$$

$$w(2,2) = 1,316$$

$$w(2,3) = 1,347$$

$$w(2,4) = 1,341$$

$$w(2,5) = 1,341$$

$$w(3,1) = 1,378$$

$$w(3,2) = 1,347$$

$$w(3,3) = 1,378$$

$$w(4,2) = 1,341$$

$$w(4,4) = 1,366$$

$$w(4,5) = 1,366$$

$$w(5,2) = 1,341$$

$$w(5,4) = 1,366$$

$$w(5,5) = 1,366 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Hesaplanan değerler ve oluşturulan DSM bazı alınarak (Bkz. Şekil 3.11), Eş. 3.4'teki koşullara göre bitişiklik matrisi A oluşturulur (Şekil 3.12).

	(1) Dikey Plaka	(2) Yatay Plaka	(3) Destek Parçası	(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1	(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2
(1) Dikey Plaka	1,378	1,347	1,378		
(2) Yatay Plaka	1,347	1,316	1,347	1,341	1,341
(3) Destek Parçası	1,378	1,347	1,378		
(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1		1,341		1,366	1,366
(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2		1,341		1,366	1,366

Şekil 3.12. Durum çalışması için oluşturulan bitişiklik matrisi A

3.3.2. Markov matrisinin (M) oluşturulması

Bitişiklik matrisinin A oluşturulmasından sonraki adım Markov matrisinin, M şekillendirilmesidir. Burada amaç daha önce de bahsedildiği üzere, bitişiklik matrisi A kullanılarak rastgele hareketlerin belirlenmesidir. Eş. 3.6’da, bitişiklik matrisindeki A ağırlık değerleri, i . parçadan j . parçaya olacak şekilde 0 ve 1 arasındaki değerlere dönüştürülmüştür.

$$M(i,j) = \frac{A(i,j)}{\sum_{k=1}^n A(k,j)} \quad (3.6)$$

Buna göre Şekil 3.12’de elde edilen bitişiklik matrisi A ve Eş. 3.6 kullanılarak, durum çalışması için Markov matrisi M elde edilmiştir.

$$M(1,1) = \frac{1,378}{1,378 + 1,347 + 1,378} = 0,336$$

$$M(1,2) = \frac{1,347}{1,347 + 1,316 + 1,347 + 1,341 + 1,341} = 0,202$$

$$M(1,3) = \frac{1,378}{1,378 + 1,347 + 1,378} = 0,336$$

$$M(2,1) = \frac{1,347}{1,378 + 1,347 + 1,378} = 0,328$$

$$M(2,2) = \frac{1,316}{1,347 + 1,316 + 1,347 + 1,341 + 1,341} = 0,197$$

$$M(2,3) = \frac{1,347}{1,378 + 1,347 + 1,378} = 0,328$$

$$M(2,4) = \frac{1,341}{1,341 + 1,366 + 1,366} = 0,329$$

$$M(2,5) = \frac{1,341}{1,341 + 1,366 + 1,366} = 0,329$$

$$M(3,1) = \frac{1,378}{1,378 + 1,347 + 1,378} = 0,336$$

$$M(3,2) = \frac{1,347}{1,347 + 1,316 + 1,347 + 1,341 + 1,341} = 0,202$$

$$M(3,3) = \frac{1,378}{1,378 + 1,347 + 1,378} = 0,336$$

$$M(4,2) = \frac{1,341}{1,347 + 1,316 + 1,347 + 1,341 + 1,341} = 0,200$$

$$M(4,4) = \frac{1,366}{1,341 + 1,366 + 1,366} = 0,335$$

$$M(4,5) = \frac{1,366}{1,341 + 1,366 + 1,366} = 0,335$$

$$M(5,2) = \frac{1,341}{1,347 + 1,316 + 1,347 + 1,341 + 1,341} = 0,200$$

$$M(5,4) = \frac{1,366}{1,341 + 1,366 + 1,366} = 0,335$$

$$M(5,5) = \frac{1,366}{1,341 + 1,366 + 1,366} = 0,335$$

Hesaplanan değerler bazı alınarak, Markov matrisi M oluşturulur (Şekil 3.13).

	(1) Dikey Plaka	(2) Yatay Plaka	(3) Destek Parçası	(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1	(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2
(1) Dikey Plaka	0,336	0,201	0,336	0,000	0,000
(2) Yatay Plaka	0,328	0,197	0,328	0,329	0,329
(3) Destek Parçası	0,336	0,201	0,336	0,000	0,000
(4) Pozisyonlayıcı Plaka -1	0,000	0,200	0,000	0,335	0,335
(5) Pozisyonlayıcı Plaka -2	0,000	0,200	0,000	0,335	0,335

Şekil 3.13. Durum çalışması için oluşturulan Markov matrisi M

MCL yöntemini kullanarak çözümleme yapılırken 2 parametre göz önünde bulundurulur. Bunlar; “expansion” ve “inflation” olarak tanımlanmaktadır ve birbirlerine bağlantılı olarak çalışırlar. Her iki terim de mevcut matrisi başka bir matrise dönüştürmeye hizmet eder. Inflation, matrisin akışını güçlendirmek ve zayıflatmak görevini üstlenir. Yani inflation güçlü olan akışları daha da güçlendirir, zaten zayıf olan akışları da zayıflatır. Expansion ise grafin farklı bölgelerinin bağlanmasından sorumludur. Nihayetinde, kümelerin detaylı olarak belirlenmesini üstlenirler. MCL çözülmesi iteratif bir çalışmadır. Her bir iterasyonda 1 expansion, 1 inflation adımı bulunmaktadır. Expansion, lineer cebire ait bilinen matris çarpımı işlemidir. Inflation ise expansion ile olan etkileşimi

açıklayan matematiksel araçların geliştirilmesini ciddi şekilde engelleyen lineer olmayan bir parametredir [37]. Inflation operasyonunda her bir matrix kolonu negatif olmayan bir kuvvete yükseltilir ve sonra normalize edilir [38].

Ele alınan durum çalışmasında son durumda oluşturulan Markov matrisi M (Bkz. Şekil 3.13) 5x5'ten oluşan bir matris yapısıdır. Daha önce de bahsedildiği üzere MCL iteratif olarak çözümlenen bir algoritmadır. Bu çözümleme 'MATLAB' programı kullanılarak yapılmıştır.

- Markov matrix 'MATLAB' programına girilir (Resim 3.1).

```
>> M1=[0.336  0.201 0.336 0  0;
0.328 0.197 0.328 0.329 0.329;
0.336 0.201 0.336 0  0;
0  0.200 0  0.335 0.3353
0  0.200 0  0.335 0.335]

M1 =

    0.3360    0.2010    0.3360         0         0
    0.3280    0.1970    0.3280    0.3290    0.3290
    0.3360    0.2010    0.3360         0         0
         0    0.2000         0    0.3350    0.3353
         0    0.2000         0    0.3350    0.3350
```

Resim 3.1. Markov matrisinin MATLAB programında gösterimi

- Expansion adımı olan 'M1' matrisi kendisi ile çarpılır (Resim 3.2).

```
>> M2=M1*M1

M2 =

    0.2917    0.1747    0.2917    0.0661    0.0661
    0.2850    0.3023    0.2850    0.2852    0.2853
    0.2917    0.1747    0.2917    0.0661    0.0661
    0.0656    0.1735    0.0656    0.2904    0.2905
    0.0656    0.1734    0.0656    0.2903    0.2904
```

Resim 3.2. Expansion adımının oluşturulması

- Inflation adımın da ise ‘M2’ matrisinin kuvveti alınır (Resim 3.3).

```
>> M3= M2.^2

M3 =

    0.0851    0.0305    0.0851    0.0044    0.0044
    0.0812    0.0914    0.0812    0.0814    0.0814
    0.0851    0.0305    0.0851    0.0044    0.0044
    0.0043    0.0301    0.0043    0.0843    0.0844
    0.0043    0.0301    0.0043    0.0842    0.0843
```

Resim 3.3. Inflation adımının oluşturulması

- Elde edilen ‘M3’ matrisi normalize edilerek, Markov matrisine ulaşılır (Resim 3.4).

```
>> M=normalize(M3, 'norm',1)

M =

    0.3272    0.1435    0.3272    0.0169    0.0169
    0.3124    0.4299    0.3124    0.3146    0.3146
    0.3272    0.1435    0.3272    0.0169    0.0169
    0.0165    0.1416    0.0165    0.3259    0.3259
    0.0165    0.1415    0.0165    0.3257    0.3257
```

Resim 3.4. Normalize edilerek elde edilen Markov matrisi

Expansion, inflation ve normalize adımları, elde edilen Markov matrisi kararlı bir duruma geçinceye kadar devam eder. Kararlı durum elde edildiğinde, durum çalışmasındaki hangi parçaların konsolide edilebileceği açıkça görülür.

- 2. iterasyon sonucu elde edilen Markov matrisi;

```
M =

    0.2539    0.1102    0.2539    0.0171    0.0171
    0.4596    0.5662    0.4596    0.4651    0.4651
    0.2539    0.1102    0.2539    0.0171    0.0171
    0.0163    0.1068    0.0163    0.2505    0.2505
    0.0163    0.1066    0.0163    0.2502    0.2502
```

Resim 3.5. 2. iterasyonda elde edilen Markov matrisi

- 3. iterasyon sonucu elde edilen Markov matrisi;

M =				
0.0976	0.0453	0.0976	0.0141	0.0141
0.7789	0.8256	0.7789	0.7868	0.7868
0.0976	0.0453	0.0976	0.0141	0.0141
0.0129	0.0420	0.0129	0.0926	0.0926
0.0129	0.0419	0.0129	0.0924	0.0924

Resim 3.6. 3. iterasyonda elde edilen Markov matrisi

- 4. iterasyon sonucu elde edilen Markov matrisi;

M =				
0.0044	0.0033	0.0044	0.0025	0.0025
0.9869	0.9878	0.9869	0.9875	0.9875
0.0044	0.0033	0.0044	0.0025	0.0025
0.0021	0.0028	0.0021	0.0038	0.0038
0.0021	0.0028	0.0021	0.0038	0.0038

Resim 3.7. 4. iterasyonda elde edilen Markov matrisi

- 5. iterasyon sonucu elde edilen Markov matrisi;

M =				
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Resim 3.8. 5. iterasyonda elde edilen Markov matrisi

Resim 3.8’de elde edilen Markov matrisi anlamlı ve kararlı yapıya ulaşmıştır. Yine de emin olmak için 1 adet daha iterasyon yapılmıştır.

- 6. iterasyon sonucu elde edilen Markov matrisi;

M =					
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Resim 3.9. 6. iterasyonda elde edilen Markov matrisi

Resim 3.9’da görülen 6. iterasyon sonucu, 5. iterasyon sonucu (Bkz. Resim 3.8) ile aynıdır. Bu durumda Markov matrisi kararlı bir yapıya ulaşmıştır. Elde edilen Markov matrisi incelendiğinde, alt montajın bütün parçalarının tek bir satırda toplanmış olup, hepsinin ‘1’ değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç alt montajı oluşturan tüm detay parçaların konsolide edilebileceği anlamına gelmektedir (Resim 3.10).

	(1) Dikey Plaka	(2) Yatay Plaka	(3) Destek Parçası	(4) Pozisyonlayıcı Plaka - 1	(5) Pozisyonlayıcı Plaka - 2
M =	↑	↑	↑	↑	↑
5 parça tek bir modül altında toplanabilir.	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Resim 3.10. Markov matrisi sonucu konsolide edilebilen parçaların görünümü

3.4. Adım 4 – Modüllerin Eklemeli İmalat Açısından Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmalar sonucunda durum çalışması için 5 parçalı alt montaj yapısının, 1 parça olacak şekilde konsolide edilebileceği gözlemlenmiştir. Oluşan yeni yapı eklemeli imalat açısından değerlendirilir ise;

- İlk olarak en kritik olan malzeme bilgisi değerlendirilir. Alt montajı oluşturan tüm detaylar S235JR malzemeden tasarlanmıştır. Yapı 1 parçaya konsolide edildiği için (1

modül), konsolidasyona aday parçalar arasında bir malzeme farkı yoktur. Bu durumda eklemeli imalat için uygundur.

- Bu aşamada değerlendirilmesi gereken diğer kriter konsolide olan yapının kapladığı hacimdir. İlgili yapı 170,5 x 162,5 x 100 mm³ hacme sahiptir. Eklemeli imalat tezgahları için üretim hacmi genel olarak 300 x 300 x 300 mm³ kabul edilmiştir. Bu durumda konsolide yapının eklemeli imalat ile üretimi uygundur.

Bundan sonraki süreçte, konsolide yapının analiz, topolojik optimizasyon gibi süreçlerden geçmesi gerekmektedir. Daha sonra oluşan yeni yapının hangi eklemeli imalat yöntemi ile üretileceği, üretim parametrelerinin ne olacağı gibi konular değerlendirilecektir.

3.5. Adım 5 – Ürünün Ürün Sökme Karmaşıklığı Açısından Değerlendirilmesi

PDC hesaplanabilmesi için gerekli değerlere önceki bölümlerde değinilmişti (Bkz. Çizelge 3.2). PDC bir ürünün sökme karmaşıklığının eğilimini logaritmik olarak göstermek için kullanılabilir [30, 34].

$$PDC = \left(\frac{n_c}{N_c} + CI \right) \log_2(N_c + 1) + \left(\frac{n_i}{N_i} + II \right) \log_2(N_i + 1) \quad (3.7)$$

Burada,

N_c : toplam parça sayısı

N_i : toplam ara yüz sayısı

n_c : tek olan parça sayısı

n_i : tek olan ara yüz sayısı

CI : parça karmaşıklık indeksi

II : ara yüz karmaşıklık indeksi

w_k : ara yüz karmaşıklık indeksinin ağırlık değeri

p_k : k' nıncı komponentin sayısı

$$CI = \sum_1^{n_p} w_k C_k \quad (3.8)$$

$$II = \sum_1^{n_p} w_k I_k \quad (3.9)$$

$$w_k = \frac{p_k}{N_c} \quad \sum_1^{N_c} w_k = 1 \quad (3.10)$$

Eş. 3.7’de, parça sayısı, ara yüz sayısı ve CI ile II değerleri düşük ise, PDC değeri de 0’ a yaklaşıyor demektir. Buna göre durum çalışmasının ilk halinin PDC değeri verilen denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

p_k değeri ilgili parçadan tek bir tane var ise 1’ dir. Durum çalışmasındaki alt montajda yer alan 5 parçanın her birinden 1 adet mevcuttur. Bu durumda her bir parçanın $p_k=1$ ’ dir.

$$w_k = \frac{1}{5} = 0,2$$

Adım 2’ de her bir parça için C_k ve I_k değeri hesaplanmıştı (Bkz. Bölüm 3.2.2).

$$CI = 0,2(0,788 + 0,748 + 0,788 + 0,788 + 0,788) = 0,780$$

$$II = 0,2(0,467 + 0,467 + 0,467 + 0,417 + 0,417) = 0,447$$

İlk durumdaki durum çalışması için;

N_c : 5

N_i : 10 (2 kaynaklı bağlantı + 4 standart kafalı cıvata + 4 paralel pim, Bkz. Şekil 3.10)

n_c : 5

n_i : 3 (kaynaklı bağlantı + standart kafalı cıvata + paralel pim olarak 3 farklı ara yüz, Bkz. Şekil 3.10)

$$PDC_{ilk} = \left(\frac{5}{5} + 0,780\right) \log_2(5 + 1) + \left(\frac{3}{10} + 0,447\right) \log_2(10 + 1)$$

MATLAB programında hesaplanırsa sonuç Resim 3.11'deki gibi çıkar.

```
>> PDC=(5/5+0.780)*log2(5+1)*(3/10+0.447)*log2(10+1)

PDC =

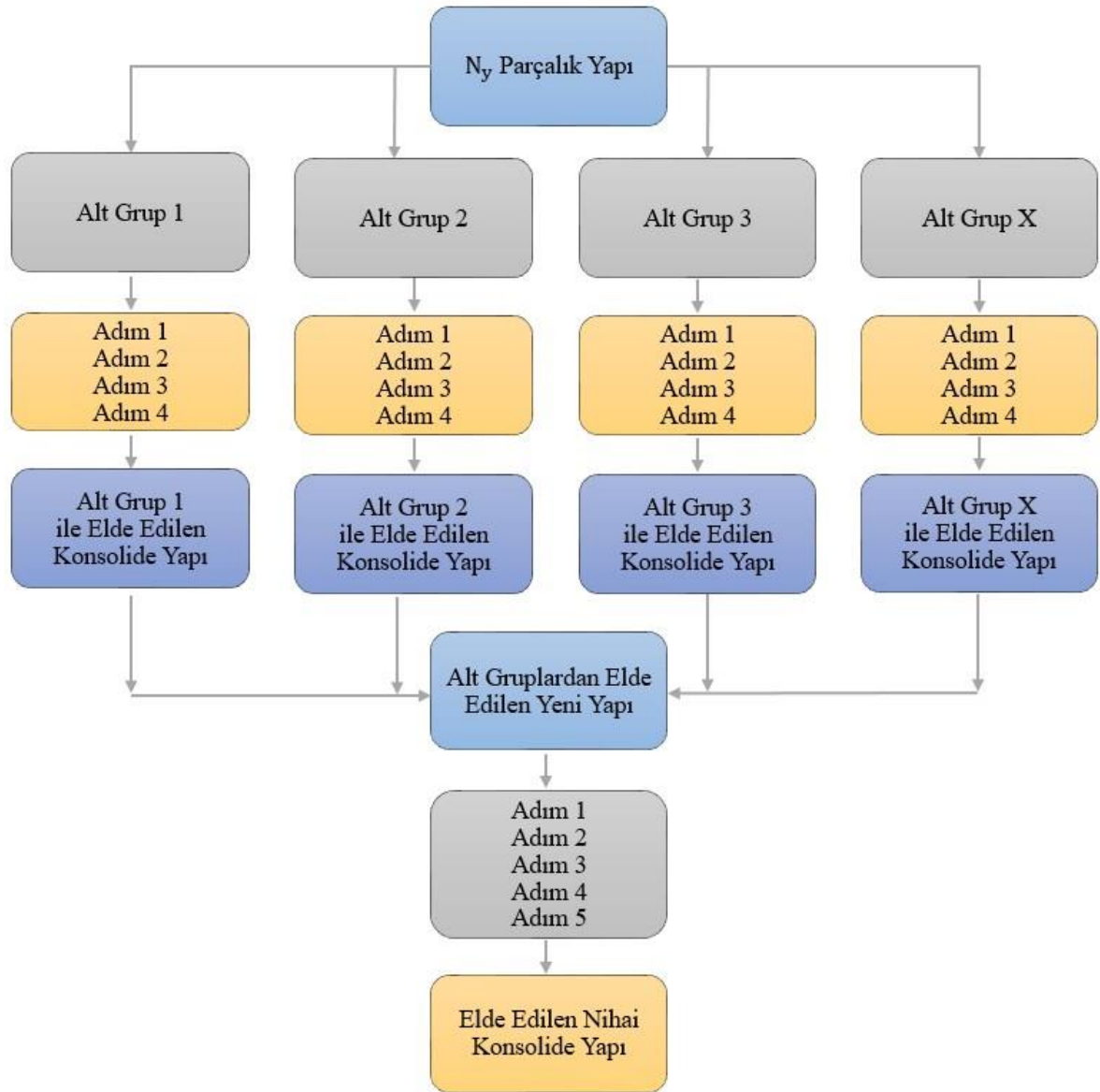
    11.8905
```

Resim 3.11. Durum çalışması için PDC hesaplanması

Son durumdaki durum çalışması için; yapı tek parçadan oluştuğu için ara yüz bağlantısı kalmamıştır. Bu durumda yapı içinde sökülecek bir unsur da yoktur. Tek parçadan oluşan konsolide yapı için bir sökme zorluğundan söz etmek mümkün değildir.

Bu bölümde kullanılan yöntem sonucu ele alınan durum çalışması daha az sayıda parçalı bir yapıdan oluşmaktadır. Parça sayısının çok daha fazla olduğu durumlarda, örneğin N_y parçalık bir yapıda hangi parçaların konsolide edileceğini belirlemek için, yine bu bölümde kullanılan yöntem temel alınarak önerilmiş olan aşağıdaki seçenekler kullanılır.

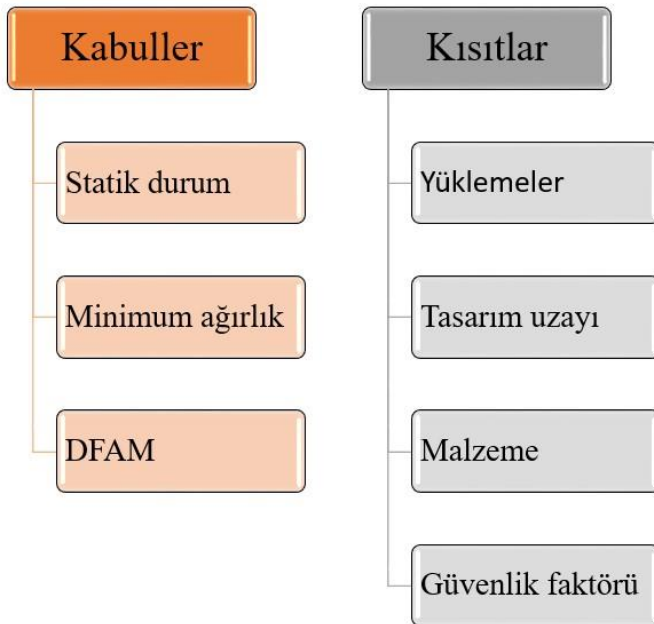
- Yapıyı oluşturan N_y parçadan her biri için, durum çalışmasında olduğu gibi manuel sökme zorlukları belirlenerek SCCI hesaplamaları gerçekleştirilir. Bu bölümde amaçlanan yöntemdeki adımlar tek tek izlenerek Markov matrisi çözdürülür ve konsolide edilecek parçalar elde edilir. Her bir adım hesaplanarak amaçlanan yöntem adımları ile konsolide yapıya ulaşılır.
- N_y parçalık yapıyı daha basite indirgeyecek şekilde bazı kabuller ile ilerlemek mümkündür. Yapıyı oluşturan N_y parçanın her biri için tasarım amacı ve ara yüz gibi ilişkileri göz önünde bulundurarak alt gruplamalar gerçekleştirilir. Bu bölümde amaçlanan yöntem ile her alt grup için hangi parçaların konsolide edileceği üzerine çalışılır. Alt gruplardan elde edilen konsolide yapılar ile artık daha az sayıda yeni bir yapı elde edilmiş olur. Bu yapı yine bu bölümde amaçlanan yöntem adımları izlenerek nihai konsolide yapı elde edilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. N_y parçalı yapılarda konsolidasyon yaklaşımı

4. KONSOLİDE YAPININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU ve YAPISAL ANALİZİ

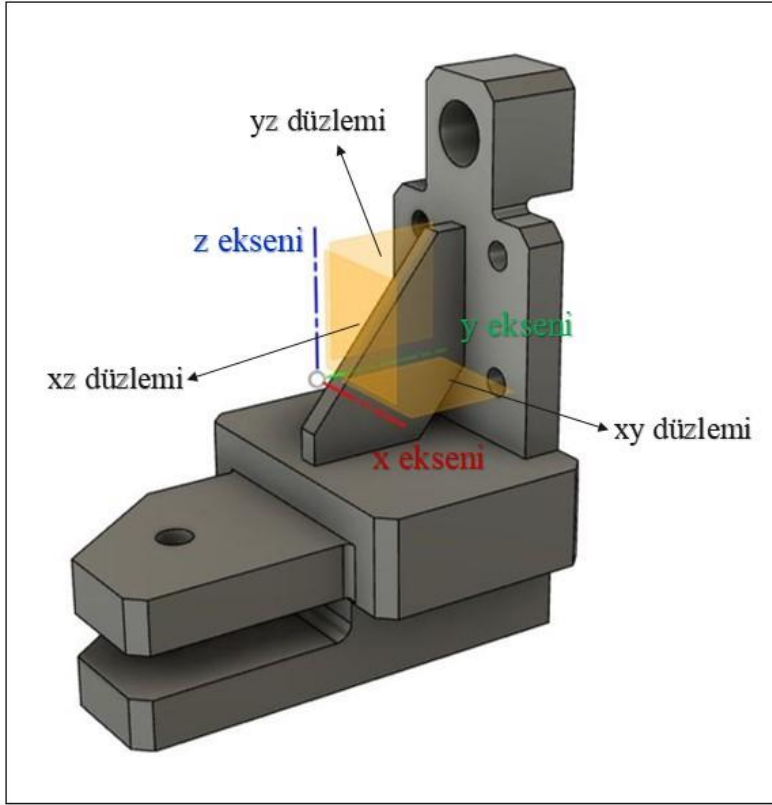
Ele alınan durum çalışması için, PDC'ye göre yapılan çalışmalar sonucunda, 5 parçalı yapının 1 parçaya indirgenip, konsolide edilebileceği sonucu detaylı olarak anlatılmıştır (Bkz. Bölüm 3). Durum çalışması havacılık alanında kullanılan bir yapıdır. Bu yüzden verilen kısıtlamalar içinde ağırlığı en aza indirmek amaçlı topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ek olarak yapı statik durumda çalışmaktadır. Bu yüzden yöntem sonucu elde edilen yeni yapının tasarım gereksinimlerini karşılayıp karşılamayacağını görmek için yapısal analiz uygulanmıştır. Bu sayede geleneksel imalat yöntemlerine göre tasarlanmış montaj yapısının, amaçlanan yöntem sonrası oluşan yeni yapısı için (Bkz. Bölüm 3) topoloji optimizasyonu ve yapısal analiz uygulaması sonucu retrofiti gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada durum çalışması için kullanılan kabuller ve kısıtlamalar Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Durum çalışması için kullanılan kabuller ve kısıtlar

4.1. Konsolide Yapının Topoloji Optimizasyonu

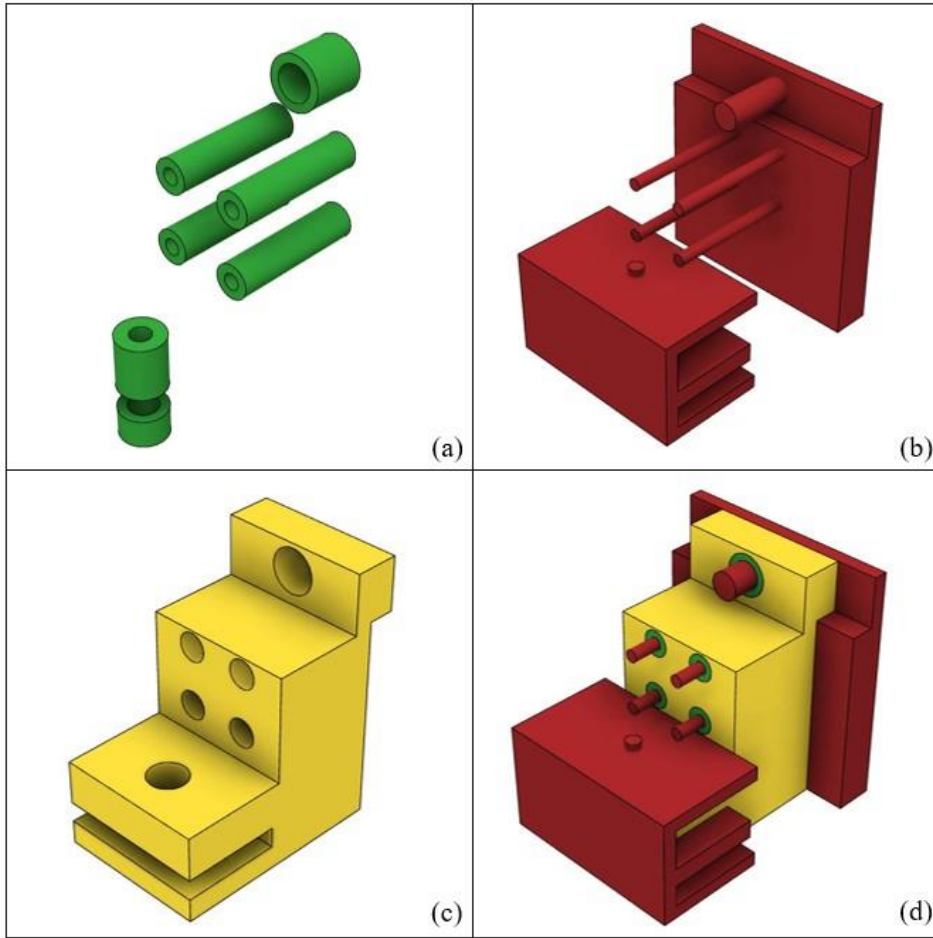
İlk olarak durum çalışması tek bir parça olarak Autodesk Fusion 360 programında yeniden modellenmiştir. Bunun için ilgili programın tasarım modülü kullanılmıştır. Konsolide yapı 1 parçadan oluştuğu için ara bağlantı delikleri kaldırılmıştır (Resim 4.1).



Resim 4.1. Konsolide parçanın 3B katı modellenmesi ve eksenlerinin genel gösterimi

Bölgelerin Tanımlanması

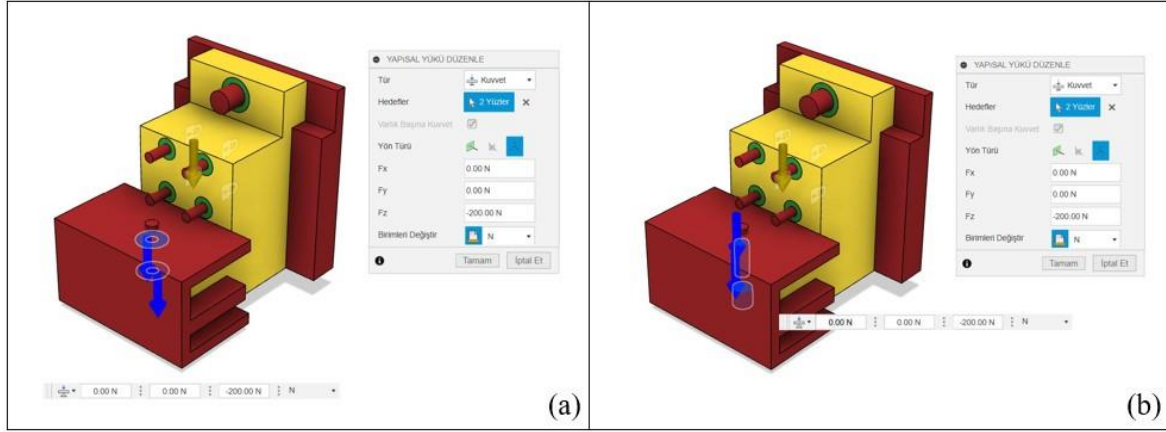
Konsolide yapının tasarım alanlarını sınırlayabilmek için Autodesk Fusion 360 programının üretken tasarım modülü kullanılmıştır. Konsolide parça için bazı bölgelerin tanımlanması gerekmektedir. Öncelikle kesinlikle malzeme kalması gerekli olan alanlar tanımlanır. Bu alanlar program üzerinde geometriyi koru sekmesinin altında toplanmıştır ve yeşil renk ile gösterilmektedir. Resim 4.2a’da görüleceği üzere pimlerin geçtiği delik çevreleri bu alanlar olarak tanımlanır. Bu yüzden optimizasyon sonrası bu bölgelerde malzeme kalması beklenmektedir. Tanımlanması gereken bir diğer bölge ise engel geometrisi sekmesinde bulunmaktadır. Bu bölgeler Resim 4.2b’de kırmızı renk ile gösterilmiş olup, malzeme kalmaması beklenir. Deliklerin pim geçecek alanları, ana karkas ve pozisyonlanacak uçak parçası ile çakışma olasılığı olan bölgeler engel geometrisi olarak tanımlanmıştır. Son olarak konsolide yapının çok kaba bir halini temsil eden başlangıç geometrisi tanımlanmıştır ve Resim 4.2c’de sarı renk ile gösterilmektedir.



Resim 4.2. Autodesk Fusion 360 – model üzerinde tanımlanan bölgelerin genel görünümü. (a) korunması beklenen bölgeler, (b) kaldırılması beklenen bölgeler, (c) tanımlanan başlangıç geometrisi, (d) tanımlanan tüm bölgelerin görünümü

Tasarım Koşullarının Tanımlanması

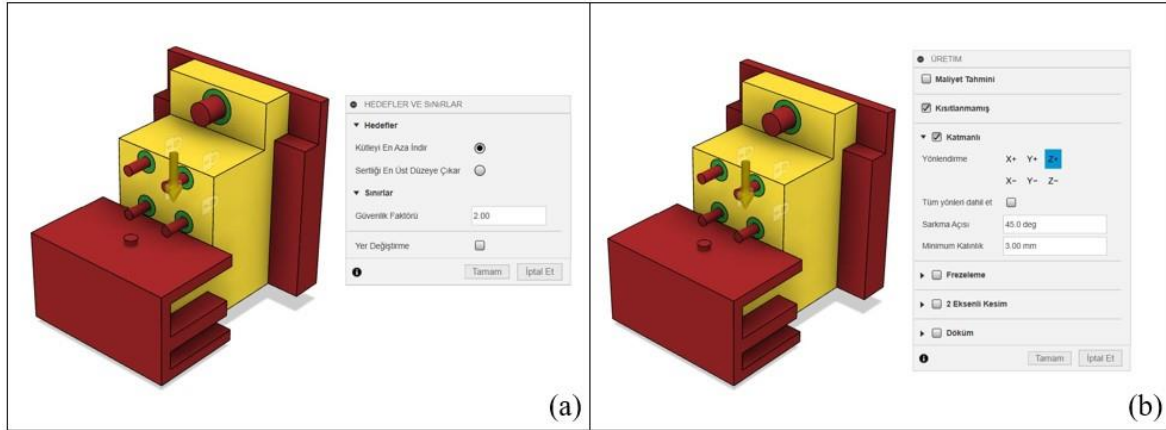
Tasarım koşullarından ilki yapısal kısıtlamalardan biri olan parçanın sabitlenmesidir. Yapı ana karkasa bağlantıyı sağlayan 4 adet delikten sabitlenmiştir. İkinci adım olarak parçaya gelen yüklerin tanımlanması gerekmektedir. Resim 4.3'te görüldüğü üzere uçak parçasını merkezleyen deliğe ve yüzeylere $-z$ yönünde 200'er N kuvvet gelmektedir. Son olarak yer çekimi de tanımlanarak, tasarım koşulları yapıya uygulanmış olur.



Resim 4.3. Autodesk Fusion 360 – yapı üzerine tasarım koşullarını uygulanması, (a) deliğe gelen yükler, (b) yüzeylere gelen yükler

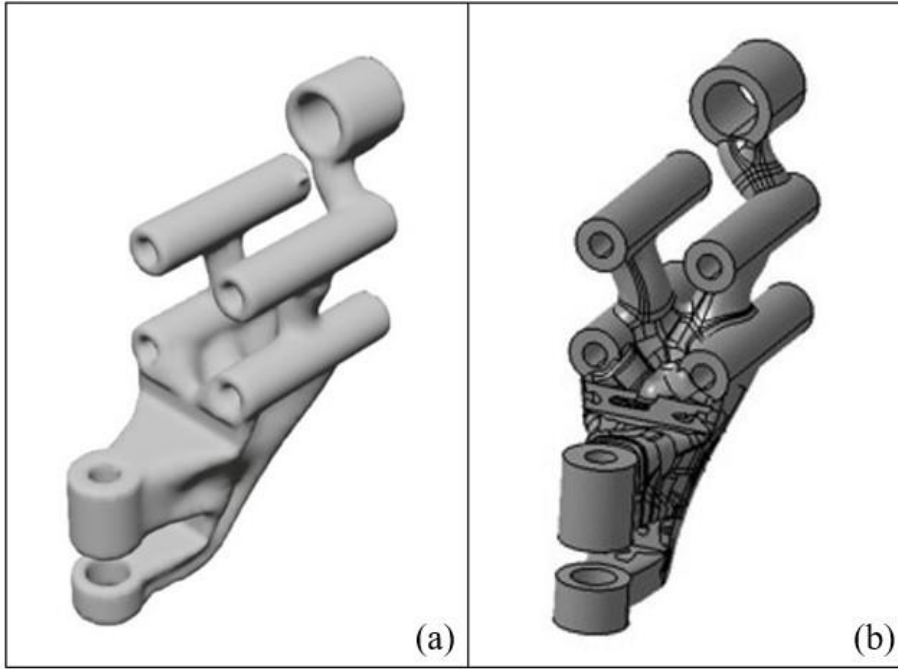
Tasarım Kriterlerinin Tanımlanması

Optimizasyonda göz önünde bulundurulması istenilen tasarım kriterleri tanımlanmıştır. Bu kriterler ilk olarak kütlenin en aza indirilmesi olarak tanımlanmıştır. İkinci kriter ise güvenlik faktörüdür ve 2 değeri olarak verilmiştir. Ek olarak üretim kriterleri ve malzeme bilgisi de girilerek optimizasyona hazır hale getirilmiştir (Resim 4.4).



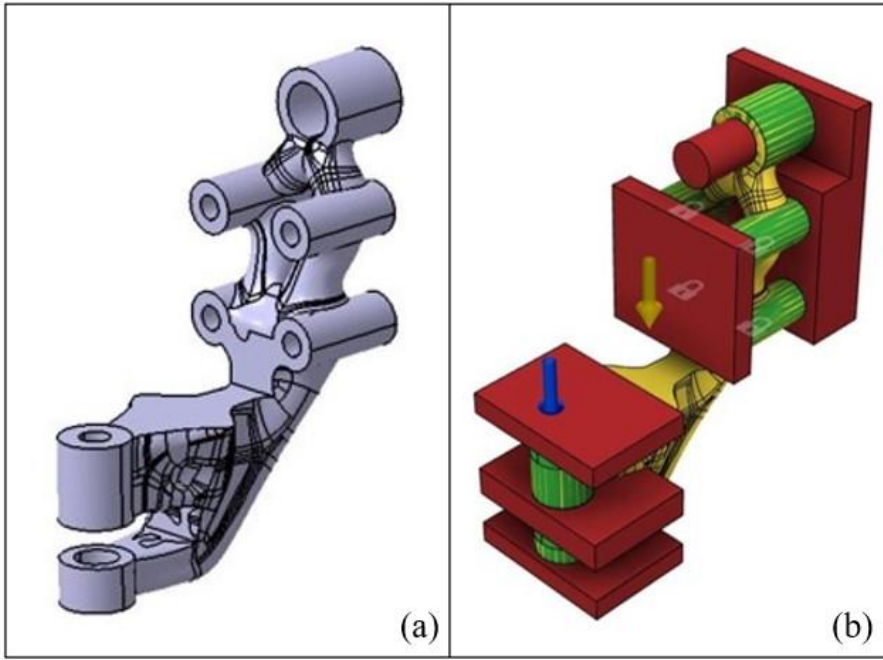
Resim 4.4. Autodesk Fusion 360 – yapı üzerine kriterlerinin uygulanması, (a) belirlenen kütle hedefi ve güvenlik faktörü, (b) belirlenen üretim hedefleri

Belirlenen koşullarda optimizasyona alınan yapı için ilk sonuçlar Resim 4.5'teki gibidir. Ağırlık için değer 1,709 kg'a düşmüştür. Ancak elde edilen data ham haldedir ve işlenmesi gerekmektedir. Üzerinde çalışıldıktan sonra tekrar optimizasyona alınarak, iteratif bir çalışma ile en uygun sonucun yakalanması hedeflenmiştir.



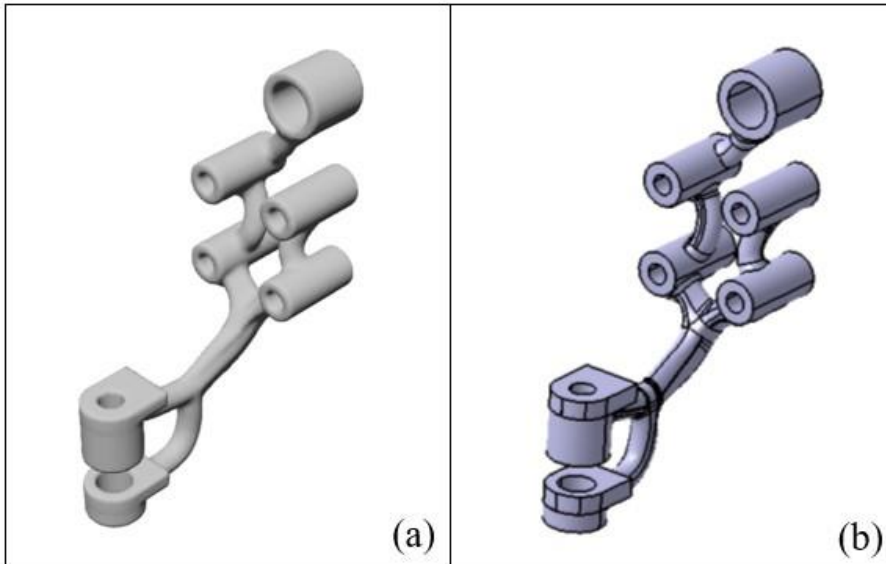
Resim 4.5. İlk optimizasyon sonucunun 3B katı model görünümü, (a) Autodesk Fusion 360 genel görünümü, (b) CATIA V5 genel görünümü

Üzerinde çalışılacak ham data için CATIA V5 programı kullanılmıştır. İlk olarak ham data ilgili programa çekilmiştir ve yüzey modelleme modülünde tekrar ele alınmıştır. Düzenlenmesi gereken alanlar elden geçirilmiş, yüzeyler tekrar örülmüştür. Çalışma sonucu Resim 4.6a'daki gibidir. Düzenlenen data yeniden Autodesk Fusion 360 programına alınarak, ilk optimizasyondaki adımlar tekrarlanmıştır. Tasarım kriterleri ve koşulları ilk tanımlanan çalışma ile aynı kalmakla birlikte malzeme varlığı için tanımlanan alanlarda düzenlemeler yapılmıştır (Resim 4.6b).



Resim 4.6. (a) İlk optimizasyonun düzenlenmiş olan 3B katı model görünümü, (b) ikinci optimizasyon öncesi tasarım koşullarının ve kriterlerinin 3B model üzerinde tanımlanması

Belirlenen koşullarda ikinci optimizasyona alınan yapı için sonuçlar Resim 4.7’deki gibidir. Ağırlık için değer 0,734 kg’a düşmüştür.



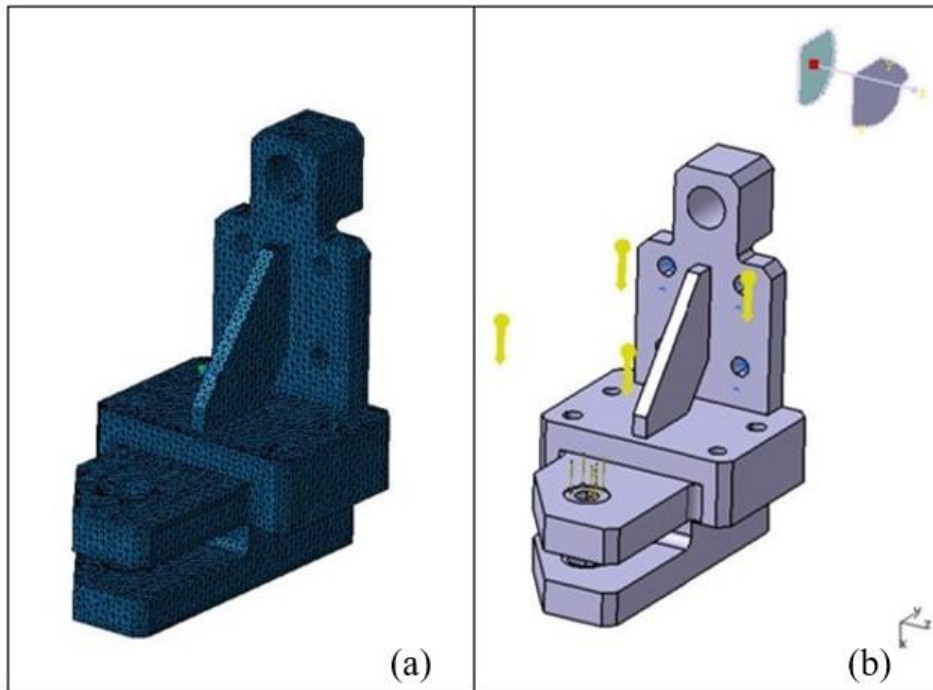
Resim 4.7. İkinci optimizasyon sonucunun 3B katı model görünümü, (a) Autodesk Fusion 360 genel görünümü, (b) CATIA V5 genel görünümü

4.2. Orijinal Yapının Yapısal Analizi

Ele alınan durum çalışmasının ilk hali için yapısal analiz sonuçları bu başlık altında verilmiştir. Burada amaç konsolide yapı için tekrarlanacak yapısal analiz sonuçlarının, ilk yapı için uygulanan yapısal analiz sonuçları ile tutarlı olmasıdır. İlk yapının analizi CATIA V5 ortamında yapısal analiz modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

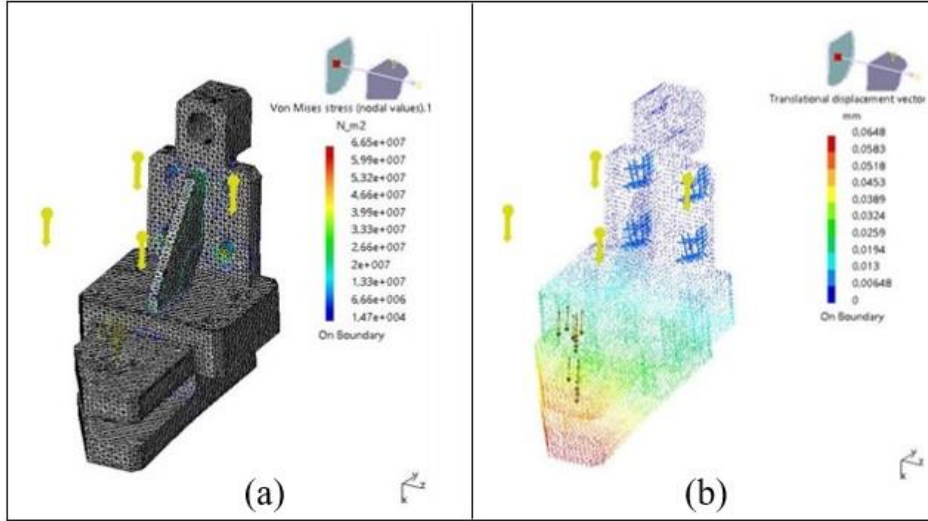
Analiz için girilen kriterler aşağıdaki gibidir;

- Ağ yapısı için en ince kalınlıkta en az 2 eleman olmasına dikkat edilmiştir.
- Parçaların kontak tanımlamaları yapılmıştır,
- Malzeme S235JR çelik olarak girilmiştir,
- Yapının 4 delikte kısıtlaması yapılmıştır,
- Merkezleme deliğine gelen yükler +x eksen yönünde 200 N olarak verilmiştir,
- Uçak parçasının bağlandığı yüzeye gelen yükler de +x eksen yönünde 200 N olarak verilmiştir.



Resim 4.8. Orijinal yapının yapısal analizi, (a) ağ yapısının genel görünümü, (b) analiz girdilerinin model üzerine uygulanmış halinin genel görünümü

Orijinal yapının yapısal analizi sonucunda yapıda elde edilen gerilme dağılımı Resim 4.9a'daki gibidir. Maksimum gerilme 67 MPa olarak görülmüştür. Analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ise Resim 4.9b'deki gibidir ve maksimum yer değiştirme 0,06 mm olarak hesaplanmıştır.



Resim 4.9. Orijinal yapının yapısal analiz sonuçları, (a) gerilme dağılımı sonuçları, (b) yer değiştirme sonuçları

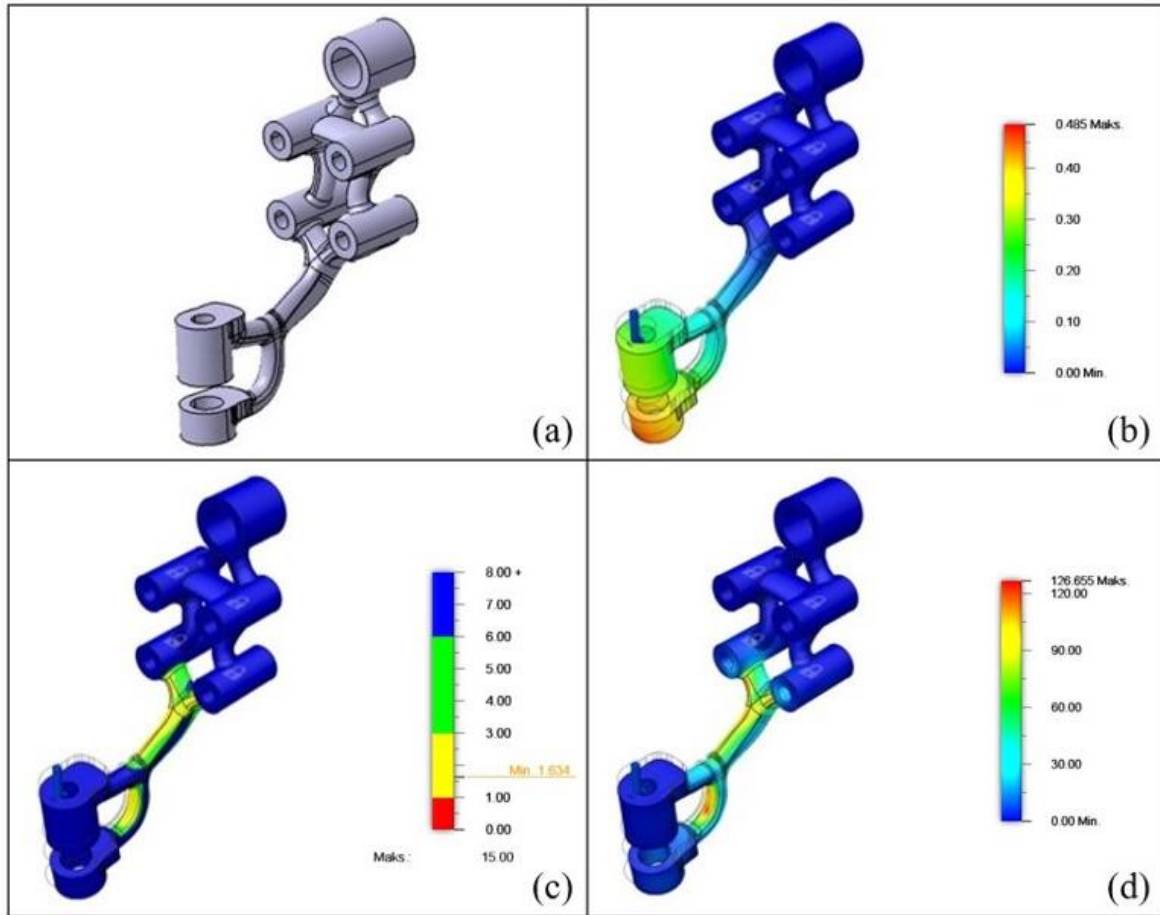
4.3. Konsolide Yapının Yapısal Analizi

Resim 4.7’de elde edilen optimizasyon sonucu, Autodesk Fusion 360 programının simülasyon modülünde analize alınmıştır. Amaç elde edilen yeni tasarımı tasarım gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığına bakılarak gerekli düzenlemelerin yapılmasıdır. Ancak öncesinde Resim 4.7’de görüldüğü üzere konsolide yapı üzerinde birleşmeyen alanlar düzenlenmiş ve bazı bölgelerde iyileştirmeler yapılmıştır (Resim 4.10a). Model ile ilgili düzenleme ve iyileştirmeler CATIA V5 programının yüzey modelleme modülünde, yapısal analiz ise Autodesk Fusion 360 programının simülasyon modülünde yapılmıştır. Analiz girdileri topoloji optimizasyonu sırasında tanımlanan kısıtlarla aynı olup, malzeme S235JR çeliktir.

İlk Yapısal Analiz Sonuçları

Resim 4.10b’de yapının yer değiştirme sonuçları görülmektedir. Maksimum yer değiştirme 0,5 mm civarında olup, uçak parçasını merkezleyen bölgede gerçekleşmiştir. Bu değer

uçak parçası yerleşimini olumsuz etkileyeceği için kabul edilebilir bir değer değildir. Resim 4.10c’de yapısal analizin güvenlik faktörü değerleri görülmektedir. Minimum güvenlik faktörü bu tasarım için 1,63 civarında hesaplanmıştır. İlgili program ve edinilen tecrübeler ise simülasyon sonuçlarında minimum güvenlik faktörünün 2,5 – 3 civarlarında olması gerektiği yönündedir. Resim 4.10d’de ise gerilme dağılımı sonuçları görülmektedir. Maksimum gerilme 127 MPa civarlarında elde edilmiş olup, yapı geneline dağılım göstermemiştir. Bunun yerine belli bölgede gerilme yığılmalarının oluştuğu görülmektedir.



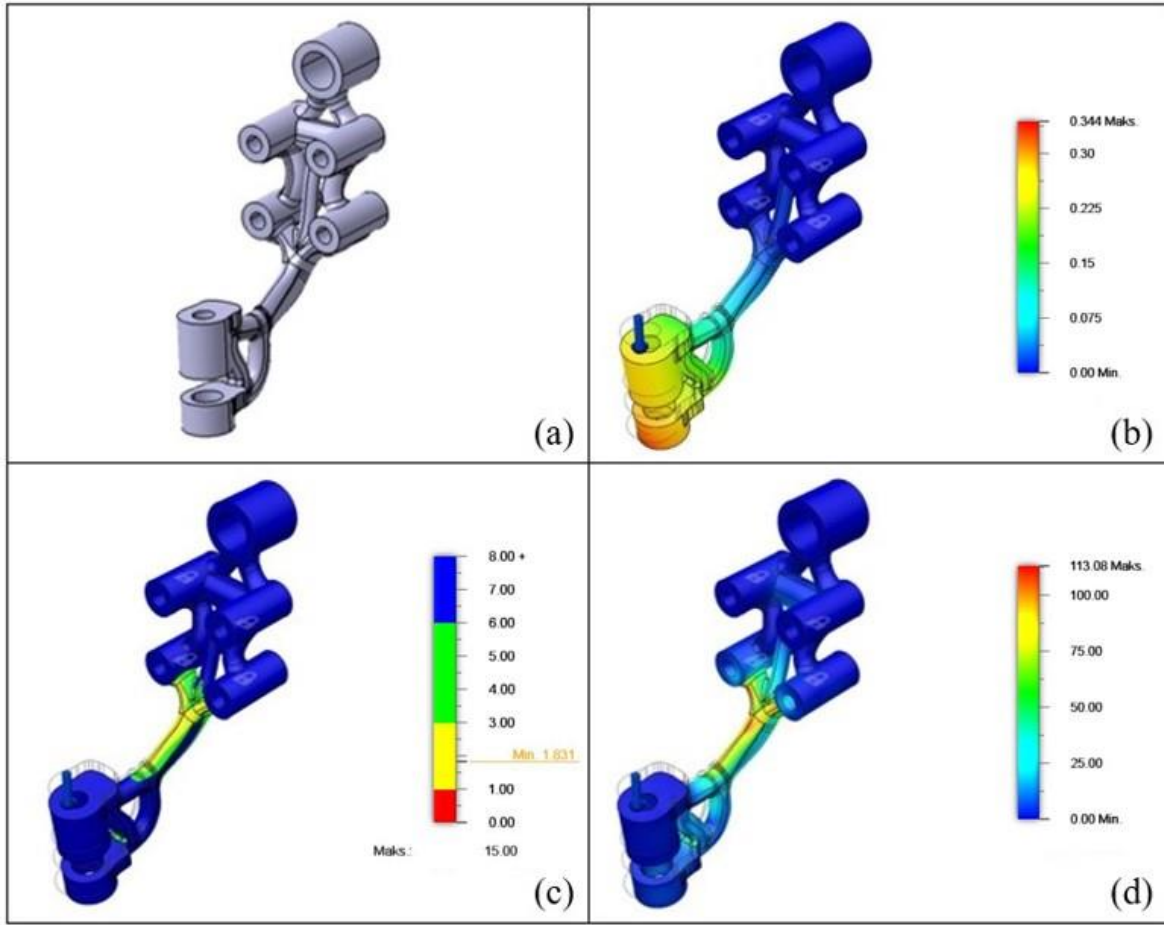
Resim 4.10. İlk yapısal analiz sonuçları, (a) analize sokulan yapının 3B katı model görünümü, (b) yapısal analizde elde edilen yer değiştirme sonuçları, (c) yapısal analizde elde edilen güvenlik faktörü sonuçları, (d) yapısal analizde elde edilen gerilme dağılımı sonuçları

İlk analiz sonuçları, yukarıda açıklandığı üzere kabul edilemeyecek değerler içermektedir. Bu yüzden analiz sonuçlarındaki bölgeler göz önünde bulundurularak yapıda bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Elde edilen yeni yapı daha sonra tekrar analize alınmış olup, sonuçlar yorumlanmıştır.

İkinci Yapısal Analiz Sonuçları

İkinci yapısal analiz öncesi yapı üzerinde uçak parçasını merkezleyen ve yer değiştirmenin en çok çıktığı alandaki bölgeler arasında güçlendirmeler eklenmiştir. Ayrıca yapının sabitlendiği noktalarından en uç merkezleme kısmını da güçlendirmek amaçlı olarak bazı bağlantı noktaları eklenmiştir (Resim 4.11a).

Resim 4.11b’de yapının yer değiştirme sonuçları görülmektedir. Maksimum yer değiştirme 0,34 mm civarında olup, uçak parçasını merkezleyen bölgede gerçekleşmiştir. İlk yapısal analiz sonuçlarına göre iyileşme gözlemlense de bu değer yeterli değildir. Hedef olarak 0,1 mm veya daha altı bir değer gerekmektedir. Resim 4.11c’de yapısal analizin güvenlik faktörü değerleri görülmektedir. Minimum güvenlik faktörü bu tasarım için 1,83 civarında hesaplanmıştır. İlk yapısal analize göre ilgili değerde iyileşme görülmüştür. Resim 4.11d’de ise gerilme dağılımı sonuçları görülmektedir. Maksimum gerilme 113 MPa civarlarında elde edilmiş olup, yapı geneline dağılım göstermemiştir. Bunun yerine belli bölgede gerilme yığılmalarının olduğu görülmektedir. Ancak ilk yapısal analiz sonuçlarına göre iyileşme görülmektedir.



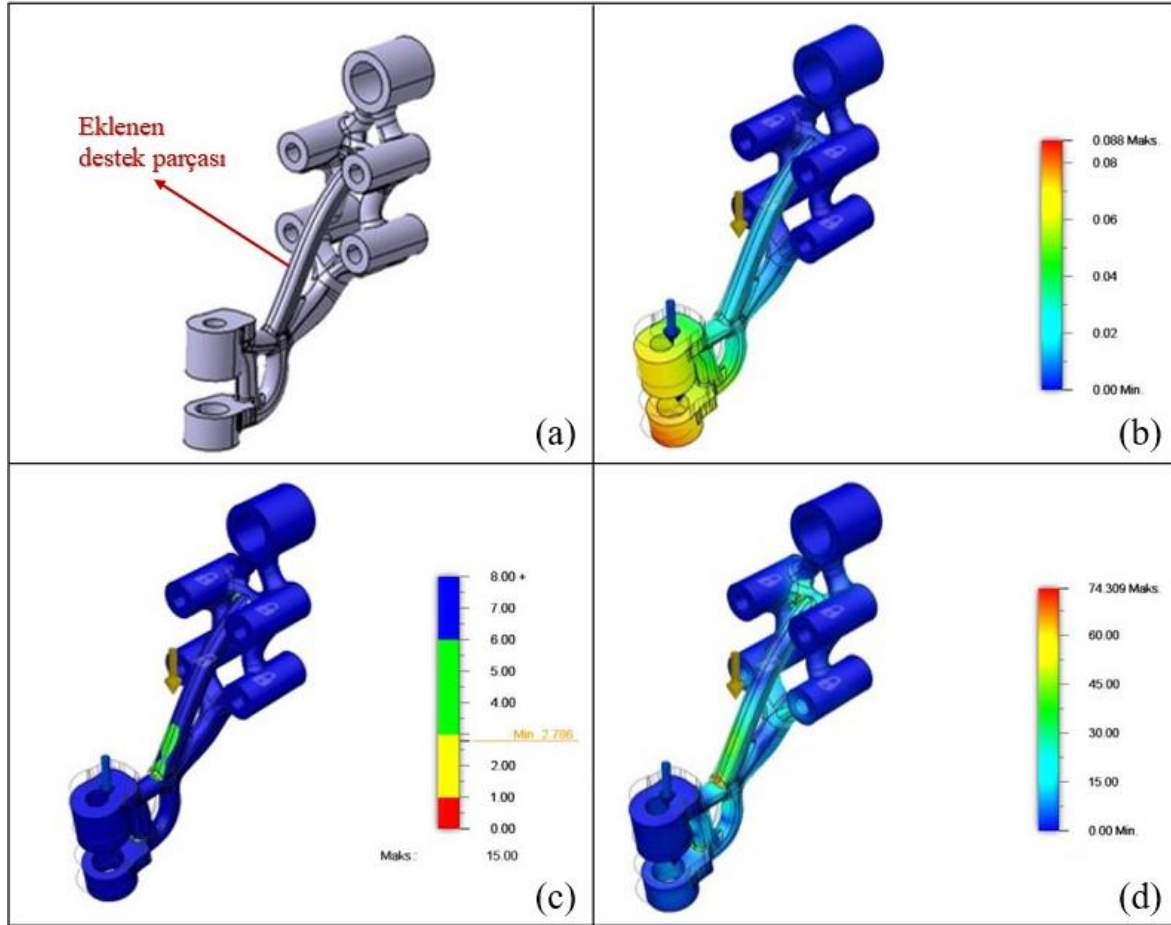
Resim 4.11. İkinci yapısal analiz sonuçları, (a) analize sokulan yapının 3B katı model görünümü, (b) yapısal analizde elde edilen yer değiştirme sonuçları, (c) yapısal analizde elde edilen güvenlik faktörü sonuçları, (d) yapısal analizde elde edilen gerilme dağılımı sonuçları

Üçüncü Yapısal Analiz Sonuçları

İkinci yapısal analiz sonuçları da göz önünde bulundurularak yapı üzerinde iyileştirmeler için çalışılmıştır. Yapının sabit noktalarından en uç merkezleme noktalarına olan alanda bir destek ihtiyacı analiz sonuçlarına göre gözlemlenmiştir. Bu amaç ile yapıda bazı değişiklikler yapılarak baştan son bir destek parçası eklenmiştir. Bu parça durum çalışmasının ilk tasarımındaki (geleneksel imalat yöntemlerine göre tasarlanan) 3 numaralı destek parçası ile aynı görevi görmektedir (Bkz. Şekil 3.5). Elde edilen son yapı Resim 4.12a'daki gibidir.

Resim 4.12b'de yapının yer değiştirme sonuçları görülmektedir. Maksimum yer değiştirme 0,08 mm civarında olup, uçak parçasını merkezleyen bölgede gerçekleşmiştir. İkinci yapısal analiz sonucuna göre önemli ölçüde iyileşme gerçekleşmiş olup, hedeflenen 0,1

mm veya altı olan değere de ulaşılmıştır. Resim 4.12c’de yapısal analizin güvenlik faktörü değerleri görülmektedir. Minimum güvenlik faktörü bu tasarım için 2,8 civarında hesaplanmıştır. İkinci yapısal analize göre oldukça iyileşme gözlemlenmiş olup, kabul gören 2,5 – 3 arasındaki değere ulaşılmıştır. Resim 4.12d’de ise gerilme dağılımı sonuçları görülmektedir. Maksimum gerilme 74 MPa’a kadar düşürülmüştür. İlk ve ikinci yapısal analizlerdeki gerilme dağılımlarına göre değerlendirildiğinde ise gerilme tek bir noktada toplanmamış, yapının geneline dağılmıştır. Ek olarak maksimum gerilme değeri de oldukça düşmüştür. Bu ilk ve ikinci yapısal analizlerden farklı olarak baştan sona kadar eklenen destek parçasının etkisi ile gerçekleşmiştir.



Resim 4.12. Üçüncü yapısal analiz sonuçları, (a) analize sokulan yapının 3B katı model görünümü, (b) yapısal analizde elde edilen yer değiştirme sonuçları, (c) yapısal analizde elde edilen güvenlik faktörü sonuçları, (d) yapısal analizde elde edilen gerilme dağılımı sonuçları

Yapısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Elde edilen yapısal analiz sonuçları ilk yapı ve sonraki konsolide yapılar için gerilme dağılımı ve yer değiştirme bakımından karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Karşılaştırılan Kriter	İlk Yapı Analiz Yapısı	İlk Konsolide Analiz Yapısı	İkinci Konsolide Analiz Yapısı	Üçüncü (son) Konsolide Analiz Yapısı
Maksimum stres (MPa)	67	127	113	74
Maksimum yer değiştirme (mm)	0,06	0,50	0,34	0,08

Resim 4.13. Elde edilen yapısal analiz sonuçlarının tasarım yapılarına göre karşılaştırılması

İlk yapı için elde edilen yapısal analiz sonuçları ile üçüncü (son) konsolide yapı için elde edilen yapısal analiz sonuçları çok yakındır. İlk tasarım yapısı geleneksel imalat metotlarına göre uygulanan tasarım kurallarına göre şekil almış bir tasarımdır. Ek olarak ilk tasarım yapısında parçalar arası montajlama işlemi gerekmektedir. Bu yüzden bağlayıcı atılabilecek kalınlıklarda malzemeler kullanılmış olup, bağlayıcılar için bazı tasarım kuralları uygulanmıştır. Tüm bu nedenlerden ve dolu malzemedan imalat yapıldığı için daha rijit bir yapı sergilenmektedir. Son elde edilen konsolide yapı ise eklemeli imalat metodu ile malzeme yığılarak üretilecektir. Üstelik tek bir parçaya konsolide olduğu için bir montaj gereksinimi de yoktur. Bu yüzden yapıdaki kalınlıklar için geleneksel metotlardaki gibi kalınlık ve bağlayıcı isterleri bulunmamaktadır. Elde edilen 2 yapının da analiz sonuçları yakındır. Konsolide yapının analiz sonuçları kabul edilebilir bir seviyededir. Üstelik ilk tasarım yapısına göre oldukça fazla ağırlık avantajı sağlamaktadır.

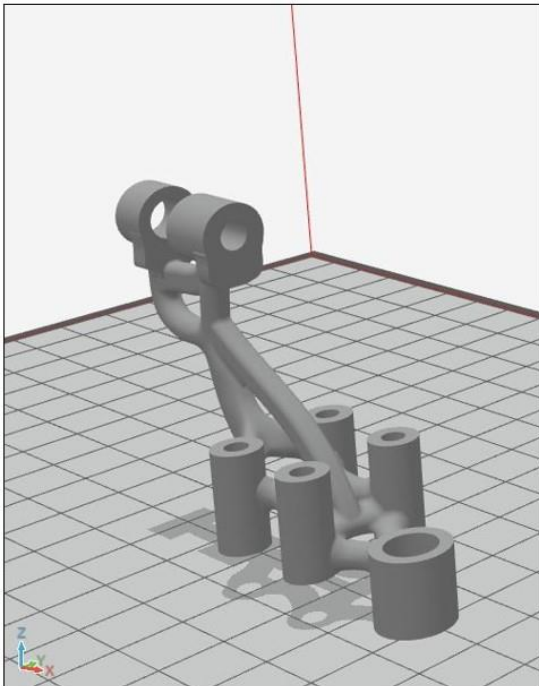
5. ÜRETİM ve MALİYET DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde ele alınan durum çalışması için öncelikle polimer malzemeden bir deneme imalatı gerçekleştirilmiştir. Burada amaç tamamen görsel bir ürün elde etmek olup, herhangi bir ölçüsel doğruluk ya da dayanım amacı güdülmemiştir.

Yine ele alınan durum çalışması için ilk tasarımın üretim maliyetinin kırılımları verilmiştir. Ek olarak optimizasyon çalışması ile elde edilen yeni yapının imalatı için simülasyon programı hazırlanarak maliyet kırılımları elde edilmiştir.

5.1. Ön Prototip Üretimi

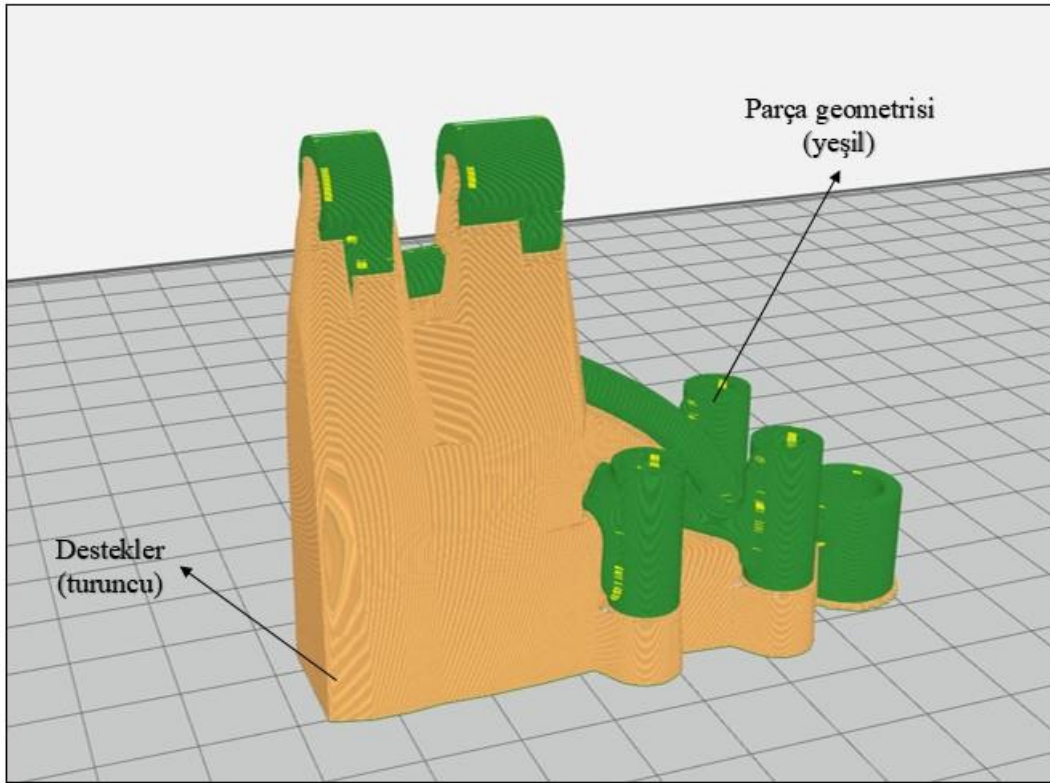
Topolojik optimizasyonu ve analizi gerçekleştirilerek son halini alan yapı için polimer malzeme ile prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu imalat tamamen görsel olmak üzere amaçlanmıştır ve herhangi bir teste tabi değildir. İmalat STRATASYS marka F770 endüstriyel 3B yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bkz. EK-2). Bu tezgah eklemeli imalat yöntemlerinden FDM (eriyik yığma modellemesi) teknolojisini kullanarak imalat yapmaktadır. GrabCAD Print ara yüz programı kullanılarak, parça iş akışı için hazırlanmıştır (Resim 5.1).



Resim 5.1. Konsolide yapının GrabCAD programında oryantasyonu

Parça, GrabCAD programında iş akışı için hazırlanmıştır. Kullanılan parametreler;

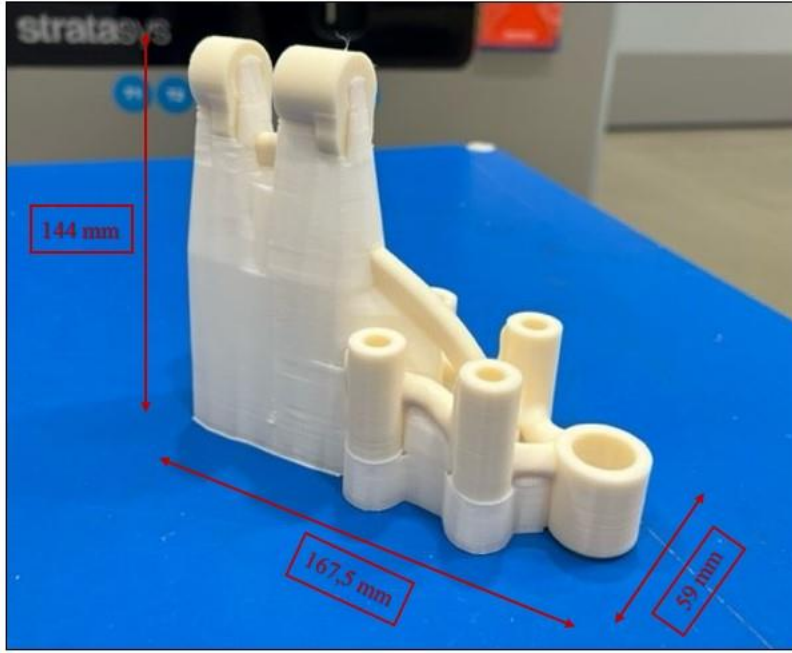
- Parça geometrisini oluşturacak malzeme olarak ASA filament seçilmiştir.
- Parçanın basılabilmesi için ihtiyaç duyulan destek malzeme olarak SR-30 kullanılmıştır.
- Her bir katman kalınlığı 2,54 mm (.01 in) olarak belirlenmiş olup, toplam 576 katman olarak dilimleme işlemi yapılmıştır.
- Parça iç dolgu geometrisi aralıklı (sparse), doluluk oranı ise % 20 olarak belirlenmiştir.



Resim 5.2. Ara yüz programında parça geometrisi ve desteklerin genel görünümü

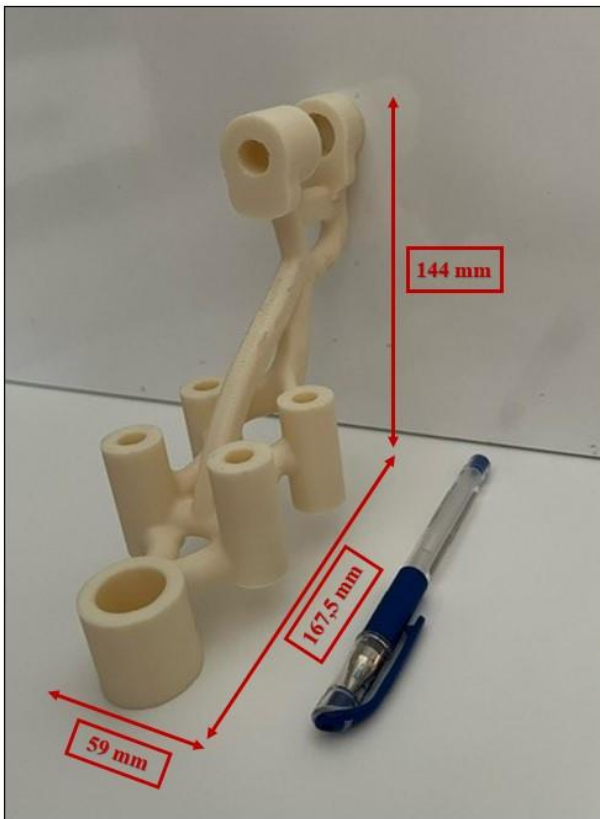
Belirlenen parametrelere göre GrabCAD programı parçanın basım süresini ve kullanılan malzeme miktarlarını hesaplayarak belirlemiştir. Parça basım süresi yaklaşık 8 saat 20 dakikadır. Parça geometrisini oluşturan ASA malzeme yaklaşık 6 in³ ve destek yapıları oluşturan SR-30 malzemesi ise yaklaşık 4 in³ kullanılmıştır.

Prototip imalatı gerçekleştirilen parçanın destek malzemeleri temizlenmeden önceki genel görünümü Resim 5.3'te verilmiştir.



Resim 5.3. Prototip imalatı gerçekleştirilen parçanın genel görünümü ve ölçüleri

Son işlem olarak destek yapılar parçadan temizlenmiştir ve parça son halini almıştır (Resim 5.4).



Resim 5.4. Prototip imalatı gerçekleştirilen parçanın temizlenmiş hali ve ölçüleri

5.2. Geleneksel Metotlar ile İmalat, Maliyet Analizi ve Değerlendirmesi

Üzerinde çalışılan durum çalışması için ilk tasarımın geleneksel metotlar ile üretim maliyeti hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. İlgili parçadan 3 adet kullanıldığı için maliyet analizleri 3 parça için hesaplanmış olup, devamında tek parça için birim fiyat olarak verilmiştir (Çizelge 5.1). Verilen değerler piyasa koşullarında ortalama olarak belirlenmiş olup, yalın maliyet hesaplamaları olarak verilmiştir (ham malzeme depolama vb. hesaba katılmamıştır).

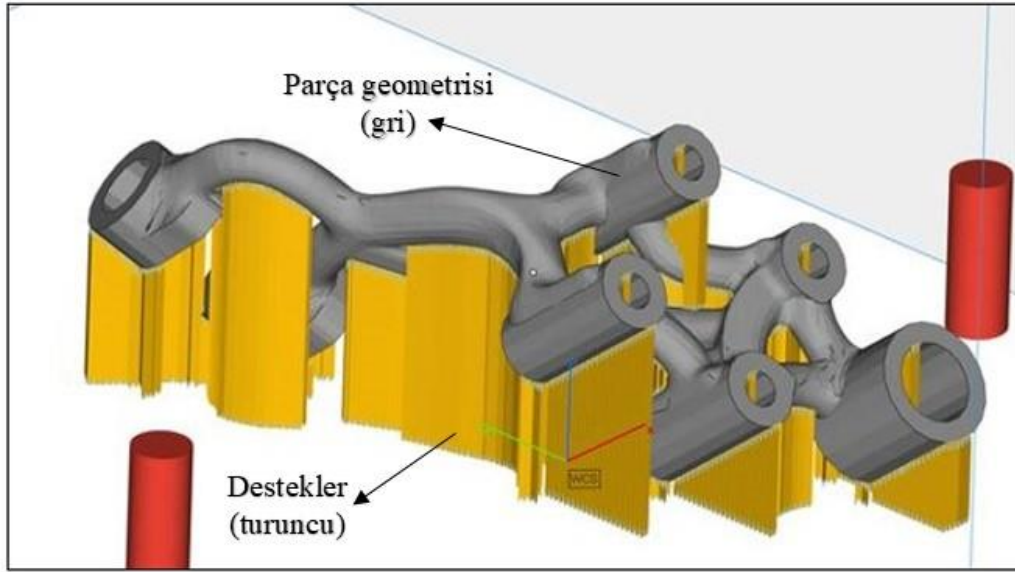
Çizelge 5.1. Geleneksel metotlar ile üretim maliyetleri kırılımı

Maliyet Kalemleri	Maliyet
Ham malzeme	80 \$
Mühendislik prosesi	50 \$
Tezgah işleme prosesi	990 \$
Kaynak prosesi (kaynak işlemi ve gerilim giderme)	115 \$
Montajlama Süresi	180 \$
3 parça için toplam	1415 \$
TOPLAM	472 \$/parça

5.3. SLM Yöntemi ile İmalat, Maliyet Analizi ve Değerlendirmesi

Amaçlanan metot sonucu elde edilen konsolide yapı için SLM 500 tezgahında (Bkz. EK-2) bir üretim simülasyonu hazırlanmıştır. Simülasyon için ara yüz olarak Materialise Magic programı kullanılmıştır.

İş parçasının tezgah yerleşimi ve destekleri Resim 5.11’de görülmektedir. Burada iş parçasının tabandan yüksekliği minimum tutulacak şekilde rotasyon sağlanmıştır. Çünkü yükseklik arttıkça destek yüksekliği de artacak ve desteklerin kopma olasılığı da yükselecektir (Resim 5.5).



Resim 5.5. Konsolide yapının Materialise Magic programında oryantasyonu ve parça geometrisi ile desteklerin genel görünümü

SLM 500 tezgahının simülasyonu için kullanılan proses parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. SLM simülasyonu için kullanılan proses parametreleri

Proses Parametresi	Kullanılan Değer
Lazer odak çapı	100 μm
Katman kalınlığı	40 μm
Lazer gücü	175 W
Tarama mesafesi	100 μm
Tarama hızı	750 mm/s
Enerji yoğunluğu	58 J/mm ³
Toz partikül çapı	10 - 40 μm

Simülasyon hazırlanırken durum çalışmasına en yakın olan ve program içeriğinde bulunan 316L tozu kullanılmıştır. Toz partikülleri küre şeklinde olup, partikül çapları Çizelge 5.2’de verilmiştir. İlgili parçadan 3 adet kullanıldığı için maliyet analizleri 3 parça için

hesaplanmış olup, devamında tek parça için birim fiyat olarak verilmiştir (Çizelge 5.3). Verilen değerler piyasa koşullarında ortalama olarak belirlenmiş olup, yalnız maliyet hesaplamaları olarak verilmiştir (ham malzeme depolama vb. hesaba katılmamıştır).

Çizelge 5.3. SLM ile üretim maliyetleri kırılımı

Maliyet Kalemleri	Maliyet
Ham malzeme	545 \$
Mühendislik prosesi	130 \$
Teknisyen prosesi	110 \$
Tezgah çalışma prosesi	180 \$
Kullanılan Argon	60 \$
3 parça için toplam	1025 \$
TOPLAM	342 \$/parça

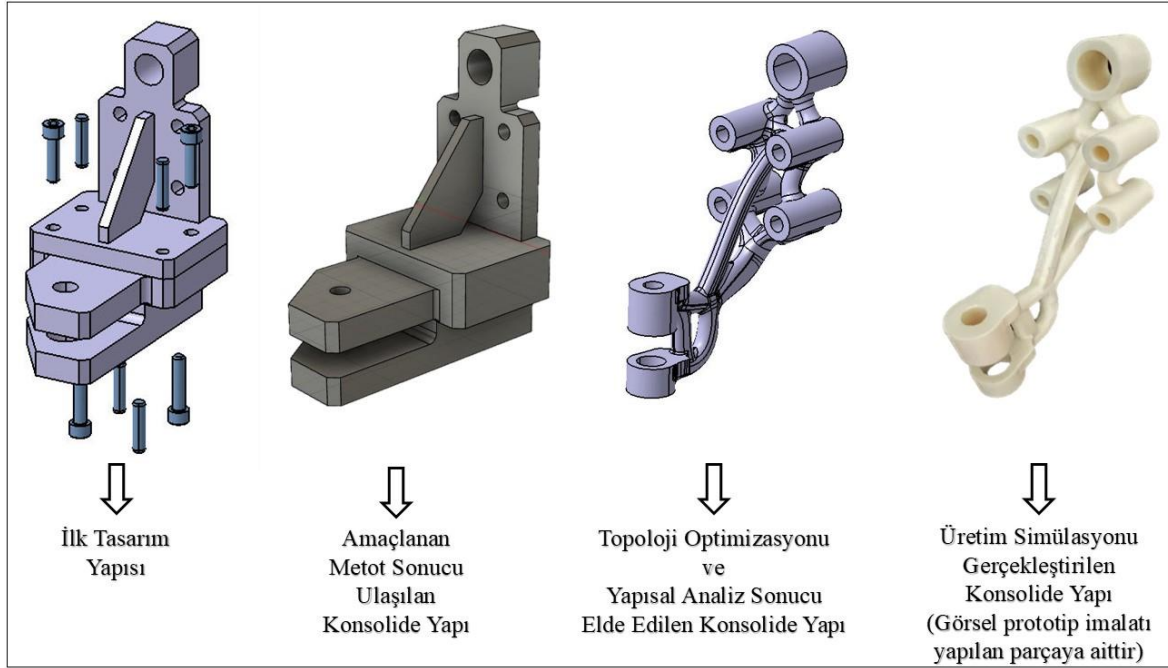
6. ÇALIŞMA SONUÇLARI ve TARTIŞMALAR

Genel olarak ideal bir tasarımcı, oluşturduğu yapıyı hem tasarım gereksinimlerini karşılayacak şekilde hem de geleneksel imalat yöntemleri ile üretim yapılabilecek şekilde oluşturur. Bu yüzden de karmaşık geometriye sahip parçalar, çok parçalı olarak tasarlanmak durumundadırlar. Eklemeli imalat teknolojisi temel olarak karmaşık geometriye sahip olan parçaları imal edebilme özelliğine sahiptir. Geleneksel imalat yöntemleri ile düşünülerek çok parçalı tasarlanan yapılar, eklemeli imalat gözü ile değerlendirildiğinde konsolide edilebilirler. Bu tez çalışmasında önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere parçaların hangi temellere dayanarak konsolide edilebileceği açıklanmıştır. Ele alınan durum çalışmasında da amaçlanan metot adım adım uygulanarak, anlatılmıştır.

6.1. Çalışma Sonuçları ve Değerlendirmeler

Önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılan; uygulanan yöntem (Bkz. Bölüm 3), uygulanan optimizasyon (Bkz. Bölüm 4) ve gerçekleştirilen imalat sonuçları (Bkz. Bölüm 5) toparlanarak bu bölümde değerlendirilmiştir. Ele alınan durum çalışmasının aşamalara göre yapısı Şekil 6.1’de gösterilmiştir. İncelenecek 4 yapı ise;

- İlk tasarım yapısı,
- Amaçlanan yöntem uygulandıktan sonra elde edilen konsolide tasarım yapısı,
- Topoloji optimizasyonu ve yapısal analiz sonrası elde edilen konsolide yapı,
- Üretim simülasyonu gerçekleştirilen konsolide yapı şeklindedir ve eklenen görsel prototip imalatı yapılan parçaya aittir.



Şekil 6.1. Durum çalışmasının aşamalara göre yapısı

Yukarıda bahsedilen her bir sonuç için değerlendirilecek kriterler ise;

- Parça sayısı
- Ağırlık
- PDC
- Malzeme özelliği
- Üretim süresi
- Montajlama süresi
- Birim parça maliyeti

Parça sayısı

Ele alınan durum çalışmasında ilk tasarım yapısı 5 farklı parçadan meydana gelmektedir. Amaçlanan metot adımları durum çalışmasına uygulandığında, 5 parçanın da konsolide edilerek, yeni tasarımın 1 parçadan oluştuğu görülmüştür. Bu kalemde parça sayısı olarak %80 iyileşme görülmektedir. Durum çalışmasının aşamalara göre yapısı Şekil 6.1’de görülmektedir. İlgili şekilde parça sayıları da açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir.

Ağırlık

Ele alınan durum çalışması için 5 parçadan oluşan ilk tasarımın ağırlığı 4,64 kg'dır. Amaçlanan metot adımları durum çalışmasına uygulandığında, 1 parçaya inen yapı için ilk ağırlık azalması bağlayıcılara gerek kalmaması ile başlamıştır. Bağlayıcı ağırlıkları (4 standart kafalı cıvata, 4 paralel pim) yaklaşık 0,127 kg'dır. Sonraki adımlarda yapılan topoloji optimizasyonu ve yapısal analiz sonrası elde edilen konsolide yeni ürün ağırlığı ise 0,834 kg'dır. FDM yöntemi ile yapılan ön prototip imalatı tamamen görsel amaçlı olup, ağırlık ile ilgili bir değerlendirme yapılmamıştır. Gerçek parçayı üretmek için SLM yöntemi amaçlanmış olup, gerçekleşecek verileri elde etmek için bir üretim simülasyon programı hazırlanmıştır. SLM yöntemi gereği parça dolu malzemeden basılacağı için, üretim sonucu gerçekleşecek değer de analiz sonucu çıkan değerle aynı olarak 0,834 kg alınabilir. Bu aşamada ağırlık olarak %82 oranında iyileşme elde edilmiştir.

PDC

Ele alınan durum çalışmasında ilk tasarım yapısı 5 farklı parçadan meydana gelmektedir. Dolayısıyla her bir parçayı birbirine bağlamak ve sökmek için bir PDC değerinden söz etmek doğrudur. Yapılan hesaplamalara göre ilk durum için PDC değeri 11.89' dur. Amaçlanan metot adımları durum çalışmasına uygulandığında, 5 parçanın da konsolide edilerek, yeni tasarımın 1 parçadan oluştuğu görülmüştür. Bu durumda PDC hesaplaması yapılmaz. Zira yeni yapı içinde herhangi bir sökme prosesi kalmamıştır.

Malzeme özelliği

Ele alınan durum çalışmasında ilk tasarım yapısı 5 farklı parçadan meydana gelmektedir ve her parçanın malzemesi aynı olmakla beraber S235JR' dir. Amaçlanan metot sonucuna göre 5 parçanın da konsolide edilebileceği ortaya çıkmıştır. Bu durum eklemeli imalat yönünden ele alındığında tüm parçalar aynı malzemeden tasarlandığı için herhangi bir kısıt ortaya çıkmamıştır.

Üretim süresi

Ele alınan durum çalışmasının ilk tasarım yapısı geleneksel imalat yöntemleri ile üretilecek şekilde kurgulanmış bir yapıdır. Bu yapıyı üretmek için gerekli olan süre yaklaşık 15,5 sa/parçadır. Bu süreye tezgâh işleme süreleri, kaynak işlemleri (kaynak prosesi ve gerilim giderme işlemi) ve montajlama işlemleri dâhildir. Konsolide edilmiş ve SLM yöntemi ile üretim simülasyonu hazırlanan son yapı için ise üretim süresi yaklaşık 13 sa/parçadır. Bu süreye tezgâh işleme süresi, tel erozyon süresi ve tesviye süreleri dâhil edilmiştir. Üretim süresi olarak %16 oranında iyileşme elde edilmiştir.

Montajlama süresi

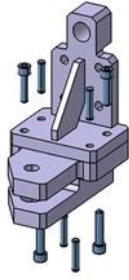
Durum çalışmasının ilk tasarım hali 5 parçadan oluştuğu için bir montaj prosesi gerçekleşmektedir. Bu süre yaklaşık olarak 1,5sa/parçadır. Ancak konsolide yapı tek bir parçadan oluştuğu için montajlama prosesi artık söz konusu değildir.

Birim parça maliyeti

Bölüm 5.2 ve 5.3'te gerçekleştirilen maliyet analizlerine göre ilk durum yapısı için maliyet 472 \$/parçadır. Konsolide edilmiş ve SLM yöntemi ile üretim simülasyonu hazırlanan parça için ise maliyet 342 \$/parça olarak hesaplanmıştır. Birim maliyet olarak yaklaşık % 27,5 iyileşme elde edilmiştir.

6.2. Karşılaştırmalar ve Tartışmalar

Bölüm 6.1'de açıklanarak değerlendirmeye alınan tüm kriterler, bu bölümde karşılaştırılmıştır. Her bir kriter, ele alınan aşamalara göre (Bkz. Şekil 6.1) Şekil 6.2'de toparlanmıştır.

Karşılaştırılan Kriter	 İlk Tasarım Yapısı	 Amaçlanan Metot Sonucu Ulaşılan Konsolide Yapı	 Topoloji Optimizasyonu ve Analiz Sonucu Elde Edilen Konsolide Yapı	 İmalatı Gerçekleştirilen Konsolide Yapı
Parça Sayısı	5	1	1	1
Ağırlık	4,64 kg	4,51 kg	0,83 kg	-
PDC	11,89	-	-	-
Malzeme Özelliği	S235JR	S235JR	S235JR	316L
Üretim Süresi	15,5sa/parça	-	-	13 sa/parça
Montajlama Süresi	1,5 sa/parça	-	-	-
Birim Parça Maliyeti	472 \$/parça	-	-	342 \$/parça

Şekil 6.2. Karşılaştırma kriterleri ve elde edilen sonuçlar

Şekil 6.2’de üretim simülasyonu gerçekleştirilen konsolide yapı için verilen görsel prototip imalatı ile gerçekleştirilmiş parçaya aittir. Şekil 6.2’de görüldüğü üzere parça sayısı, ağırlık, üretim süresi ve birim parça maliyeti bakımından önemli ölçüde iyileşmeler elde edilmiştir. Ek olarak ilk durumda değerlendirmeye alınan PDC ve montajlama süresi kriterlerine gerek kalmamıştır. Malzeme konusunda bir değişiklik olmamakla beraber, gerçekleşen değerlerin yüzdesel olarak karşılaştırılması ise Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Belirlenen kriterlere göre ilk ve son durum karşılaştırılması

Kriterler	İlk Durum	Son Durum	Karşılaştırma
Parça Sayısı	5	1	% 80 azalma
Ağırlık	4,64 kg	0,83 kg	% 82 azalma
PDC	11,89	Ortadan kalkmıştır	Ortadan kalkmıştır
Malzeme Özelliği	S235JR	S235JR	Aynı malzeme
Üretim Süresi	15,5 sa/parça	13 sa/parça	% 16 azalma
Montajlama Süresi	1,5 sa/parça	Ortadan kalkmıştır	Ortadan kalkmıştır
Birim Parça Maliyeti	472 \$/parça	342 \$/parça	% 27,5 azalma

7. SONUÇLAR ve İLERİKİ ÇALIŞMALAR

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında bir ürüne ait parçalardan hangilerinin konsolide edilebileceğinin belirlenmesi üzerinde çalışılmıştır. Genel olarak sezgisel ve tecrübeye dayalı olarak belirlenen bu işlem için somut ve matematiksel bir yöntem kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda parça sökme karmaşıklığı yöntemine dayandırılan adımlar kullanılmış ve zorluk katsayıları yüksek olan parçalar ve aralarındaki ilişki dikkate alınarak hangi parçaların konsolide olabileceği belirlenmiştir. Amaçlanan ve uygulanan bu metod sonucunda bir ürünlerdeki hangi parçaların konsolide edilebileceği ile ilgili adımlar ve kurallar belirlenmiştir.

Kullanılan metotta ilk olarak ürünü oluşturan parçalar için düğüm bağlantı diyagramı belirlenmiştir. Bu sayede parçalar arası ilişkiyi belirleyen DSM doğru olarak oluşturulmuştur. Burada kritik nokta ürünü oluşturan her bir parçanın tasarımdaki işlevi, amacı ve mantalitesinin doğru olarak kavranmasıdır. Üretimi kolaylaştırmak amacı ile (geleneksel imalat yöntemleri açısından) çok parçalı olarak tasarlanan parçalar benzer ara yüz ve işleve sahiptirler. Bu yüzden DSM’de benzer dağılım göstermektedirler. Bu çalışmada DSM sadece fiziksel ara yüz değil, parçaların işlevselliği de dikkate alınarak elde edilmiştir.

Ürünün sökme karmaşıklığını belirlemek için, ürüne ait her bir parçanın tek parça sökme karmaşıklığı hesaplanmıştır. Her bir parçanın parça ve ara yüz özelliklerinden dolayı sahip olduğu katsayılar literatürde belirlenen tablolardan elde edilmiştir.

Konsolide edilecek parça modüllerinin belirlenmesi için bitişiklik matrisi ve Markov matrisleri oluşturulmuştur. Bu matrisleri elde etmek için hesaplanan tek parça sökme karmaşıklıkları kullanılmıştır. Elde edilen Markov matrisi MATLAB programında MCL kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen sonuç ile hangi parçaların konsolide edilebileceği açık olarak görülmüştür. Ele alınan durum çalışması için 5 parçalı ürünün, tek parçaya konsolide edilebileceği belirlenmiş, parça sayısı anlamında %80 oranında azalma elde edilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan ilk durum çalışması ile elde edilen konsolide yapı için PDC hesaplanarak karşılaştırılmıştır. İlk durumda bu sayı çok yüksek bir değer olan 11,89 olarak belirlenmiş, konsolidasyon sonrası ürün tek bir parçaya düşürüldüğü için sökme zorluğunun ortadan kalktığı görülmüştür.

Kullanılan metoda göre tasarım kuralı olarak kaynaklı bağlantıların konsolide edilebileceği belirlenmiştir. Ele alınan durum çalışmasında da bu durum desteklenmektedir. Genel olarak kaynaklı bağlantı kullanımında ilgili parçaların sökülmesi öngörülmez. Bu durum kullanılan metot sonucunda da desteklenmiştir. Ek olarak parçaların kaynaklanabilmesi için aynı malzeme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Ele alınan durum çalışmasında da konsolide olan parçalar aynı malzeme özelliğine sahiptir ve aynı şekilde birbirlerini desteklemektedirler.

Kullanılan metoda göre tasarım kuralı olarak ürün içinde çok nadir sökülen ya da sadece ürünün kurulum aşamasında kalıcı olarak bağlantısı yapılan ve ürün kullanımında bir daha sökülmesine gerek olmayan parçaların da konsolide edilebileceği belirlenmiştir. Ele alınan durum çalışmasında bu bağlantı tipinde detaylar mevcuttur ve konsolide edilebilecekleri görülmüştür.

Elde edilen konsolide yapı için topoloji optimizasyonu ve devamında yapısal analiz çalışmaları yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu ile konsolide yapı üzerinde ağırlık azaltılması gerçekleştirilmiştir. En başta 4,64 kg olan yapı, optimizasyon sonrası 0,83 kg'a düşürülerek ağırlık anlamında %82 oranında azalma elde edilmiştir. Optimizasyon çalışmaları esnasında iteratif bir çalışma sergilenerek, yapısal analiz gereksinimlerini karşılayacak şekilde iyileştirmeler yapılmış ve elde edilen yapı, ilk durum gereksinimlerini karşılayacak şekilde uygun hale getirilmiştir.

Son adım olarak ilk durum çalışması ile son olarak elde edilen konsolide yapının üretim ve maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. İlgili ürünlerin imalatı için ortaya çıkan maliyet kırımları gerçekleştirilmiş ve toplam maliyet değerlendirilmesi yapılmıştır. İlk tasarımın geleneksel imalat metotları ile üretim maliyeti 472 \$/parça olarak hesaplanmıştır. Son konsolide yapının SLM imalat metodu ile üretim maliyeti ise 342 \$/parça olarak hesaplanmıştır. SLM yöntemi ile imalat, geleneksel metotlar ile imalata göre % 27,5 oranında azalma elde edilmiştir.

7.2. İlerideki Çalışmalar

Bu tez çalışmasında ele alınan parametreler, sınırlamalar ve gelecekte üzerinde çalışılabilecek konu önerileri aşağıda verilmiştir.

- Tez çalışmasında aynı malzemedен oluşan yapılar üzerinde çalışılmıştır. Yani ürünü oluşturan tüm parçalar aynı malzeme özelliğine sahiptirler. Gelecekteki çalışmalar için kullanılan metotlarda parçanın malzeme özelliği de eklenerek, farklı malzemelere sahip parçaların konsolidasyonu incelenebilir.
- Bu tez çalışmasında konsolide edilecek parçaları belirlemek için kullanılan yöntem başka çok parçalı yapılara uygulanabilir.
- Tez çalışmasında amaçlanan yöntemdeki girdileri baz alan ve elde edilen matris yapısının çözümünü sağlayan bir ara yüz yazılımı geliştirilebilir.
- Bu tez çalışmasında kaynaklı bağlantılar ve kurulum dışında sökölmesine gerek olmayan kalıcı bağlantılar üzerinde çalışılmıştır. İlerleyen çalışmalarda sökölür-takılır bağlantı tipleri incelenerek, kullanılan konsolidasyon adımları bu doğrultuda şekillendirilebilir.

KAYNAKLAR

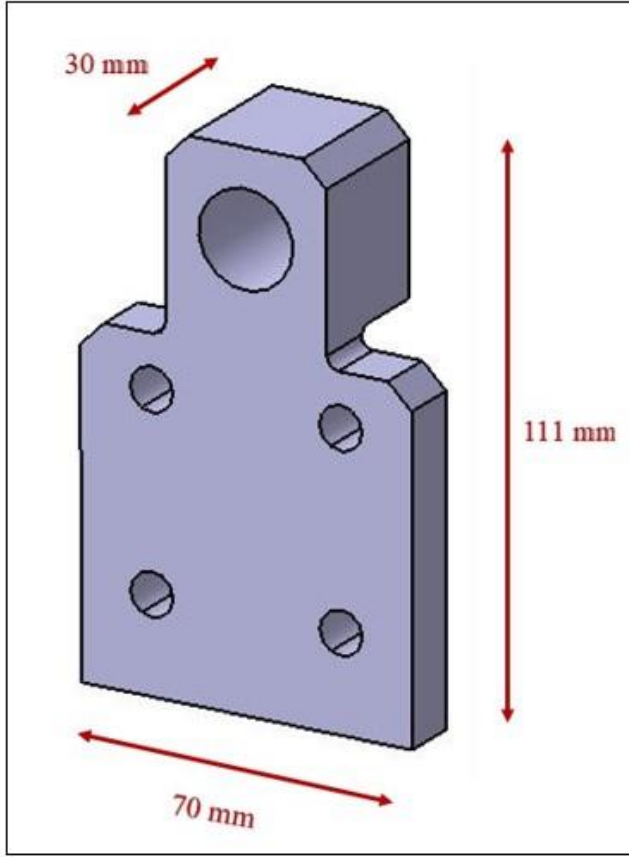
1. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., (2021). Design for additive manufacturing. *Additive manufacturing technologies*, 555-607
2. Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, 78-119.
3. Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1-27).
4. Salem, H., Abouchadi, H., & El Bikri, K. (2020). Design for additive manufacturing. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 10, 3043-3054.
5. Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 60(5), 677-688.
6. Bogue, R. (2013). 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?. *Assembly automation*, 33(4), 307-311.
7. Liu, X. (2017). *Numerical modeling and simulation of selective laser sintering in polymer powder bed*. Doctoral dissertation, Université de Lyon.
8. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ... & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*, 65(2), 737-760.
9. Pham, D. T., Dimov, S. S., (2001). Applications of Rapid Tooling Technology. *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*.
10. D Bourell, D. L. (2016). Perspectives on additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46.-183.
11. Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (2010). *Product design for manufacture and assembly*. London, CRC press.
12. Yang, S., & Zhao, Y. F. (2015). Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 327-342
13. Wiberg, A., Persson, J., & Ölvander, J. (2019). Design for additive manufacturing—a review of available design methods and software. *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), 1080-1094.
14. Becker, R., Grzesiak, A., & Henning, A. (2005). Rethink assembly design. *Assembly automation*, 25(4), 262-266.

15. Ponche, R., Hascoët, J. Y., Kerbrat, O., & Mognol, P. (2012). A new global approach to design for additive manufacturing: A method to obtain a design that meets specifications while optimizing a given additive manufacturing process is presented in this paper. *Virtual and physical prototyping*, 7(2), 93-105.
16. Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J. Y. (2014). A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(4), 389-398.
17. Rosen, D. W. (2014). Research supporting principles for design for additive manufacturing: This paper provides a comprehensive review on current design principles and strategies for AM. *Virtual and physical prototyping*, 9(4), 225-232.
18. Klahn, C., Leutenecker, B., & Meboldt, M. (2015). Design strategies for the process of additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 36, 230-235.
19. Kamal, M., & Rizza, G. (2019). Design for metal additive manufacturing for aerospace applications. In *Additive manufacturing for the aerospace industry*. California, Elsevier, 67-86.
20. Fetisov, K. V., & Maksimov, P. V. (2018, May). Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1015(5), 052006. IOP Publishing.
21. Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology optimization: theory, methods, and applications*. New York, Springer Science & Business Media.
22. Sigmund, O. (2001). A 99 line topology optimization code written in Matlab. *Structural and multidisciplinary optimization*, 21, 120-127.
23. Andreassen, E., Clausen, A., Schevenels, M., Lazarov, B. S., & Sigmund, O. (2011). Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43, 1-16.
24. Yang, S., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2015). A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 444-449.
25. Liu, J. (2016). Guidelines for AM part consolidation. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(2), 133-141.
26. Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P., & Salmi, A. (2010). Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), 308-317.
27. Kim, S., & Moon, S. K. (2020). A part consolidation design method for additive manufacturing based on product disassembly complexity. *Applied Sciences*, 10(3), 1100.
28. Browning, T. R. (2015). Design structure matrix extensions and innovations: a survey and new opportunities. *IEEE Transactions on engineering management*, 63(1), 27-52.

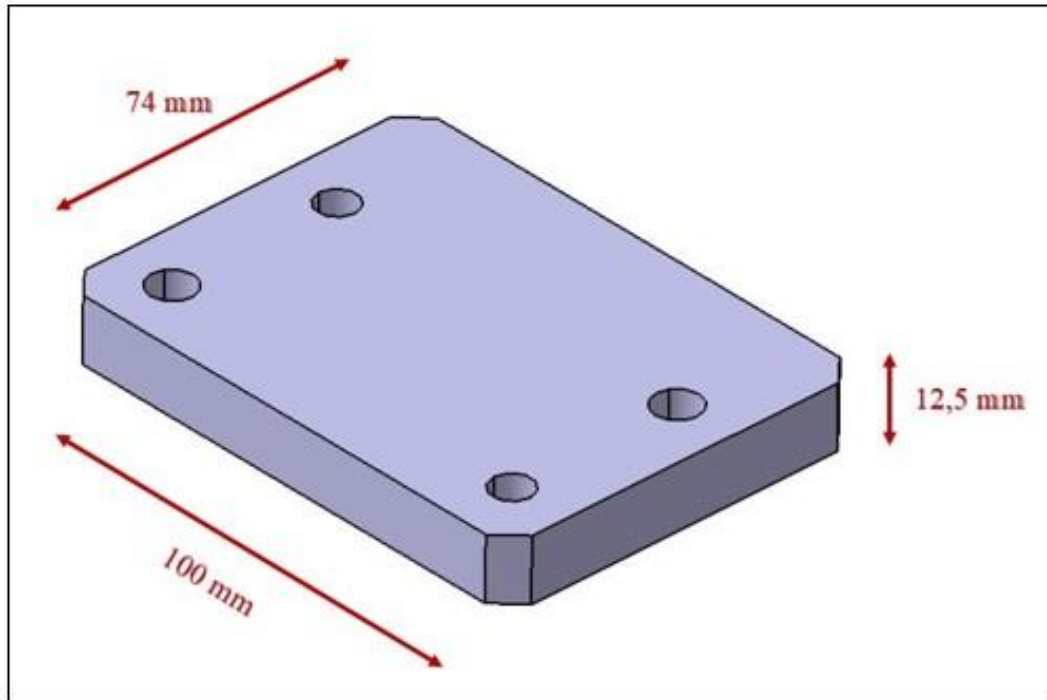
29. Lindahl, M., Sundin, E., Östlin, J., & Björkman, M. (2006). Concepts and definitions for product recovery Analysis and clarification of the terminology used in academia and industry. In *Innovation in life cycle engineering and sustainable development*. Springer Netherlands, 123-138.
30. Kim, S., Moon, S. K., Jeon, S. M., & Oh, H. S. (2016, December). *A disassembly complexity assessment method for sustainable product design*. In 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 1468-1472.
31. Smith, S., Smith, G., & Chen, W. H. (2012). Disassembly sequence structure graphs: An optimal approach for multiple-target selective disassembly sequence planning. *Advanced engineering informatics*, 26(2), 306-316.
32. Kim, S., & Moon, S. K. (2017). *Disassembly Complexity-Driven Module Identification for Additive Manufacturing*. In *Transdisciplinary Engineering: A Paradigm Shift*, 782-789. IOS Press.
33. Ishii, K., Eubanks, C. F., & Di Marco, P. (1994). Design for product retirement and material life-cycle. *Materials & Design*, 15(4), 225-233.
34. Kim, S., & Moon, S. K. (2019). Eco-modular product architecture identification and assessment for product recovery. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 383-403.
35. Voruganti, H. K., Kumar, K. K., Krishina, P. V., & Jin, X. (2020). Advances in Applied Mechanical Engineering. *Measurement*, 433(441), 0.
36. Kim, S. (2017). *Sustainable product family design and a platform strategy*. Doctoral dissertation.
37. Lei, X., Wang, F., Wu, F. X., Zhang, A., & Pedrycz, W. (2016). Protein complex identification through Markov clustering with firefly algorithm on dynamic protein-protein interaction networks. *Information Sciences*, 329, 303-316.
38. Winston, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms*, Canada: Thomson Learning.
39. Van Dongen, S. M. (2000). *Graph clustering by flow simulation*. Ph. D. Thesis, The Netherlands, University of Utrecht.
40. İnternet: Macropol, K. (2009). Clustering on graphs: The markov cluster algorithm. *University of Utrecht: Utrecht, The Netherlands*. URL: <https://www.cs.csi.cuny.edu/~petingi/MCL-Presentation>, Son erişim tarihi: 01 Nisan 2023

EKLER

EK-1. Durum çalışmasını oluşturan parçaların ölçüleri

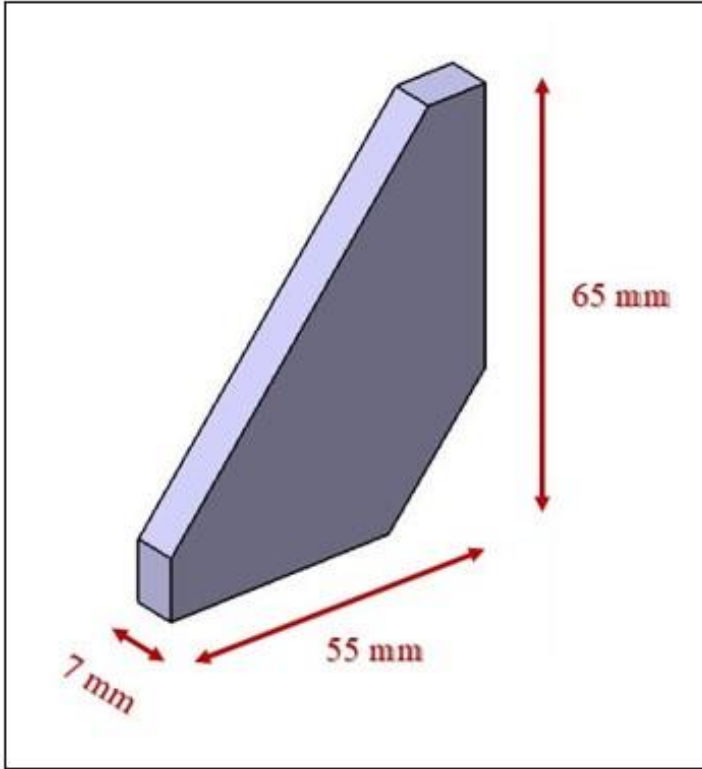


Şekil.3.1. (1) Dikey plaka ölçüleri

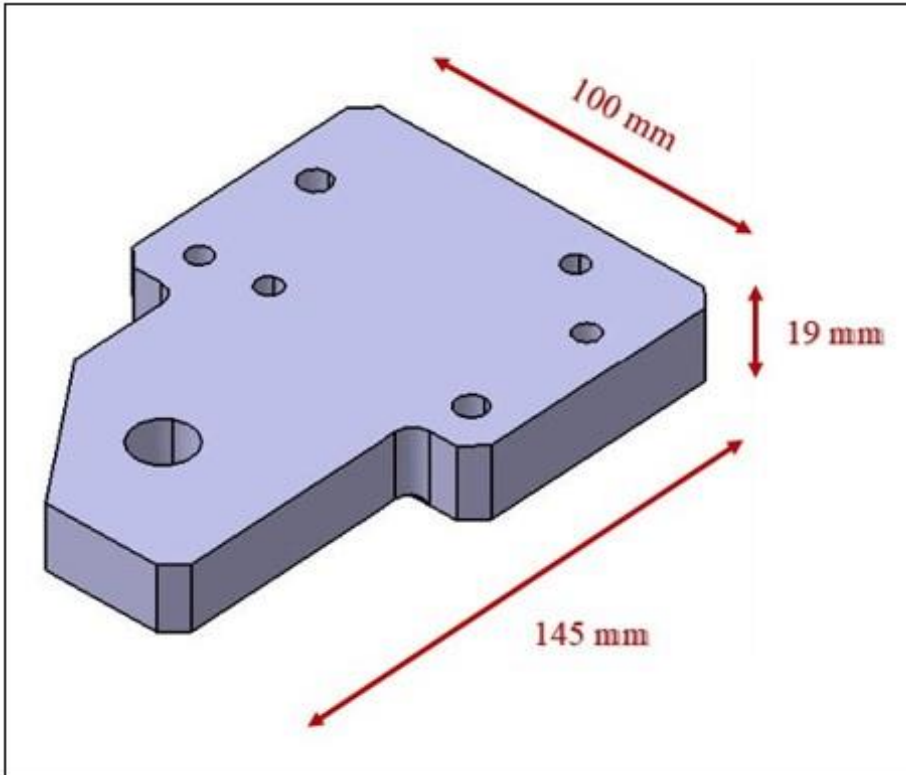


Şekil.3.2. (2) Yatay plaka ölçüleri

EK-1. (devam) Durum çalışmasını oluşturan parçaların ölçüleri

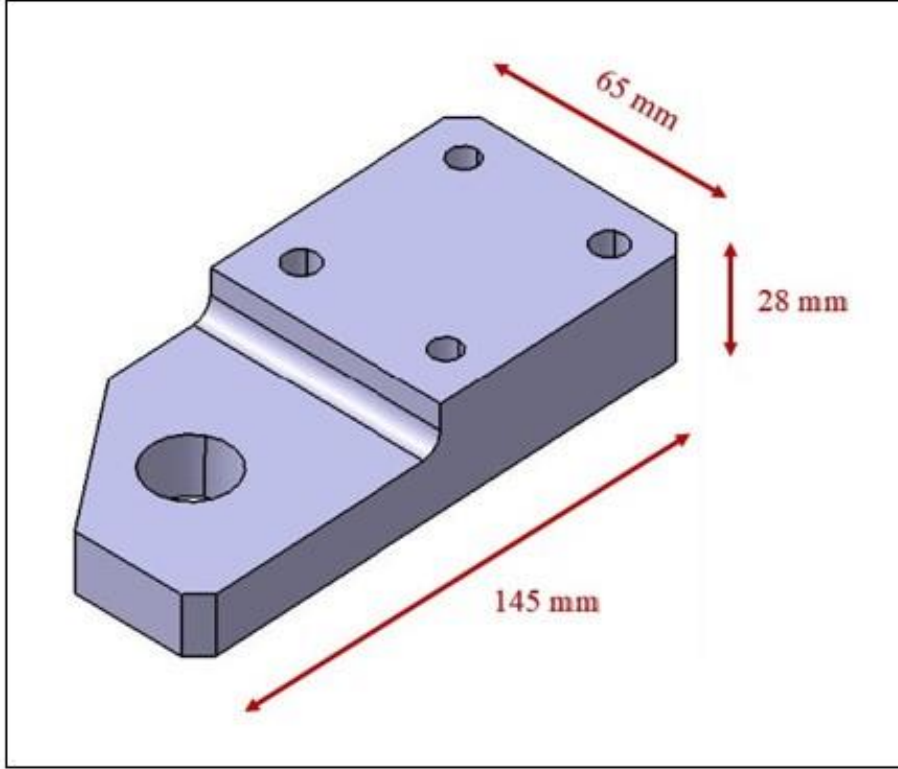


Şekil 3.3. (3) Destek parçası ölçüleri



Şekil 3.4. (4) Pozisyonlayıcı plaka – 1 ölçüleri

EK-1. (devam) Durum çalışmasını oluşturan parçaların ölçüleri



Şekil 3.5. (5) Pozisyonlayıcı plaka – 2 ölçüleri

EK-2. Eklemeli imalat tezgâhlarının genel görünümü



Şekil 5.1. STRATASYS F770 – FDM tezgâhı genel görünümü



Şekil 5.1. SLM 500 - SLM tezgâhı genel görünümü



Gazili olmak ayrıcalıktır