
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HAVA ARACI YAPISALLARINA YÖNELİK ALUMİNYUM ALAŞIMLI BİLEŞENLERİN EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNE UYGUN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ

Onur Uğur TİP

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2023

ETİK BEYAN

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

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

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

Onur Uğur TİP

24/01/2023

HAVA ARACI YAPISALLARINA YÖNELİK ALUMİNYUM ALAŞIMLI BİLEŞENLERİN EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNE UYGUN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Onur Uğur TİP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ); üç boyutlu şekilde hazırlanan bilgisayar destekli tasarımlardan direkt olarak fiziksel modeller elde etmeyi sağlayan imalat teknolojisidir. Eİ teknolojisinin gelişimi, yaratıcı tasarımların en önemli aracı olarak öne çıkan ürün optimizasyonu ve topoloji optimizasyonunun önünü açmıştır. Topoloji optimizasyonu belirli bir yük ve sınır koşulları için tanımlanan tasarım alanında sistem performansını en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bir yapısal optimizasyon metodudur. Topoloji optimizasyonu sonucu ortaya çıkan geometri, Eİ yöntemlerinin uygulanması ile büyük ölçüde tasarıma yansıtılabilmektedir. Havacılık sanayiinde, üretilecek parçaların ağırlıkları çok önemlidir. Topoloji optimizasyonu sonucunda gereksiz olan bölgelerdeki malzemelerin boşaltılması ile optimum ağırlığın sağlanması bu tasarım aracını havacılık endüstrisi için oldukça yararlı kılmaktadır. Bu çalışmada hava aracında kullanılan alüminyum alaşımlı yapısal bir parçanın mevcut yük koşullarını sağlayacak en hafif şekilde yeniden tasarlanması amaçlanmıştır. Parçadaki maksimum hafiflemeyi sağlamak adına, parçaya topoloji optimizasyonun uygulanmasına karar verilmiştir. Topoloji optimizasyonunda kullanılacak parametreleri belirleyebilmek için 15 farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarda sonlu eleman büyüklüğü ile hacim oranı değişiminin model üzerindeki etkileri incelenmiştir ve bunun sonucunda 2 mm eleman büyüklüğü kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, kısıt fonksiyonu olarak hacim oranı ve hedef fonksiyonu olarak da komplians minimizasyonu seçilmiştir. Daha sonra, optimizasyonda tasarım alanı değişikliğinin sonuç üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha büyük tasarım alanı kullanıldığında, organik modellerin oluştuğu görülmüştür. Daha büyük tasarım alanı ve 0,1 hacim oranı kullanılarak yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, nihai model ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, talaşlı imalat ile Al7050 malzeme kullanılarak üretilen eski tasarımın aksine toz yatağı füzyon proseslerinde yaygın şekilde kullanılan AlSi10Mg toz malzeme seçilmiştir. AlSi10Mg tozu, Al7050 malzemeden daha düşük mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen, optimizasyon sonucu ortaya çıkan modelin emniyet katsayısı 1,2 olarak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda, %67'lik bir hafifleme ortaya koyulmuştur.

Bilim Kodu	:	91428
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli imalat, Topoloji optimizasyonu, Hava aracı yapıları, AlSi10Mg
Sayfa Adedi	:	113
Danışman	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

DESIGN, OPTIMIZATION AND ANALYSIS OF AL ALLOY COMPONENTS FOR AIRCRAFT STRUCTURES IN ACCORDANCE WITH ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Onur Uğur TİP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is a technology that allows for the direct creation of physical models from computer-aided designs in three dimensions. The development of AM technology has paved the way for product optimization and topology optimization, which are key tools for creative design. Topology optimization is a structural optimization method that aims to maximize system performance within a defined design space under specific load and boundary conditions. The geometry resulting from topology optimization can be largely reflected in the design through the application of AM methods. In the aviation industry, the weight of the parts to be produced is very important. The elimination of unnecessary material in areas where it is not needed as a result of topology optimization helps to achieve the optimal weight, making this design tool very useful for the aviation industry. In this study, the aim was to redesign an aluminium alloy structural part used in an aircraft to be as lightweight as possible while still meeting the existing load conditions. In order to maximize the weight reduction of the part, a decision was made to apply topology optimization to the part. To determine the parameters to be used in topology optimization, 15 different optimization studies were carried out. In these studies, the effects of changing the finite element size and volume ratio on the model were examined, and a decision was made to use a 2 mm element size. Additionally, the volume ratio was selected as the constraint function, and the minimization of weighted compliance was selected as the target function. The impact of varying the design space on the outcomes was examined and it was observed that organic shapes were produced when a larger design space was employed. The final design was achieved by utilizing a larger design space and a 0.1-volume ratio during the optimization process. In this study, AlSi10Mg powder, a commonly used material in powder bed fusion processes, was selected as the material of choice, as opposed to the previous design which was produced through machined manufacturing using Al7050 material. Despite its lower strength values compared to Al7050, the factor of safety for the optimized model made from AlSi10Mg powder was calculated to be 1.2, resulting in a weight reduction of 67%.

Science Code	:	91428
Key Words	:	Additive manufacturing, Topology optimization, Aircraft structures, AlSi10Mg
Page Number	:	113
Supervisor	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, hatalarımı sabırla düzelten ve hiçbir konuda desteğini esirgemeyen çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan ve benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan canım annem Nurten TİP, değerli babam Şentürk TİP ve sevgili ablalarım Eylem YENİGÜN ile Handan AVŞAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgisini her zaman yanımda hissettiğim, bana inanan ve sürekli destek gösteren sevgilim Burçin ŞÜMÜR'e, analiz çalışmalarım sırasında sabırla sorularıma yanıt veren Buğra KÖKSAL'a, süreç içerisinde beni yalnız bırakmayan Burak GÜNEY'e ve tez çalışmam süresince yanımda olup bana destek veren tüm dostlarıma çok teşekkür ederim.

Son olarak tez dönemim boyunca yardımlarını esirgemeyen iş arkadaşlarıma, ekip liderim Mustafa Batuhan AKINCI'ya ve çalışmama sunduğu değerli katkılardan dolayı Dr. İlhan ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

3. KAVRAMSAL BİLGİLER 37

3.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri 37

3.2. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri 37

3.2.1. Toz yataklı ergitme yöntemleri 38

3.2.2. Seçici lazer ergitme 39

3.3. Yapısal Optimizasyon Metotları 40

3.3.1. Boyut optimizasyonu 41

3.3.2. Şekil optimizasyonu 41

3.3.3. Topoloji optimizasyonu 41

4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ANALİZ 45

4.1. Model Belirleme 45

4.1.1. Mevcut tasarımın sonlu elemanlar ile analizi 46

4.2. Topoloji Optimizasyonu 48

4.2.1. Optimizasyon basamakları 48

4.2.2. Optimizasyon parametrelerinin değerlendirilmesi 52

Sayfa

4.2.3. Yeniden modelleme 55
4.2.4. Model-1'in analizi 57
4.3. Alternatif Topoloji Optimizasyonu-1 66
4.3.1. Optimizasyon basamakları 67
4.3.2. Optimizasyonun değerlendirilmesi 68
4.4. Alternatif Topoloji Optimizasyonu-2 69
4.4.1. Optimizasyon basamakları 69
4.4.2. Optimizasyonun değerlendirilmesi 70
4.5. Alternatif Topoloji Optimizasyonu-3 71
4.5.1. Optimizasyon basamakları 71
4.5.2. Optimizasyonun değerlendirilmesi 72
4.5.3. Yeniden modelleme 73
4.5.4. Model-2'nin analizi 74
4.6. Flanş Et Kalınlıklarının Değerlendirilmesi 81
4.7. Model-2'nin Düzenlenmesi 83
4.7.1. Yeniden modelleme 83
4.7.2. Model-3'ün analizi 84
4.8. Modellerin Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması 91
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 95
5.1. Sonuçlar 95
5.2. Öneriler 96
KAYNAKLAR 99
EKLER 105
EK-1 Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları 106
ÖZGEÇMİŞ 113

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Üretim parametreleri 9

Çizelge 2.2. Test numunelerinden elde edilen yorulma verileri 12

Çizelge 2.3. Talaşlı imalat ve EBM ile üretilmiş numunelerin karşılaştırılması 15

Çizelge 2.4. Tarama aralığı ve tarama hızı kombinasyonları için izafi yoğunluk değerleri 25

Çizelge 2.5. Numunelerin farklı oryantasyonlardaki çekme özellikleri 29

Çizelge 2.6. AlSi10Mg numunelerin gözeneklilik sonuçları: bilgisayarlı tomografi yöntemi (solda) ve Arşimet metodu (sağda) 32

Çizelge 4.1. Konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçanın satın al ve uç oranı 45

Çizelge 4.2. Hava aracı koordinat sistemine göre yük durumları 46

Çizelge 4.3. Mevcut tasarımın statik analiz sonuçları 48

Çizelge 4.4. Modellerde kullanılan eleman büyüklükleri ve eleman sayıları 49

Çizelge 4.5. Hypermesh'de tanımlanan AlSi10Mg malzeme özellikleri 50

Çizelge 4.6. Gerçekleştirilen topoloji optimizasyonlarının parametreleri 52

Çizelge 4.7. Gerçekleştirilen topoloji optimizasyonlarının sonuçları 53

Çizelge 4.8. Model-1'in statik analiz sonuçları 59

Çizelge 4.9. Yük durumu 1 için vidanın emniyet katsayısı 66

Çizelge 4.10. Yük durumu 2 için vidanın emniyet katsayısı 66

Çizelge 4.11. Model-2'nin statik analiz sonuçları 76

Çizelge 4.12. Yük durumu 1 için vidanın emniyet katsayısı 81

Çizelge 4.13. Yük durumu 2 için vidanın emniyet katsayısı 81

Çizelge 4.14. Model-3'ün statik analiz sonuçları 86

Çizelge 4.15. Yük durumu 1 için vidanın emniyet katsayısı 90

Çizelge 4.16. Yük durumu 2 için vidanın emniyet katsayısı 91

Çizelge 4.17. Modellerin karşılaştırılması 93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Motor braketinin topoloji optimizasyonu 3

Şekil 2.2. Parçaların optimizasyon sonuçları 4

Şekil 2.3. Kanat tasarım alanının ve optimizasyon sonucunun kesiti 4

Şekil 2.4. Parçanın üretimi oryantasyonları düz, yan 5

Şekil 2.5. Motor menteşe braketinin optimizasyonu 6

Şekil 2.6. Uydu parçalarının optimizasyonu 7

Şekil 2.7. Ölçüm sonuçları renk gradyanı 7

Şekil 2.8. Yapısal braketin optimizasyonu 8

Şekil 2.9. a) EBM numunesi ve yüzey pürüzlülüğü, b) SLE numuenesi ve yüzey pürüzlülüğü 8

Şekil 2.10. Optimizasyon akış şeması 9

Şekil 2.11. Kontrol kolunun topoloji optimizasyonu 10

Şekil 2.12. Parçanın kısıtları ve yük dağılımı 10

Şekil 2.13. İnşa yönünün destek elemanlara etkisi 11

Şekil 2.14. Alt süspansiyon kolunun optimizasyonu 11

Şekil 2.15. Modellerin sonlu elemanlar analizleri ve FDM ile üretilen numuneleri 12

Şekil 2.16. Optimizasyon sonucu ortaya çıkan modellerin karşılaştırılması 13

Şekil 2.17. Ana braket (koyu yeşil) ve diğer braket (kahverengi) 13

Şekil 2.18. Braketin fonksiyonel yüzeyleri ve üretilmiş numuneler 14

Şekil 2.19. Tekerlek mafsalının optimizasyonu 15

Şekil 2.20. Braketin optimizasyonu 16

Şekil 2.21. Metrolojik test sonucu 16

Şekil 2.22. Motor takviye şasisinin optimizasyonu 17

Şekil 2.23. Airbus A350 XWB kablo hattı komponenti 18

Şekil 2.24. Ruag gözetleme uydusu anten braketi 18

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.25. Çıkıntı açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 20

Şekil 2.26. Altair Optistruct yazılımında topoloji optimizasyonu örnekleri 20

Şekil 2.27. Mikro yapısal kusurlar 20

Şekil 2.28. Numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması 21

Şekil 2.29. Kritik çıkıntı açısı ve direk çapı 22

Şekil 2.30. Çevrelenmiş boşluklardan kaçınmaya yönelik yaklaşım 22

Şekil 2.31. Ağaç benzeri destek yapılar 23

Şekil 2.32. a) destek ihtiyacı olan yapı, b) kendini destekleyen yapı 23

Şekil 2.33. LEAP motorunun eklemeli imalat ile üretilen yakıt nozülü 24

Şekil 2.34. Tarama aralığı değişiminin izafi yoğunluk ve gözeneklilik üzerindeki etkisi 25

Şekil 2.35. Eşnerji yoğunluğuna karşı gözeneklilik değişimi 27

Şekil 2.36. a) Numunelerin izafi yoğunluğu, b) Yüksek tarama hızlarındaki sonuçların sınıflandırılması 28

Şekil 2.37. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 28

Şekil 2.38. Çalışmada kullanılan numuneler 29

Şekil 2.39. Numunelerin kopma gerilmesi, akma gerilmesi ve Young modülü değerleri 30

Şekil 2.40. a) Solda düşük gözeneklilik, sağda ise yüksek gözeneklilik içeren numunelerin gözenekliliklerinin hacimsel gösterimleri, b) Numunelerin iç yapılarının bilgisayarlı tomografi görüntüleri 31

Şekil 2.41. Gözenek boyutu dağılım histogramı 33

Şekil 2.42. Üstte en yoğun, altta en düşük yoğunluktaki numunelerin gözeneklerinin Mikro-BT ile gösterimi 34

Şekil 2.43. Farklı parametrelere göre lazer enerji yoğunluğu ve malzeme yoğunluğunun değişimi 35

Şekil 2.44. Küresel gaz gözeneği ve düzensiz şekilli füzyon kusuru örnekleri 35

Şekil 3.1. Metal eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması 38

Şekil 3.2. SLE prosesi 40

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.3. Yapısal optimizasyon türleri 41

Şekil 4.1. Konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçanın boyutları ve imalat öncesi zarf boyutları 45

Şekil 4.2. Parçanın Hyperworks programında oluşturulan analiz modeli 47

Şekil 4.3. Mevcut tasarımın Von Mises gerilme dağılımı 47

Şekil 4.4. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan 49

Şekil 4.5. Hypermesh programında bulunan optimizasyon paneli 50

Şekil 4.6. 2 mm sonlu eleman büyüklüğü olan modelin tasarım değişkeninin tanımlanması 51

Şekil 4.7. Cevap fonksiyonlarının tanımlanması 51

Şekil 4.8. a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı 53

Şekil 4.9. Sonlu eleman büyüklüğü ve hacim oranı değişiminin Von Mises gerilmelerine etkisi 54

Şekil 4.10. Sonlu eleman büyüklüğü ve hacim oranı değişiminin toplam hacme etkisi 54

Şekil 4.11. Parçanın yoğunluk değerleri 56

Şekil 4.12. Parçanın yeniden modellenmesi 56

Şekil 4.13. Parça ve bağlayıcılarının kopma gösterimleri 57

Şekil 4.14. Model-1'in Hyperworks programında oluşturulan analiz modeli 58

Şekil 4.15. Model-1'in Von Mises gerilme dağılımı 58

Şekil 4.16. Çekme gerilmesi kritik malzemenin ve akma gerilmesi kritik malzemenin gerilme gerinim eğrileri 59

Şekil 4.17. Yük 2'nin parçaya uygulanması 60

Şekil 4.18. Kulak kopma tipleri 60

Şekil 4.19. Çekme dayanımının kesit alanı 61

Şekil 4.20. Koparma dayanımı ve kesit alanı 62

Şekil 4.21. Taşıma mukavemetine etki eden kesme gerilmeleri 63

Şekil 4.22. Bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri 63

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.23. Yük koşulu 2 için bağlayıcı merkezlerinde oluşan çekme kuvvetleri 65
Şekil 4.24. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan 67
Şekil 4.25. Optimizasyon modelleri 68
Şekil 4.26. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan 69
Şekil 4.27. 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli 70
Şekil 4.28. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan 71
Şekil 4.29. Optimizasyon modelleri 72
Şekil 4.30. Yüzeyleri düzenlenmiş modeller 73
Şekil 4.31. Parçanın yeniden modellenmesi 74
Şekil 4.32. Model-2'nin sonlu elemanlar modeli 75
Şekil 4.33. Model-2'nin Von Mises gerilme dağılımı 75
Şekil 4.34. Yük durumu 2'nin parçaya uygulanması 76
Şekil 4.35. Çekme dayanımının kesit alanı 77
Şekil 4.36. Koparma dayanımı ve kesit alanı 78
Şekil 4.37. Bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri 78
Şekil 4.38. Yük koşulu 2 için bağlayıcı merkezlerinde oluşan çekme kuvvetleri 80
Şekil 4.39. Flanş et kalınlılarının değişimi 82
Şekil 4.40. Farklı et kalınlıklarındaki Von Mises gerilme dağılımları 82
Şekil 4.41. Flanş et kalınlığı değişiminin Von Mises gerilmelerine etkisi 83
Şekil 4.42. Flanş et kalınlığı değişiminin ağırlığa etkisi 83
Şekil 4.43. Model 3 84
Şekil 4.44. Model-3'ün sonlu elemanlar modeli 85
Şekil 4.45. Model-3'ün Von Mises gerilme dağılımı 85
Şekil 4.46. Model-3'ün Von Mises gerilme dağılımı 86
Şekil 4.47. Çekme dayanımının kesit alanı 87
Şekil 4.48. Bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri 88

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.49. Yük koşulu 2 için bağlayıcı merkezlerinde oluşan çekme kuvvetleri 90

Şekil 4.50. Optimizasyon bitiş şeması 92

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
$\boldsymbol{cm^3}$	Santimetreküp
°	Derece
°C	Derece santigrat
E	Elastisite modülü
g	Gram
kg	Kilogram
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
P	Yük
r	Yarıçap
t	Et kalınlığı
V	Kesme Kuvveti
W	Vat
µm	Mikrometre
ρ	Yoğunluk
σ	Gerilme

Kısaltmalar	Açıklamalar
cm^3	Santimetreküp
3B	Üç boyutlu
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
DfAM	Eklemeli imalat için tasarım (Design for Additive Manufacturing)

Kısaltmalar	Açıklamalar
DMLS	Doğrudan metal lazer sinterleme (Direct metal laser sintering)
EBM	Elektron ışın ergitme
EK	Emniyet katsayısı
EOS	Elektro Optik Sistemler (Electro Optical Systems)
FDM	Erimiş Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Modelling)
GE	General Electric
MPa	Megapascal
SIMP	Cezalandırılmış Katı İzotropik Malzeme (Solid Isotropic Material with Penalization)
SLE	Seçici lazer ergitme
SLS	Seçici lazer sinterleme
STL	Stereolitografi

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ); üç boyutlu şekilde hazırlanan bilgisayar destekli tasarımlardan direkt olarak fiziksel modeller elde etmeyi sağlayan imalat teknolojisidir. Karmaşık yapılı tasarımların üretilebilirliğini sağlaması, parçaların üretiminde kalıp gereksinimini ortadan kaldırması, çok parçalı yapıların bütünleşik olarak üretimine imkan sağlaması ve parçaların üretim süresini kısaltması gibi avantajlar Eİ teknolojisinin öne çıkmasını sağlamıştır [1]. Bunun yanında, geleneksel üretim yöntemlerinin getirdiği kısıtları ortadan kaldırması sonucunda tasarımcıya daha fazla özgürlük sağlamaktadır.

Eİ teknolojisinin gelişimi, yaratıcı tasarımların önemli bir aracı olarak öne çıkan ürün optimizasyonu ve topoloji optimizasyonunun önünü açmıştır. Topoloji optimizasyonu, belirli bir yük ve sınır koşulları altında tasarım alanındaki sistem performansını en üst düzeye çıkarmak için kullanılan bir yapısal optimizasyon metodudur. Bu metot, model üzerinde en iyi malzeme dağılımını bulmak ve gereksiz bölgelerdeki malzemeleri boşaltarak optimum ağırlığa ulaşmak amacıyla kullanılır. Topoloji optimizasyonu sonucu ortaya çıkan geometriden alınacak maksimum performans ise Eİ yöntemlerinin uygulanması ile sağlanmaktadır. Bu yöntemler sayesinde optimizasyon sonucu büyük ölçüde nihai tasarıma yansıtılabilmektedir.

Havacılık sanayiinde üretilecek parçaların ağırlıkları çok önemlidir. Topoloji optimizasyonu sayesinde gereksiz bölgelerdeki malzemelerin boşaltılması ile optimum ağırlığın sağlanması bu tasarım aracını havacılık endüstrisi için oldukça yararlı kılmaktadır. Buna ilave olarak Eİ metotları geleneksel imalat yöntemlerine göre çok daha az artık malzeme çıkararak düşük satın al ve uç oranına sahiptirler. Bu oranın düşük olması da havacılık ve uzay alanında kullanılan pahalı hammaddelerin daha az harcanarak üretim maliyetlerinin düşürülmesini sağlamaktadır.

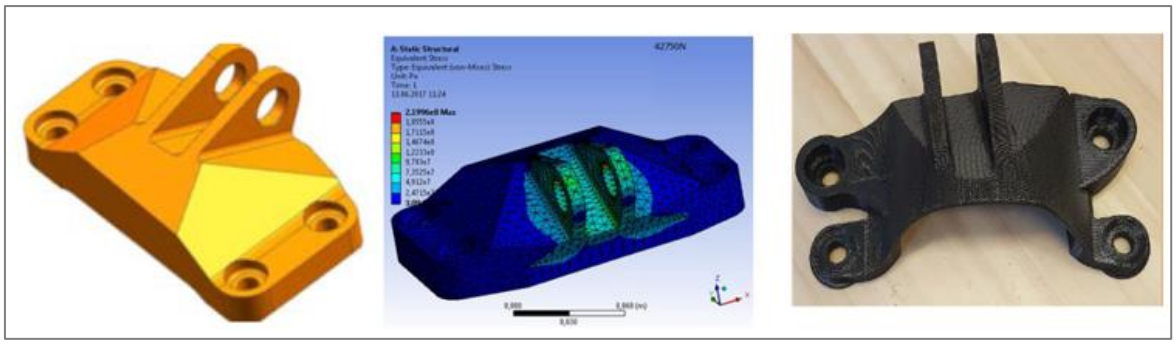
Bu çalışmada, hava araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlı yapısal bir parçanın eklemeli imalat yöntemlerine göre bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi kullanılarak topoloji optimizasyonu metodu ile yeniden tasarlanması amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında hedeflenen öğeler aşağıda belirtilmiştir:

- Hava aracı parçalarının eklemeli imalata uygun tasarımlarının topoloji optimizasyonu ile yapılması
- Optimizasyon sonucunda oluşan modellerin mevcut yük koşulları altında sonlu elemanlar analizinin yapılması
- Optimizasyon sonucunda oluşan modellerin mevcut yük koşulları altında emniyetli olup olmadığının kopma tipleri bakımından kontrol edilmesi
- Parçanın ideal geometriye ulaştırılması
- Çalışma sonucunda elde edilen modellerle orijinal modelin karşılaştırılması

Bu tez çalışması giriş, literatür özeti, kavramsal bilgiler, topoloji optimizasyonu ve analiz, sonuçlar ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Literatür özeti başlığında metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Kavramsal bilgiler başlığında metal eklemeli imalat yöntemlerinden ve yapısal optimizasyon metotlarından bahsedilmiştir. Topoloji optimizasyonu ve analiz bölümünde ise çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm analizler ve çıkan veriler paylaşılmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde ise bu çalışmanın sonuçları özetlenmiş ve ileride yapılacak çalışmalara öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

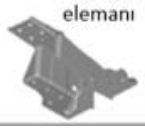
Gebisa ve Lemu'nun jet motoru braketine uyguladıkları topoloji optimizasyonu Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Orijinal parçanın 4 farklı yüklenme koşulunda Von Mises yük dağılımları incelenmiştir. Sonlu elemanlar modeli için Altair Hypermesh, çözücü ve optimizasyon içinse Optistruct tercih edilmiştir. Gerilme dağılımında mavi alanların çok büyük alan kaplamasının hammaddenin verimsiz kullanıldığına işaret ettiği belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonunun kısıt fonksiyonu olarak kütleyi %70 düşürmek ve et kalınlığını minimum 1,13 mm tutmak belirlenmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucu ortaya çıkan geometri kaba ve estetik olmadığı için Inventor programında parça yeniden modellenmiştir. Son tasarımın emniyet katsayısı değerlerinin 1,11 ile 2,17 arasında olduğu ve parçanın %65 hafiflediği ortaya koyulmuştur [2].



Şekil 2.1. Motor braketinin topoloji optimizasyonu [2]

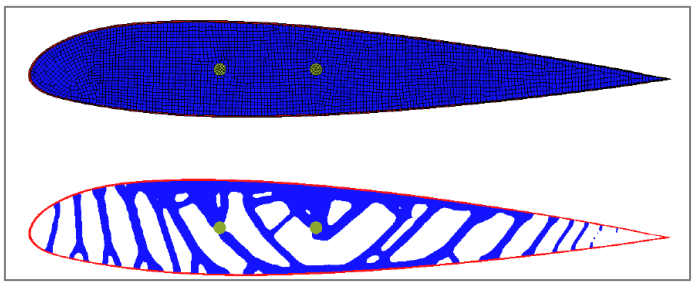
Berrocal ve diğerleri havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılan 3 parçaya topoloji optimizasyonu uygulayarak eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesine yönelik çalışmışlardır. Referans için ilk modele sonlu elemanlar analizi uygulamanın optimize edilmiş bileşenin sonlu elemanlar analizi sonucunu doğrulama kısmında gerekli olduğunun üzerinde durmuşlardır. İlk parça olan konektör destek komponenti 4 parçadan oluşmaktadır ve geometrisinde yapılan düzenlemeler kapsamında iki ayrı konfigürasyona topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. AlSi10Mg toz kullanılan parçada ilk konfigürasyonda %57, ikinci konfigürasyonda ise %63 ağırlık azaldığı ortaya koyulmuştur. Bir diğer parça ise sivil uçakta kullanılan tipik bir kapı koludur. Bu parçada AlSi10Mg toz kullanılmıştır ve optimizasyon sonucunda parçada 56 g hafifleme meydana gelmiştir. Yazarların bu çalışmada incelediği son parça ise bir muhafaza elemanıdır. Titanyum malzeme kullanılan bu parçanın

optimizasyon sonucu %20 hafiflediği ifade edilmiştir. Yazarların gerçekleştirdiği çalışmanın sonuçları Şekil 2.2'de özetlenmiştir [3].

Parçalar	Orijinal ağırlık	İlk modelin kaç parçadan oluştuğu	Son ağırlık	Ağırlık değişimi (%)
Konektör destek parçası 	453	4	197 	57
			168 	63
Kapı kolu 	176	1	121 	32
Muhafaza elemanı 	745	1	600 	19

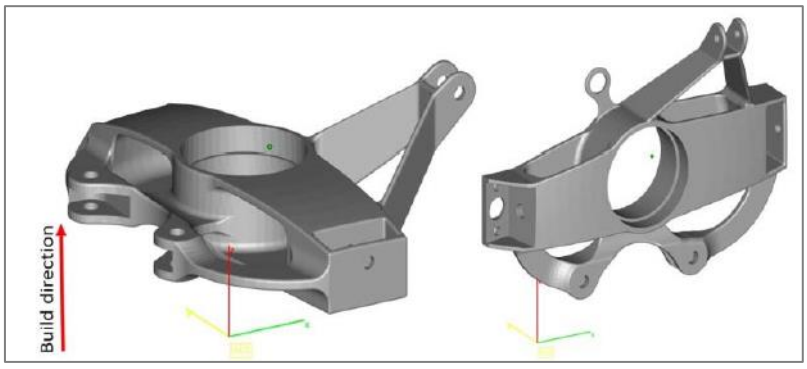
Şekil 2.2. Parçaların optimizasyon sonuçları [3]

Walker, Liu, ve Jennings tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada bir insansız hava aracının kanadına topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Parçanın analizi Altair Optistruct programında yapılmıştır. Hedef fonksiyonu olarak kompliansı minimum yapmak tanımlanırken, kısıt fonksiyonu olarak hacim oranı belirlenmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucunda yoğunluğun %50 ve üzerinde olduğu bölgeler katı kabul edilmiştir. Optimizasyon sonucu katı model elde etmek için meş datayı yüzeylere çeviren Altair'in Ossmooth modülü kullanılmıştır. Optimizasyonun sonucu Şekil 2.3'de verilmiştir [4].



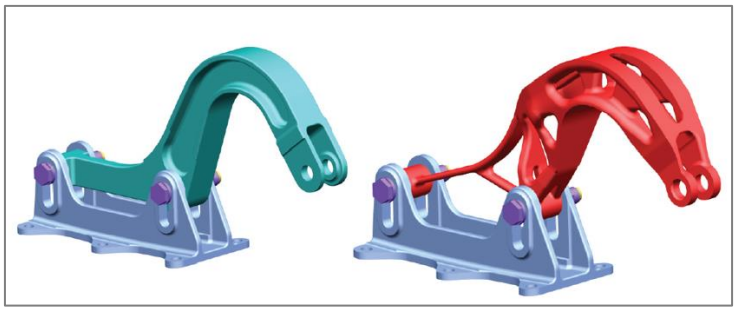
Şekil 2.3. Kanat tasarım alanının ve optimizasyon sonucunun kesiti [4]

Reddy ve diğerleri tarafından EOS M80 toz yataklı DMLS tezgahı kullanılarak Ti6Al4V tozu ile Formula aracında kullanılan bir parçanın optimizasyonu ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Destek elemanlar için Magics yazılımı kullanılmıştır. Parçanın destek elemanları Şekil 2.4'de verilen iki ayrı üretim oryantasyonu için oluşturulmuştur. Yan oryantasyonda, düz oryantasyonda kullanılan destek yapıların yarısından daha az kullanıldığı ve yan oryantasyonda kullanılan desteklerin parçadan daha rahat sökülebileceği ortaya koyulmuştur. Bu kapsamda parçanın üretimi için yan oryantasyon seçilmiştir. Parçanın analizi ve optimizasyon için SIMP algoritmasıyla çalışan Optistruct kullanılmıştır. Kompliansı enküçüklemek hedef fonksiyonu olarak tanımlanırken, %20 hacim oranı ise kısıt fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Üretim süresinin yarısından fazlasının destek elemanları oluşturmak için harcanacağının üzerinde durulmuştur. Harcanan malzemeyi azaltmak ve üretim süresini kısaltmak için DfAM (Eklemeli imalat için tasarım) esaslarını uygulayarak yeni bir tasarım oluşturmanın gerekliliği ortaya koyulmuştur. DfAM kuralları doğrultusunda tekrar modifiye edilen parçanın destek yapıları %91,7 azalırken, maliyeti de %51,7 ucuzlamıştır. Öte yandan parçanın ağırlığının %16,8 arttığı ifade edilmiştir [5].



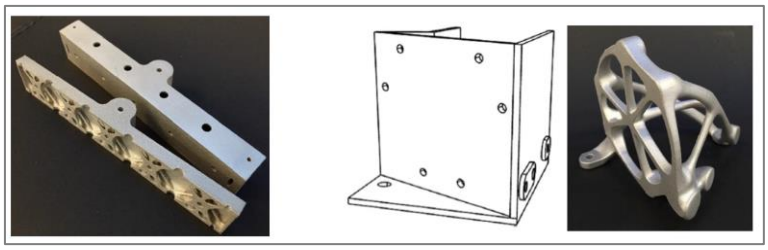
Şekil 2.4. Parçanın üretimi oryantasyonları düz, yan [5]

Dubrovskaya, Dongauzer ve Faskhutdinov tarafından gerçekleştirilen çalışmada yolcu uçaklarında kullanılan tipik bir motor menteşe braketine topoloji optimizasyonu uygulanmıştır ve 98 g'lık kütle kazancı elde edilmiştir. Parçanın analizi Ansys ortamında yapılmıştır ve ağırlık kazancının yanı sıra Von Mises gerilmeleri bakımından %34,35 daha az gerilmeye maruz kalan bir geometri ortaya çıkarılmıştır. Bu geometri Şekil 2.5'de paylaşılmıştır. Hava araçlarında çok az ağırlık kazanılmasının bile önemli ölçüde yakıt tasarrufu ve sera gazı emisyonu azalmasını sağlayacağının üzerinde durulmuştur [6].

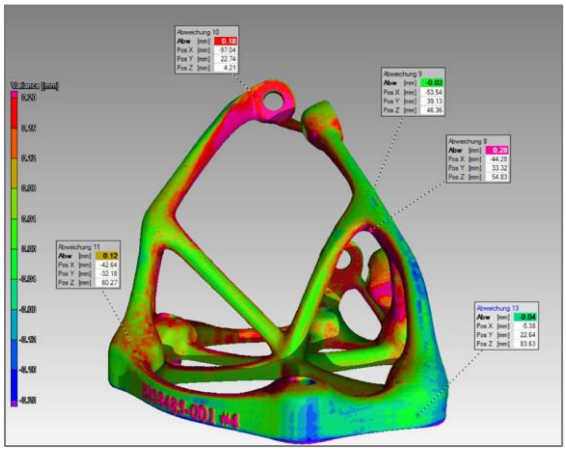


Şekil 2.5. Motor menteşe braketinin optimizasyonu [6]

Orme ve diğerleri tarafından sunulan çalışmada uydu parçalarının optimizasyonu, imalatı, test ve muayeneleri yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan parçalar Şekil 2.6'da paylaşılmıştır. Havacılık ve uzay parçalarında ağırlık azaltmanın maliyete etkisinden bahsedilmiştir. 700 uçaklık bir filo için 453 g ağırlık azaltmanın senelik yaklaşık 53000 litrelik bir yakıt tasarrufu oluşturacağının bilgisi paylaşılmıştır. Buna ek olarak geleneksel imalat ile işlenen havacılık parçalarının satın al ve uç oranının 12 ile 25 arasında olduğunun, eklemeli imalat ile üretilen parçalarda ise bu oranın 1,5'e kadar indirilebildiğinden bahsedilmiştir. Uydu parçaların üretimi AlSi10Mg tozu ile EOS M290 DMLS cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optistruct yazılımında optimizasyon tamamlandıktan sonra parçanın yeniden modellenmesi Altair Inspire programındaki PolyNURBS araçları ile yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile çekme testinde kullanılan numunelerin kırılma yüzeyleri incelenmiştir ve kırılmaların gözeneklilik veya ergimemiş tozlardan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Buna ek olarak gözenekler için minimum hata kriteri 150 μm olarak belirlenmiştir. Bilgisayarlı tomografi ile yapılan mikro yapı incelemesinde gözeneklerin 30-70 μm arasında olduğu ve bu kapsamda bu kriteri sağladığı ortaya koyulmuştur. Bunun yanında bilgisayarlı tomografi sonucu sağlanan veri ile CAD verisinin karşılaştırılması yapılmıştır. Parçanın üretim yönüne göre aşağı bakan yüzeyinin daha az sapma gösterme eğilimde olduğu ifade edilmiştir. Bu durum parçanın aşağı bakan yüzeylerinin ergimemiş toz ile temasta olması ve parçanın aşağı ve yukarı bakan yüzeylerinin ısı transferlerinin farklı olması ile açıklanmıştır. Parçadaki maksimum sapmanın 280 μm olduğu Şekil 2.7'de gösterilmiştir ve bu değerin tolerans sınırları içerisinde olduğunun bilgisi verilmiştir [7].

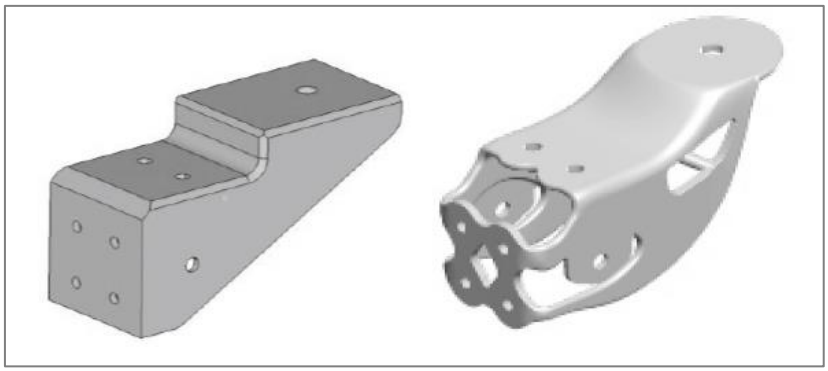


Şekil 2.6. Uydu parçalarının optimizasyonu [7]

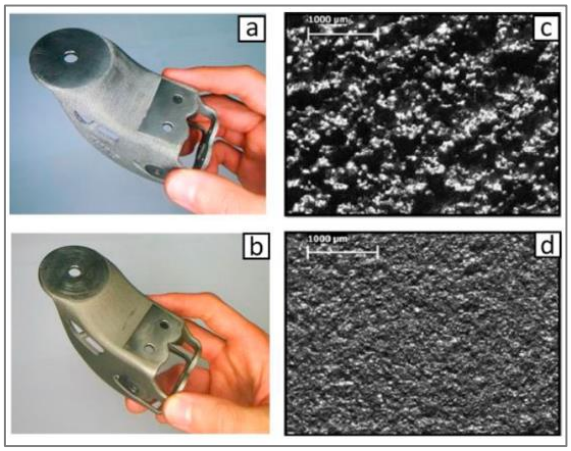


Şekil 2.7. Ölçüm sonuçları renk gradyanı [7]

Brusa, Sesana ve Ossola havacılık uygulamalarında kullanılan yapısal brakete topoloji optimizasyonu uygulamışlardır. Şekil 2.8'de gösterilen optimizasyon sonucu %20 hafifleyen braket, hem SLE hem de EBM metodu ile üretilmiştir. Gözle muayene sonucunda SLE metodu ile üretilen parçanın yüzeyinin EBM metodu ile kıyaslandığında daha pürüzsüz olduğu Şekil 2.9'da görülmektedir. Parçaların gözeneklerini ve düşük yoğunluklu bölgelerini sınıflandırmak adına parçalara tomografik muayene uygulanmıştır. SLE ile üretilen numunede çok az sayıda düşük yoğunluklu alan ve sadece bir adet gözenek saptanmıştır. EBM ile üretilen brakette ise çok sayıda kusur tespit edilmiştir. Tomografi analizi sonucunda yapılan boyutsal doğrulama kısmında ise SLE numunesinde bazı çarpılmalardan bahsedilmiştir. EBM numunesinde ise bu durumla karşılaşılmadığı belirtilmiştir. Yazalar bu durumun nedeni olarak SLE metodunda ortaya çıkan yüksek sıcaklık gradyanlarını göstermişlerdir. Parçalara uygulanan yorulma testleri sonucunda SLE numunesi 1000000 çevrimde henüz kırılmazken EBM numunesinin 729000 çevriminde kırıldığından bahsedilmiştir. Bu kapsamda SLE ile üretilen parçanın daha iyi yorulma performansı gösterdiği ortaya koyulmuştur [8].



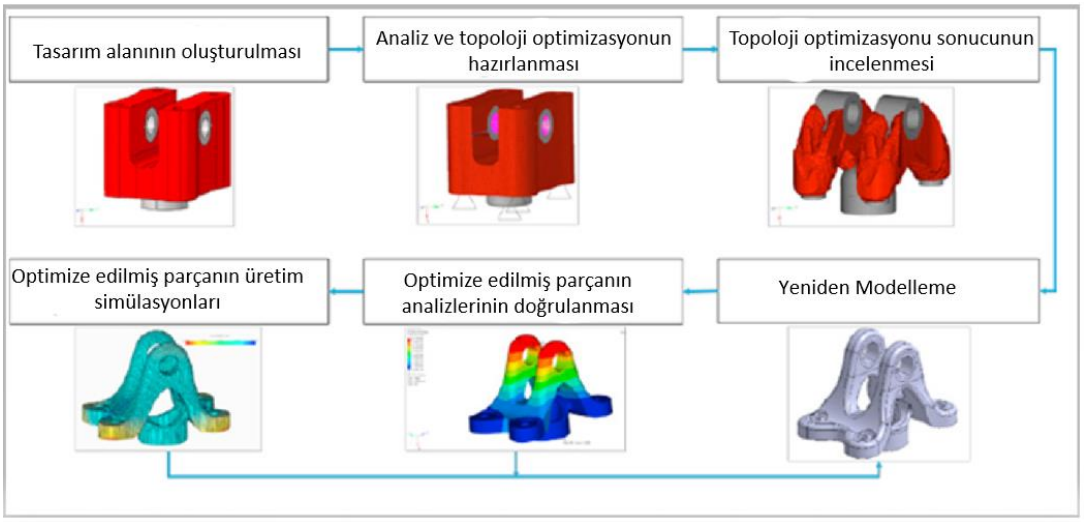
Şekil 2.8. Yapısal braketin optimizasyonu [8]



Şekil 2.9. a) EBM numunesi ve yüzey pürüzlülüğü, b) SLE numuenesi ve yüzey pürüzlülüğü

Dagkolu, Gokdag ve Yilmaz tarafından gerçekleştirilen çalışmada yorulma açısından kritik havacılık parçalarının eklemeli imalata yönelik olarak tasarım metodolojisi ortaya koyulmuştur. Numunelerin ve optimize edilmiş parçanın lazer ile toz yatağı füzyon prosesi kullanılarak Ti6Al4V tozu ile üretildiği paylaşılmıştır. Çalışmada sunulan optimizasyonun akış şeması Şekil 2.10'da paylaşılmıştır. Topoloji optimizasyonunda çözüm yaklaşımı olarak SIMP (Solid Stropic Material with Penalization) metodunun uygulandığı Optistruct yazılımının kullanıldığı aktarılmıştır. Parçanın optimizasyonunun tamamlanmasının ardından Autodesk Netfabb yazılımı ile üretim simülasyonlarının gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Simülasyon sırasında üretim tablasının 200°C'de sabit tutulduğu belirtilmiştir. Simülasyonlar sonucunda parçada 0,8 mm ısıl deformasyon ortaya çıkabileceği öngörülmüştür. Üretim parametreleri olarak tezgah tedarikçisinin sağlamış olduğu standart değerler Çizelge 2.1'de verilmiştir. Üretimi tamamlanan parçanın, tabladan ayrılmadan önce ısıtılarak gerilimin giderilmesinin sağlandığı aktarılmıştır. Parçalara 800°C'de 2 saat argon atmosferinde ısıl işlem uygulandığından bahsedilmiştir. Ardından parçalara 900°C ve 1000

Bar koşullarında sıcak izostatik presleme uygulandığı belirtilmiştir. Bu işlemin parçayı tam yoğunluğa ulaştırmak için uygulandığından bahsetmişlerdir. Son olarak optimize edilmiş parçanın bağlantı yüzeylerinde gerekli toleransın sağlanabilmesi için parçanın ilgili yüzeylerinin işlenmesinin gerektiği belirtilmiş. Yazarlar, optimize edilmiş parçanın %45 hafiflediğini ve mekanik dayanım isterlerini sağlandığını ortaya koymuşlardır [9].

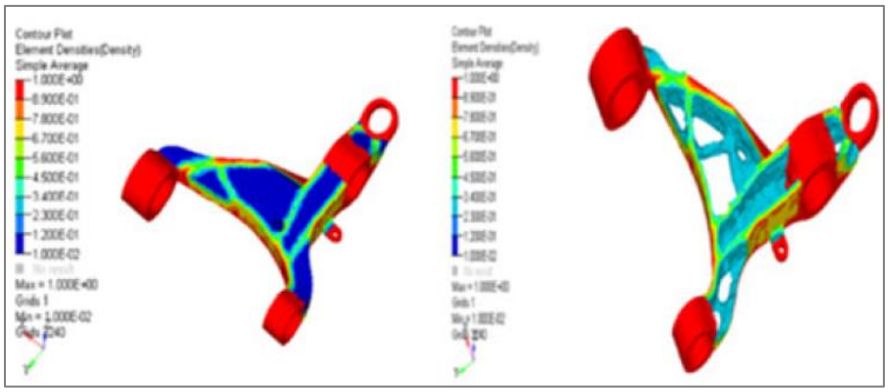


Şekil 2.10. Optimizasyon akış şeması [9]

Çizelge 2.1. Üretim parametreleri [9]

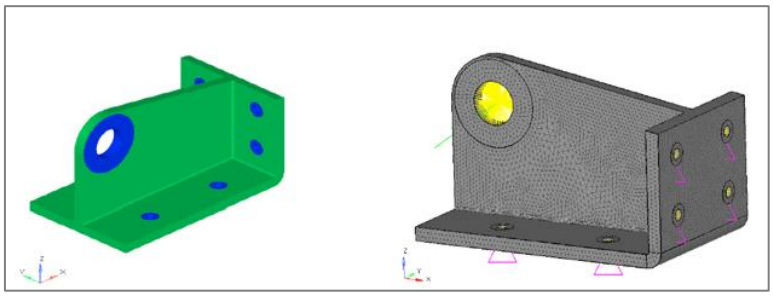
Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)
170	1250	0,015	0,03

Viqaruddin ve Ramana Reddy alüminyum kontrol kolu parçasına topoloji optimizasyonu uygulamışlardır. Meşleme işlemini Hypermesh yazılımdan 10 mm minimum boyutlarda olan tetrahedral elemanlarla gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.11'de paylaşılan topoloji optimizasyonu sonucunda parçanın ağırlığının 19,62 kg'dan 11,42 kg'a düştüğü ortaya koyulmuştur [10].

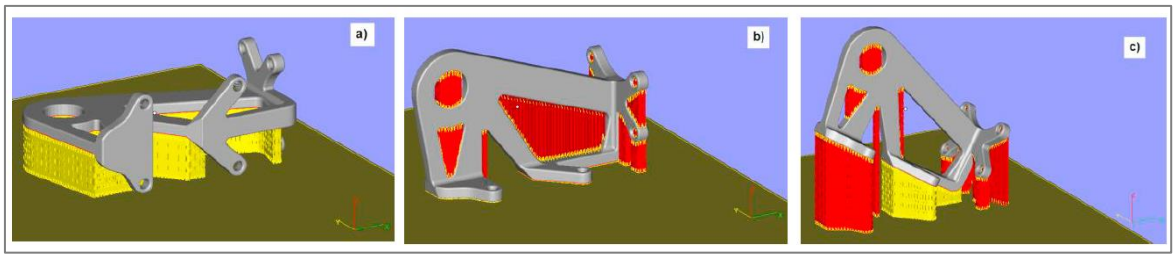


Şekil 2.11. Kontrol kolunun topoloji optimizasyonu [10]

Silva ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada hava aracı kapısı destek parçasına eklemeli imalata yönelik olarak topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Parçanın malzemesinin 7075-T6 alüminyum alaşımı olduğu belirtilmiştir. Parçanın orijinal hali için iki ayrı yük koşulunda oluşan maksimum Von Mises stres değerleri paylaşılmıştır. A koşulunda parça x ekseninde 4500 N ve z ekseninde 2500 N yüklenirken, b koşulunda x ekseninde 4000 N ve z ekseninde 3000 N yüklenmektedir. Bu yük koşullarında A'da maksimum Von Mises gerilmesinin 113,27 MPa, B'de ise 436,73 MPa olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.12'de, parçadaki yeşil bölgelerde optimizasyona giren tasarım alanı, mavi bölgelerde ise optimizasyona sokulmayan tasarım dışı alan gösterilmiştir. Bu çalışmada tasarım dışı alanların sınırlarının, deliğin iki katı olarak uygulandığı belirtilmiştir. Ek olarak parçaya uygulanan yükün doğrultusu ve parçanın sabitleme noktaları da paylaşılmıştır. Optimizasyonu tamamlanan parçanın, Şekil 2.13'de verilen oryantasyonları için üretim simülasyonları yapılmıştır. En çok destek eleman ihtiyacının c'de, daha sonra a'da, en az da b'de oluştuğu ortaya koyulmuş ve bu kapsamda en uygun inşa yönü olarak dikey oryantasyon seçilmiştir [11].

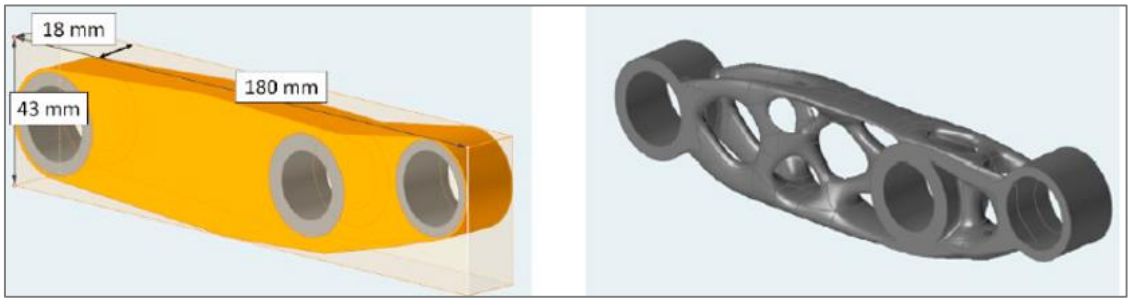


Şekil 2.12. Parçanın kısıtları ve yük dağılımı [11]



Şekil 2.13. İnşa yönünün destek elemanlara etkisi a) yatay, b) dikey, c)30° [11]

Uriati ve diğerleri tarafından sunulan çalışmada otomotiv uygulamalarında kullanılan bir bileşenin topoloji optimizasyonu, imalatı ve yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonunda çözüm yaklaşımı olarak SIMP metodu uygulanmıştır. Topoloji optimizasyonu sonucunda ortaya çıkan geometrinin, polyNURBS modelleme yaklaşımı kullanılan yazılımlar ile yeniden modellenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ortaya çıkan yeni model Şekil 2.14'de paylaşılmıştır. Parçanın üretim tablasına yerleştirilmesi, oryantasyonunun belirlenmesi ve destek elemanların oluşturulması Magics yazılımı ile yapılmıştır. Yazarlar, proses simülasyonu aşamasında artık gerilmelerin dağılımı ile büyüklüğünü ve parçanın üretim sonrası ortaya çıkacak deformasyonunu ortaya koymaya çalışmışlardır. Parçaların üretimi AlSi10Mg toz kullanılarak SLM500 SLE cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığı olarak 50 μm, tabla sıcaklığı olarak 150°C ve enerji yoğunluğu olarak 32,62 J/mm^3 parametreleri kullanılmıştır. Üretim tamamlandıktan sonra platformun 200°C'de 4 saat bekletilerek parçaya ısıl işlem uygulandığı belirtilmiştir. Son olarak yüzey kalitesinin arttırılması adına destek elemanlar söküldükten sonra parçaya yüzey işlemi olarak kumlama uygulandığının bilgisi verilmiştir. Test numunelerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda yatay üretilen ve dikey üretilen numunelerin yorulma performansları arasında büyük fark Çizelge 2.2'de ortaya koyulmuştur. Bu farkın büyük ölçüde dikey üretilen numunede daha yüksek artık gerilmelerin oluşmasından kaynaklandığı aktarılmıştır. Son olarak optimizasyon sonucunda parçanın %57 hafiflediğinin bilgisi paylaşılmıştır [12].

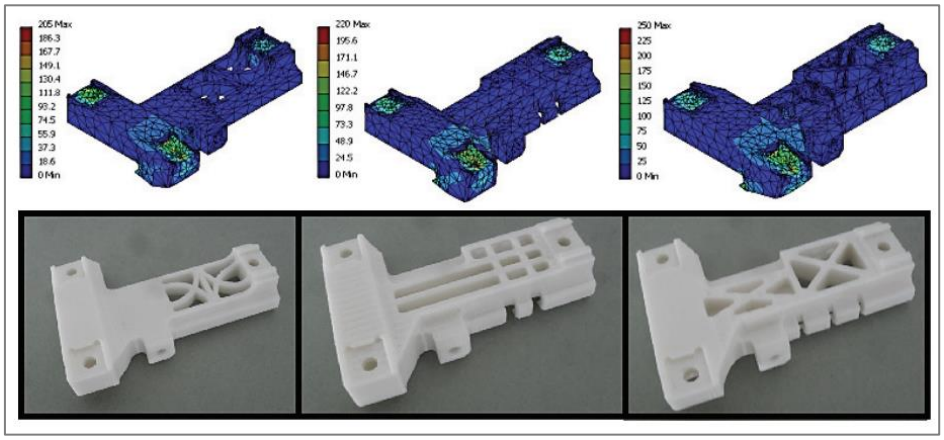


Şekil 2.14. Alt süspansiyon kolunun optimizasyonu [12]

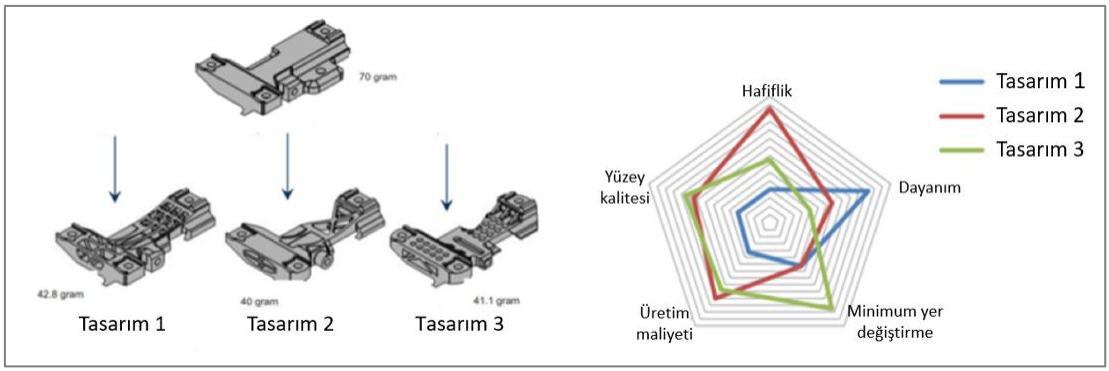
Çizelge 2.2. Test numunelerinden elde edilen yorulma verileri [12]

	Dikey Numuneler	Yatay Numuneler
$1{,}56.10^5$ Çevrimde Yorulma Dayanımı (MPa)	140	200
Artık Gerilmeler (MPa)	180	20

Salonitis ve Zarban 6082-T6 alüminyum alaşımını kullanarak talaşlı imalat ile üretilen braket parçasını, eklemeli imalata yönelik olarak yeniden tasarlamışlardır. Çalışma SLS metodu ile AlSi10Mg malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parçaya uygulanan topoloji optimizasyonun sonuçları doğrultusunda parçanın yeniden modellemesi yapılmıştır ve Şekil 2.15'de görüldüğü üzere 3 ayrı model ortaya koyulmuştur. Bu modellerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edildiği ve parçaların prototipinin FDM metodu ile üretildiği belirtilmiştir. Ardından yazarlar, bu 3 modeli hafiflik, dayanım, minimum yer değiştirme, üretim maliyeti ve yüzey kalitesi kriterlerini göz önünde bulundurarak karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda optimum kriterleri sırasıyla tasarım 2, tasarım 3 ve tasarım 1'in karşıladığı Şekil 2.16'da ortaya koyulmuştur. Tasarım 2'nin AlSi10Mg alaşımı ile üretilmesinin sonucunda parçanın %43 hafiflediği belirtilmiştir [13].

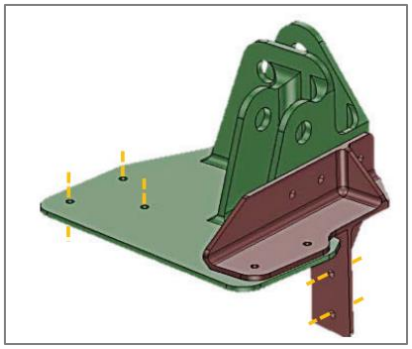


Şekil 2.15. Modellerin sonlu elemanlar analizleri ve FDM ile üretilen numuneleri [13]



Şekil 2.16. Optimizasyon sonucu ortaya çıkan modellerin karşılaştırılması [13]

Klippstein ve diğerleri tarafından sunulan çalışmada havacılık uygulamalarında kullanılan braket parçalarının optimizasyonu, imalatı ve çekme testleri yapılmıştır. Bu çalışma SLE metodu ile AlSi10Mg toz malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan parçanın iki braketin montajından oluştuğundan ve bu parçaların satın al ve uç değerinin 6,25 olduğundan bahsedilmiştir. Yazarlar, Şekil 2.17'de gösterilen koyu yeşil ve kahverengi braketleri birleştirerek parça sayısını azaltmayı ve optimizasyonun potansiyelini arttırmayı hedeflemişlerdir. Optimizasyon sonucu ortaya çıkan modele uygulanan sonlu elemanlar analizi sonucunda brakette görülen maksimum gerilmenin 114 MPa olduğu belirtilmiştir. Parçaların üretiminin SLM 250-HL SLM Solutions tezgahı ile gerçekleştirildiğinin ve üretimin 26 saat sürdüğünün bilgisi verilmiştir. Üretilen numuneler Şekil 2.18'de paylaşılmıştır. Parçadaki gerilmeleri azaltmak ve sünekliği arttırmak için parçaya tavlama işlemi uygulanmıştır. Destek elemanların sökülmesinin ardından parçanın fonksiyonel yüzeylerinin işlendiği aktarılmıştır. Yazarlar, bu çalışma sonucunda %60 ağırlık azaldığını ortaya koymuşlardır [14].



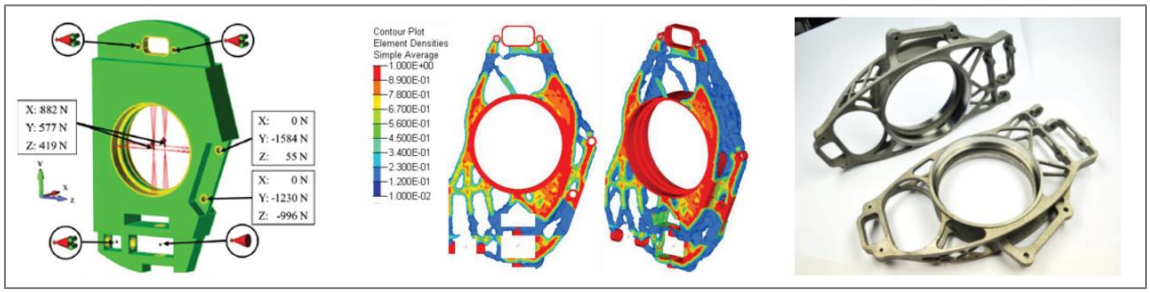
Şekil 2.17. Ana braket (koyu yeşil) ve diğer braket (kahverengi) [14]



Şekil 2.18. Braketin fonksiyonel yüzeyleri ve üretilmiş numuneler [14]

Walton ve Moztarzadeh tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir formula aracının arka süspansiyon bölgesinde bulunan tekerlek mafsalı parçası, EBM metoduna yönelik olarak Ti6Al4V tozu kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. Başarılı bir EBM prosesinin gerçekleştirilebilmesi için uygulanması gereken tasarım kuralları ortaya koyulmuştur. Çıkıntı yüzeylerde 45°'den yüksek açılarda genelde destek eleman ihtiyacının ortadan kalkacağı ifade edilmiştir. Etrafı tamamen kapalı boşluklar ve oyuklardan tozlar çıkarılamadığı için böyle yapıların oluşturulmaması gerektiği belirtilmiştir. Destekler sökülürken takım erişimi ihtiyacı oluşacağından yapının buna göre ayarlanmasının önemli olduğu aktarılmıştır. Yüksek tolerans gereksinimi olan bölgelerde malzemenin fazla stoklu üretilmesinin, fazla stoklu kısmın daha sonra işlenmesinin gerekli olduğundan bahsedilmiştir. Minimum parça kalınlığının arttırılarak maksimum kalınlığına yaklaştırılması ile parça kesitinde büyük değişikliklerin önüne geçilmesinin parçanın çarpılmasının önlenmesine katkı sağlayacağı bilgisi verilmiştir. Optimizasyon ve analiz için çözücü olarak Optistruct programı kullanılmıştır ve tasarım 0,6 kg ağırlık ve 450 MPa maksimum stres değerleri ile kısıtlandırılmıştır. Şekil 2.19'da sunulan yoğunluk değerleri yorumlanarak parçanın tekrar modellenmesinin yapıldığı belirtilmiştir. Parça yeniden modellenirken toleransın önemli olduğu rulman yatağında fazla malzeme kullanıldığı ve bu bölgenin parçanın üretimi tamamlandıktan sonra talaşlı imalat ile işlenerek son boyutuna getirileceğinin bilgisi verilmiştir. Parçanın üretiminin ARCAM A2X cihazı ile tamamlanmasının ardından muayenesinin yapıldığından ve katmanlar arası bir kayma veya önem arz edecek bir boşluk bulunmadığından bahsedilmiştir. Parçaya bir ısıl işlem veya yüzey işlemi uygulanmadığının bilgisi paylaşılmıştır. Yazarlar, Çizelge 2.3'de parçanın orijinal tasarımı ile optimize edilmiş tasarımın karşılaştırılması üzerinde durmuşlardır. EBM uygulamasının üretim maliyetinin geleneksel üretim metodunun maliyetinden 8 kattan daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Bu doğrultuda EBM metodunun yüksek performans gerektiren

uygulamalarda ya da parçanın üretim maliyetinin çok üzerinde etkiye sahip olduğu durumlarda kullanılması gerektiğinin üzerinde durulmuştur [15].



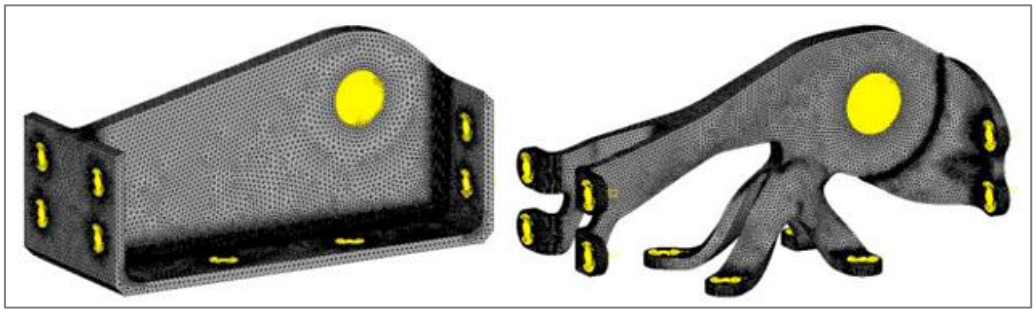
Şekil 2.19. Tekerlek mafsalının optimizasyonu [15]

Çizelge 2.3. Talaşlı imalat ve EBM ile üretilmiş numunelerin karşılaştırılması [15]

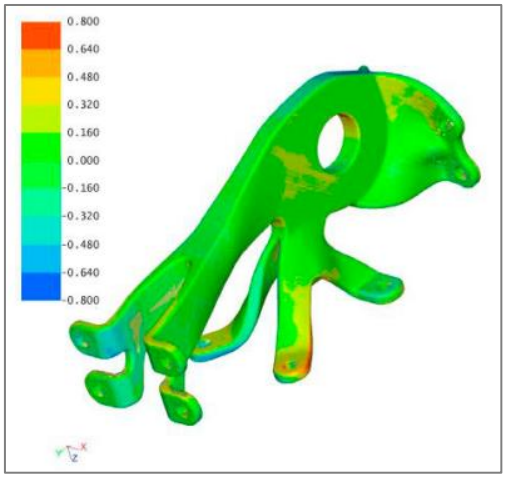
Değerlendirme Kriteri	Talaşlı İmalat	EBM	% Değişim
Kütle (g)	823,00	536,00	-36
Güvenlik Katsayısı	0,95	1,70	79
Maksimum Deplasman (mm)	0,25	0,32	28
Ham Malzeme Kullanımı (kg)	7,00	1,00	-86
Üretim Maliyeti (€)	342,00	2980,97	772

Seabra ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada havacılık uygulamalarında kullanılan braketin optimizasyonu, imalatı ve testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma SLE metodu ile titanyum malzeme kullanılarak yapılmıştır. Bileşen 3 ayrı statik yük koşulu altında değerlendirilmiştir. Optimizasyon için girdi olarak tasarım alanı, meş, hedef ve kısıt parametreleri tanımlamışlardır. Optimizasyon için kısıtlama olarak hacim oranı ve simetri kısıtlaması verildiğinden bahsedilmiştir. Optimizasyon sonucu ortaya çıkan tasarım Şekil 2.20'de paylaşılmıştır. Parçanın üretiminin SLM 125 HL cihazı ile tamamlanmasının ardından metrolojik ve mekanik testleri yapılmıştır. Metrolojik testte, parçanın taranmasının ardından ilgili görsel STL formatında kaydedilerek orjinal STL veri ile karşılaştırılmıştır. Yazarlar tarafından Şekil 2.21'de sunulan test sonucunda 0,8 mm'ye kadar ulaşan sapmalar gözlemlenmiştir. Bu sapmaların nedeni olarak SLE prosesinde ortaya çıkan yüksek sıcaklık gradyanları gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık gradyanının sebep olduğu artık gerilmelerin parçanın destek elemanlarının platformdan kopmasına neden olabileceğinden bahsedilmiştir. Çalışmada yapılan mekanik testlerde her bir yük durumunu simüle etmek için arayüz yapılar tasarlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda parçanın hacminde %54, ağırlığında ise %28 azalma oluştuğu ortaya koyulmuştur. Emniyet katsayısında ise parçanın

malzemesinin de değişiminin etkisiyle 2 kattan fazla bir artış olduğu bilgisi paylaşılmıştır [16].



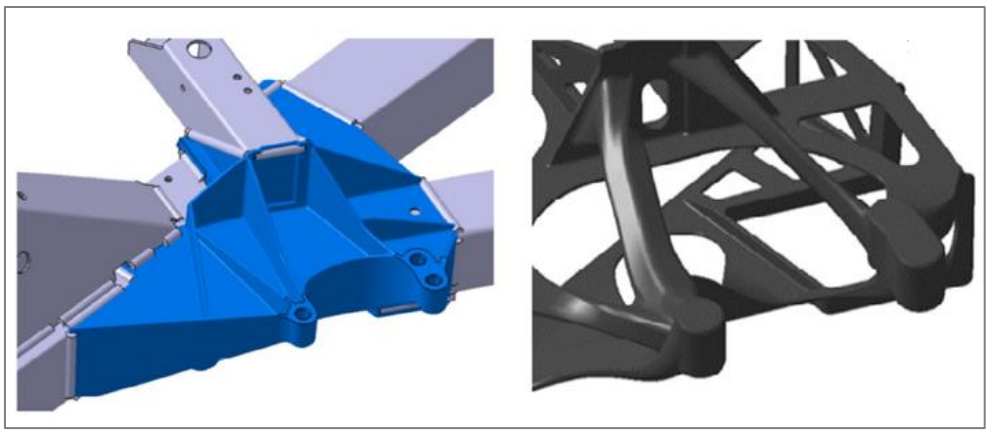
Şekil 2.20. Braketin optimizasyonu [16]



Şekil 2.21. Metrolojik test sonucu [16]

Merulla ve diğerleri, otomotiv uygulamalarında kullanılan motor takviye şasisine, topoloji optimizasyonu uygulayarak eklemeli imalat teknolojisine uygun olarak yeniden tasarlamışlardır. Optimizasyon problemi, kısıtlama olarak maksimum yer değiştirme ve stres, hedef olarak da kütleyi minimuma indirmek şeklinde tanımlanmış. Optimizasyon için Solidworks yazılımının Truform uzantısı kullanılmış. Optimizasyon sonucunda düşük gerilimli alanların parçadan kaldırılması hedeflenerek parçanın Solidworks programı ile yeniden tasarlandığı belirtilmiştir. Parçanın ağırlığının 2,2 kg'dan 1,52 kg'a düştüğü aktarılmıştır. Yeni tasarımın parça için belirlenmiş yük durumlarındaki statik ve dinamik analizleri sonucunda rijitlikte ve mukavemette bir miktar artış gerektiği ortaya koyulmuştur. Bunun üzerine parçanın belirlenen bölgelerinin güçlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Şekil 2.22'de paylaşılan optimizasyon sonucunda nihai tasarımın ağırlığı 1,71 kg bulunmuştur ve

parçanın yaklaşık %20 hafiflediğine değinilmiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinde topoloji optimizasyonu kullanımının, parçanın yapısal gereksinimleri korurken ağırlık azaltmadaki faydalı etkilerinden bahsedilmiştir. Ağırlık azalmasının, parçanın üretiminde enerji tüketiminin azalmasına ek olarak aracın yakıt tüketiminin azalmasına etki etmesi üzerinde durulmuştur [17].



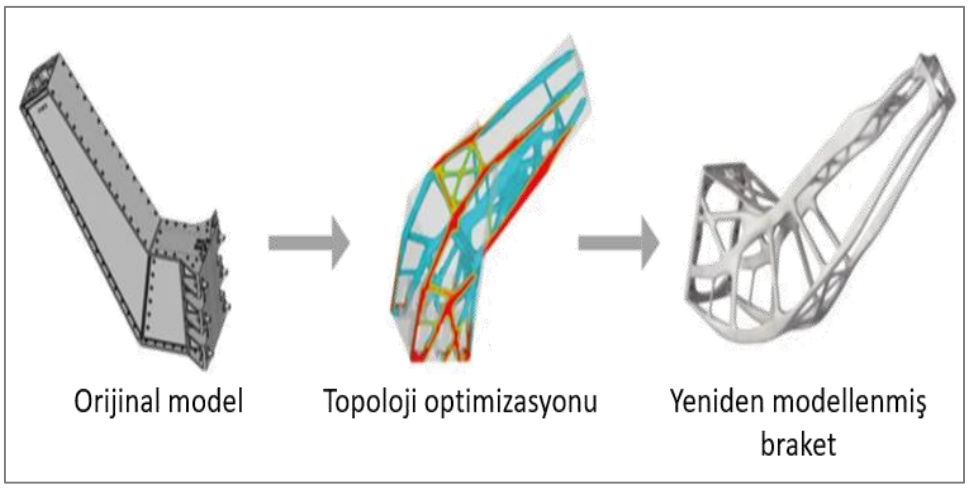
Şekil 2.22. Motor takviye şasisinin optimizasyonu [17]

Şekil 2.23'de gösterilen, Airbus A350 XWB yolcu uçağının dikey stabilizatör bölgesinde bulunan kablo hattı yatağı komponenti, topoloji optimizasyonu kullanılarak katmanlı üretime uygun olarak yeniden tasarlanmıştır. Bu çalışma EOS toz yataklı DMLS tezgahı kullanılarak AlSi10Mg tozu ile yapılmıştır ve tabaka kalınlığı olarak 90 µm kullanılmıştır. Geleneksel metotlarla üretilen komponentin 30 ayrı parçadan oluştuğunun bilgisi verilmiş. Tek bir parçadan oluşan tasarım çözümünün ağırlığı %30 azalttığı, buna ek olarak da üretim ve montaj süresini önemli ölçüde azalttığı sonucu bulunmuş. Toplam üretim süresinin 70 günden 19 saate indiğinin bilgisi paylaşılmış. Ek olarak 30 ayrı parçanın üretilip stokta bekletilmesinin ciddi bir maliyet oluşturduğuna ve artık bu durumun önüne geçildiğine değinilmiştir.



Şekil 2.23. Airbus A350 XWB kablo hattı komponenti [18]

RUAG gözetleme uydusunun anten braketi topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat için başarılı uygulamalardan bir tanesidir. Bu çalışma DMLS metodu ile AlSi10Mg malzeme kullanılarak yapılmıştır. Üretim için EOS M400 tezgahının kullanıldığının ve tabaka kalınlığının 60 µm seçildiğinin bilgisi paylaşılmıştır. Şekil 2.24'de paylaşılan optimize edilmiş bileşenin, minimum rijitlik gereksinimini %30 aştığı ve 1,6 kg'dan 940 grama düştüğü ortaya koyulmuştur. Üretim süresinin yaklaşık 80 saat olduğunun aktarılmıştır. Uzay keşif faaliyetlerinde taşınan her 1 kilogramın maliyetinin 20000€'dan daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bundan kaynaklı hafifletilen her gramın, uzay aracına daha az yakıt gerektireceğinden büyük önemi olduğuna değinilmiştir.

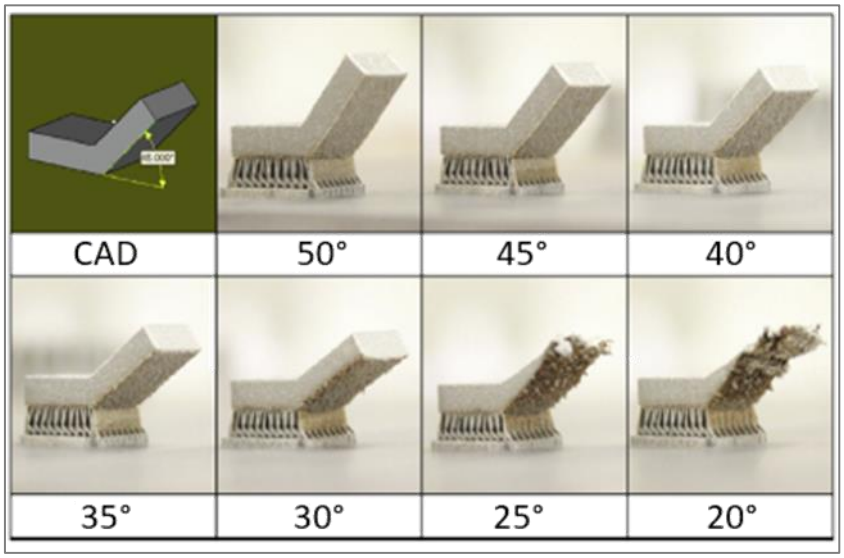


Şekil 2.24. Ruag gözetleme uydusu anten braketi [19]

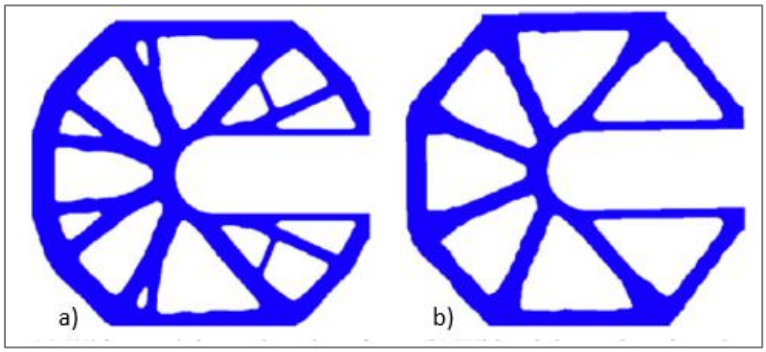
ZHU vd. tarafından sunulan çalışmada topoloji optimizasyonu ile eklemeli imalatın entegrasyonu ve eklemeli imalatın getirdiği fırsatlar ile zorluklar anlatılmıştır. Eklemeli imalatın sunduğu muazzam üretim potansiyeline rağmen yeni yapısal tasarım kısıtlarına,

üretim bozukluklarına, ek destek elemanlarına ve yüzey pürüzlülüğüne yol açtığı ortaya koyulmuştur. Eklemeli imalata yönelik tasarımı eklemeli imalat kısıtlamalarını ve malzeme özelliklerini göz önünde bulundurarak tasarım ve üretime entegre etmenin ürünün performansını üst düzeye çıkarmak için gerekli olduğu belirtilmiştir. Tipik eklemeli imalat kısıtlamalarının minimum uzunluk kısıtlamaları, bağlantı kısıtlamaları ve çıkıntı kısıtlamalarını içerdiğinden bahsedilmiştir. Parçanın aşağı bakan yüzünün daha pürüzlü hale geldiğine ve çıkıntı açısı azaldıkça sonunda parçanın üretiminin başarısız olacağına değinilmiştir. Bu durum Şekil 2.25'de gösterilmektedir. Uzunluk kısıtlamalarını topoloji optimizasyonuna empoze etmenin küçük delikler, ince duvarlar gibi üretilemeyen geometrik özelliklerin önüne geçmekte hayati önem taşıdığından bahsedilmiştir. Topoloji optimizasyonunda kullanılan uzunluk kontrol tekniğinin göreceli olarak olgunlaşmış olduğuna ve Altair Optistruct gibi ticari yazılımlara entegre olduğuna değiniliyor. Şekil 2.26'da gösterilen üretilemez olan dalların, minimum uzunluk ölçeği empoze edildiğinde ortadan kaybolmasının üzerinde durulmuştur. Öte yandan eklemeli imalatta kullanılan malzemelerin anizotropik mekanik özelliklerinin, yapısal tasarım ve uygulamalarında temel zorluklardan birisi olduğuna değinilmiştir. Bununla birlikte topoloji optimizasyonunda izotropik malzeme modellerinin uygulanması ile, malzeme anizotropisinin yapısal tasarım ve performans üzerine etkilerinin görmezden gelindiğine değinilmiştir. Bu zorluğun üstesinden gelinmesi için topoloji optimizasyonuna anizotropik malzeme modeli tanımlanmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak parçanın üretim yönü, nozul tarama stratejisi gibi eklemeli imalat üretim parametrelerinin optimize edilmesinin gerekliliğinin üzerinde durulmuştur. Tekrar ergitme gibi bir ikincil işlemin uygulanmasının eklemeli imalat proseslerini iyileştireceğinden bahsedilmiş. Bunun yanında füzyon eksikliğinden dolayı oluşan ergimemiş bölgeler ve hapsolmuş gazlardan kaynaklanan gözenekler yorulma hasarının ana nedeni olarak gösterilmiştir. Şekil 2.27'de gösterilen bu kusurların döngüsel yükleme altında çatlak oluşumuna sebep olabileceği belirtilmiştir. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların yorulma performansını parça geometrisinin, üretim doğrultusunun ve yüzey pürüzlülüğünün etkilediğinin bilgisi verilmiş. Kullanılan malzemelerin anizotropisinin ise anizotropik yorulma performansına yol açtığından bahsedilmiştir. Örnek olarak, SLE metodu ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik ve Ti6Al4V'nin üretim doğrultusunun dikey olması durumunda paralel olmasına göre daha iyi yorulma performansı sergilediği gösterilmiştir. Üretilmiş parçaların yorulma performansını geliştirmek için kullanılan sıcak izostatik preslemenin eklemeli imalatta oluşan kusurları onarmada en etkili son işlem olduğu belirtilmiştir. Bu uygulamanın boşluk kusurlarını

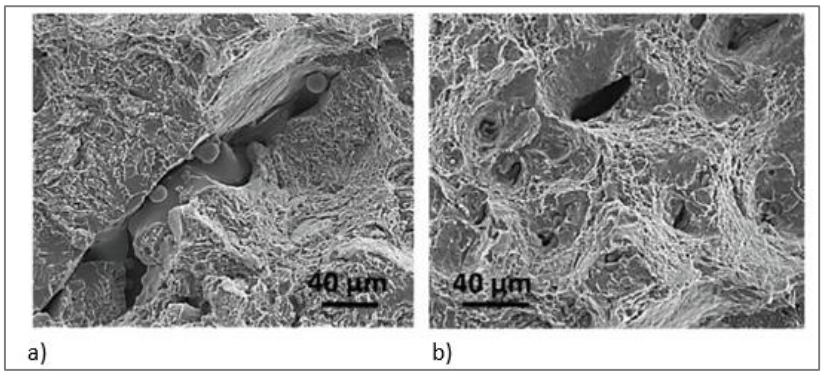
ortadan kaldırabileceğinin ve mikro yapının homojenleştirilebileceğinin bilgisi paylaşılmıştır [20].



Şekil 2.25. Çıkıntı açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi [21]

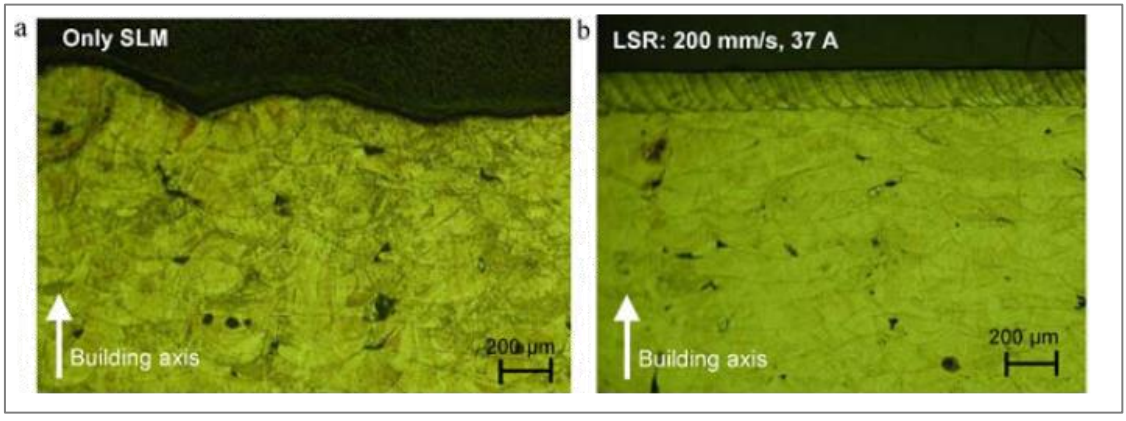


Şekil 2.26. Altair Optistruct yazılımında topoloji optimizasyonu örnekleri a) uzunluk kısıtlaması uygulanmayan model, b) uzunluk kısıtlaması uygulanan model [20]



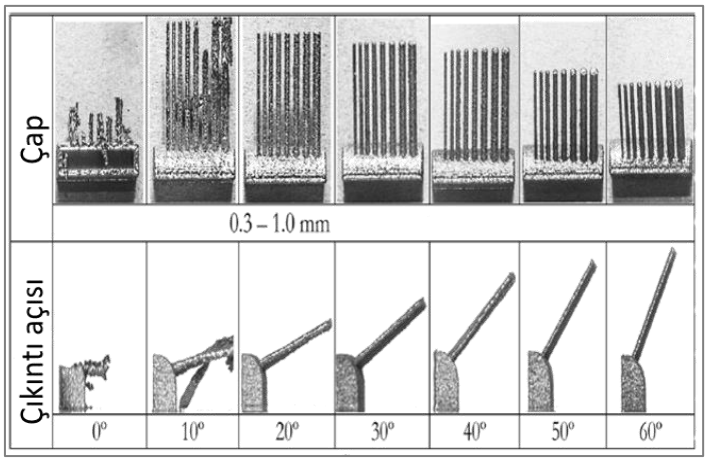
Şekil 2.27. Mikro yapısal kusurlar a) ergimemiş bölgeler, b) gözenekler [20]

Yasa ve arkadaşları SLE yönteminde ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilmeler gibi bazı proses kısıtlamalarının üstesinden gelmek için tekrar ergitme yöntemini kullanmışlardır. Tekrar ergitme yönteminde, bir katman taranıp ergitildikten sonra yeni bir toz tabakası eklenmeden önce aynı tabaka tekrar taranır. Bu tabakanın ara veya son katman olabileceği belirtilmiştir. Ara katmanda bu işlemin her tabakada uygulanabileceği ancak tarama hızına bağlı olarak üretim süresini büyük ölçüde arttıracağına değinilmiş. Öte yandan parça yoğunluğunun, çatlak oluşması ve ilerlemesi açısından kritik olduğu bölgelerde en iyi çözüm yönteminin bu metot olduğu ileri sürülmüştür. Tekrar ergitmenin son katmanda ya da dış yüzeyde kullanılmasının yüzey kalitesini arttıracağının üzerinde durulmuştur. Yazarlar bu çalışmada SLE metoduyla üretilen bir parçada karşılaştırma yapmak için tekrar ergitme uygulanmayan bir numune ve tekrar ergitme uygulanan bir numune üretmişlerdir. İkincil lazer işlemi için 200 mm/s tarama hızı ve 95 W lazer gücü kullanılmıştır. Bu numunelerin yüzey pürüzlülükleri Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Sadece SLE uygulanan numunenin ortalama pürüzlülüğünü üst yüzeylerde 12 µm Ra olarak ölçmüşler. Tekrar ergitmede ise Ra değerinin 1.5 µm'ye düştüğünü ve %90'dan fazla iyileşme olduğunu ortaya koymuşlardır. Ek olarak bu yöntemle artık gerilmelerin %0,036'ya kadar azaldığı belirtilmiştir [22].



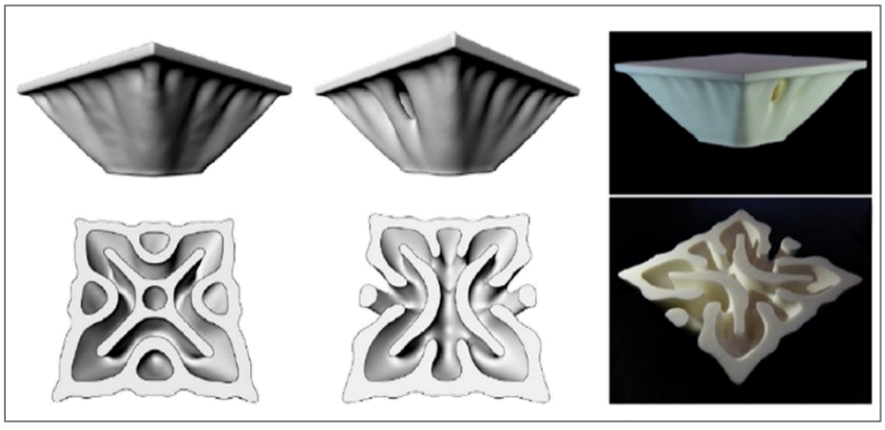
Şekil 2.28. Numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması a) sadece SLE numunesi, b) Tekrar ergitme uygulanmış SLE numunesi [22]

Mazur ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışmalarda Ti6Al4V tozu ile SLE prosesinde üretilen numunelerin kritik çıkıntı açıları ve dikme çapları değerlendirilmiştir. Çalışmalar sonucunda üretilebilir minimum dikme açısının yaklaşık 20°, dikme çapının ise 0.3 mm olduğu Şekil 2.29'da ortaya koyulmuştur [23].



Şekil 2.29. Kritik çıkıntı açısı ve direk çapı L: Büyük kusurlu, M: az kusurlu, H: üretimi başarılı [23]

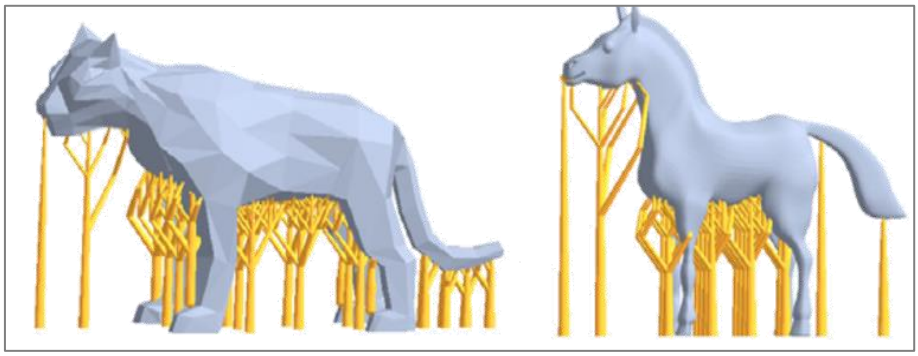
Xiong ve diğerleri tarafından geliştirilen çevrelenmiş boşluklardan kaçınmaya yönelik olarak yaklaşım, topoloji optimizasyonu sürecinde boşlukları birbirine bağlayan tüneller oluşturmak üzerinde dayanır. Şekil 2.30'da gösterilen bu yaklaşımın, bu kısıtlamanın dahil edilmediği topoloji optimizasyonuna oldukça benzer bir malzeme dağılımı oluşturabildiğinden bahsedilmiştir. Eklemeli imalat prosesinde, ergimemiş tozları ve destek elemanları çevrelenmiş boşluklardan çıkarmanın imkansız olduğunun bilgisi paylaşılmıştır. Bu gerekçeden dolayı parçadaki çevrelenmiş boşlukları ortadan kaldırmanın parçanın yapısal üretilebilirliğini sağlamada hayati öneme sahip olduğuna değinilmiştir [24].



Şekil 2.30. Çevrelenmiş boşluklardan kaçınmaya yönelik yaklaşım [24]

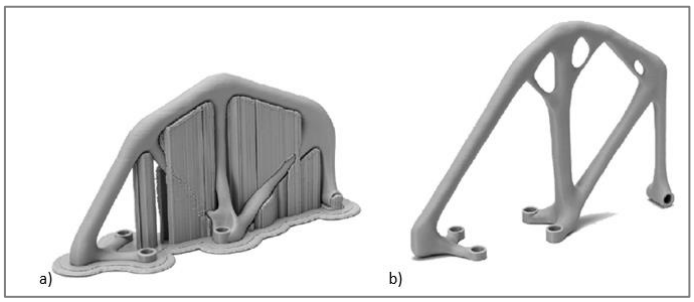
Zhou ve arkadaşları L-sistemine (Lindenmayer system) dayalı ağaç benzeri destek oluşturma yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada önerilen yöntem visual basic de ilgili kod oluşturularak gerçekleştirilmiş. STL formatına çevrilen CAD model, ağaç benzeri destek

oluşturma yazılımına aktarıldığında destek yapıların otomatik oluşturulduğundan ve model ile destek yapının yeni bir STL modele dönüştürüldüğünden bahsedilmiştir. Şekil 2.31'de paylaşılan desteklerin daha kolay söküldüğüne ve daha az malzeme kullanımı ile daha kısa üretim süresi gerektirdiğine değinilmiştir [25].



Şekil 2.31. Ağaç benzeri destek yapılar [25]

Bi, Tran, ve Xie, kendini destekleyemeyen ve destekleyebilen yapıların karşılaştırılması üzerine bir çalışma sergilemişlerdir. Aynı tasarım alanı ve hacim oranı kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, çıkıntı kriteri olarak belirlenen 45° şartını sağlamayan bölgeler yeniden modellenmiştir. Şekil 2.32 incelendiğinde, kendini destekleyen yapının yüksekliğinin 45° isterini sağlamak için arttırıldığı görülmektedir. Arttırılan yüksekliği kompanse etmek adına ara bağlantıların boyutlarının kısaltıldığı belirtilmiştir. Kendisi destekleyemeyen yapının yaklaşık 15 saatte üretilebildiği ve ağırlığının 61 g olduğu aktarılırken, kendisi destekleyen yapının yaklaşık 8 saatte üretildiği ve ağırlığının 34 g olduğu paylaşılmıştır [26].



Şekil 2.32. a) destek ihtiyacı olan yapı, b) kendini destekleyen yapı [26]

Ticari uçaklarda sıklıkla kullanılan LEAP motorundaki yakıt nozülü eklemeli imalata uygun olarak GE Aviation tarafından yeniden tasarlanmıştır. Geleneksel imalat metotlarıyla

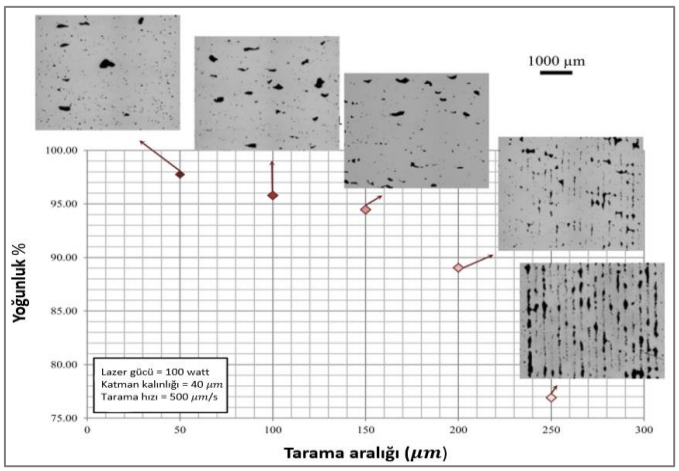
üretildiğinde bu nozülün birbirine kaynaklanan 20 parçadan oluştuğu belirtilmiştir. Önceki parçaya kıyasla %25 daha az ağırlığa sahip olan yakıt nozülünün, aynı zamanda daha girift soğutma kanalları ve destek kirişleri gibi yeni tasarım özellikleri barındırdığından bahsedilmiştir. Şekil 2.33'de paylaşılan yeni tasarım yakıt püskürtücülerin, önceki motora kıyasla yakıt verimliliğini %15 arttırdığı ve CO_2 salınımında azalma sağladığı ifade edilmiştir [27].



Şekil 2.33. LEAP motorunun eklemeli imalat ile üretilen yakıt nozülü [27]

Aboulkhair ve diğerleri SLE kullanarak AlSi10Mg alaşımından yüksek yoğunluklu parçalar üretmek için gerekli parametreleri araştırmışlardır. Bu çalışmada farklı parametreler ve tarama stratejileri uyumla kullanılmış ve yüksek yoğunlukta parça üretilmesi sağlanmıştır. Alüminyum tozlarının diğer SLE malzemelerine oranla düşük toz akışkanlığına, yüksek yansıtıcılığa ve yüksek termal iletkenliğe sahip olduklarından bahsedilmiştir. Tozları ergitebilmek ve ısı kaybının üstesinden gelebilmek için yüksek lazer gücüne ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Ek olarak alüminyum alaşımların oksidasyona karşı oldukça hassas oldukları ve bu durumun da gözenek oluşumunu arttırdığı ifade edilmiştir. Alüminyum alaşımların SLE metodunda kullanımının en büyük zorluklarından birisinin gözenekliliği minimuma indirmek olduğu aktarılmıştır. SLE prosesinin birçok parametre ile kontrol edildiğinin ancak en önemli üretim parametrelerinin tarama hızı, tarama aralığı, lazer gücü ve katman kalınlığı olduğu ileri sürülmüştür. Bu çalışmada icra edilen deneysel çalışmalar tarama aralığı, tarama hızı ve tarama oryantasyonu başlıkları altında gerçekleştirilmiş. Tarama aralığı çalışmasında sabit katman kalınlığı, tarama hızı ve lazer gücü için 50, 100, 150, 200 ve 250 μm tarama aralıklarında numuneler üretilmiş. Bu numunelerin üretimi ızgara tarama deseni ile gerçekleştirilmiş. Tarama aralığı 150 μm değerine ulaştığında komşu tarama desenleri arasında boşluklar oluşmaya başladığından bahsedilmiş. Bunun

nedeni olarak da tarama aralıkları arasında bindirme meydana gelmemesi gösterilmiştir. Tarama aralığı artışı sonucu gözeneklilik artışı Şekil 2.34'de gösterilmiştir. Komşu eriyik havuzları arasında yeterli bindirmenin 50 ve 100 μm tarama aralıklarında elde edildiği ortaya koyulmuştur.



Şekil 2.34. Tarama aralığı değişiminin izafi yoğunluk ve gözeneklilik üzerindeki etkisi [28]

Tarama hızı çalışmasında katman kalınlığı 40 μm, lazer gücü ise 100W olarak sabit tutulurken 250, 500, 750 ve 1000 mm/s tarama hızları için 50 ile 100 μm tarama aralıklarında numuneler üretilmiş. Her bir kombinasyonun izafi yoğunluk değeri Çizelge 2.4'de paylaşılmıştır. Numunelerin %2-5 arası gözeneklilik gösterdikleri ifade edilmiştir. Ancak tarama hızının değişimi ile ortaya çıkan gözenek tiplerinin değiştiğine vurgu yapılmıştır. Düşük tarama hızlarında küresel şekilli ve küçük boyutlu metalurji gözeneklerinin oluştuğu, yüksek tarama hızlarında ise düzensiz şekilli ve büyük boyutlu anahtar deliği gözeneklerinin oluştuğu deneyler sonucu ortaya koyulmuştur.

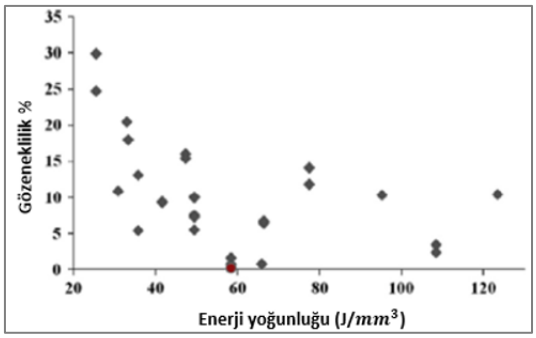
Çizelge 2.4. Tarama aralığı ve tarama hızı kombinasyonları için izafi yoğunluk değerleri [28]

Tarama Aralığı (μm)	Tarama Hızı (mm/s)			
	250	500	750	1000
50	95,6 ± 1,8	97,7 ± 0,2	96,8 ± 1,6	96,9 ± 1,8
100	96,3 ± 0,6	95,8 ± 1,0	97,4 ± 1,4	96,3 ± 2,7

Tarama oryantasyonu çalışmasında ise katman kalınlığı 40 μm olarak belirlenirken, numuneler 500,750 ve 1000 mm/s tarama hızları ile gruplandırılmış. Bu numunelerin üretimi 6 farklı tarama stratejisi ile gerçekleştirilmiştir. Tarama stratejileri arasında en yüksek izafi

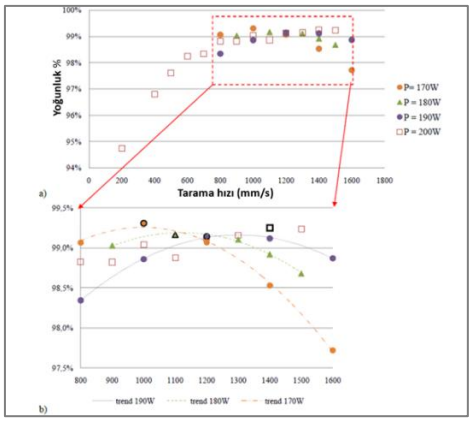
yoğunluk %99,82 ile sinter öncesi taramasıyla elde edilmiştir. Bu tarama stratejisinde aynı tarama hızında, farklı lazer güçleri ile aynı katmanın 2 kez tarandığı bilgisi paylaşılmış. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda en iyi kombinasyonun lazer hızı 500 mm/s, tarama aralığı 50 μm, lazer gücü 100 W ve sinter öncesi tarama stratejisi ile elde edildiği ortaya koyulmuştur [28].

Read ve diğerleri SLE metodu ile AlSi10Mg tozu kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda kusurları minimuma indirecek optimum proses parametreleri ve üretim oryantasyonunun numunenin çekme özellikleri üzerindeki etkileri ortaya koyulmuştur. Tüm numuneler Concept Laser M2 SLE cihazı ile üretilmiş. Numunelerin Argon gazı atmosferinde ve oksijen seviyesinin % 0,1'in altında üretimi gerçekleştirilmiş. Ek olarak numunelerin dik oryantasyonda ve ada tarama stratejisi ile üretildiği aktarılmış. Belirlenen parametreler doğrultusunda 27 farklı kombinasyon için numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Gözenekliliğin esas olarak lazer gücünden, tarama hızından ve tarama hızı, tarama aralığı etkileşiminden etkilendiği belirtilmiş. Lazer gücünde azalmanın ve tarama hızında artışın, malzemeye enerji girişini azaltarak ergi havuzunu azaltacağından bahsedilmiş. Bu durumun da gözenek oluşumuna neden olduğunun bilgisi paylaşılmış. Tarama aralığındaki artışın gözenek oluşumuna sebep olacağından bahsedilmiş. Bunun nedeni olarak komşu tarama çizgileri arasında yeterli örtüşmenin sağlanamaması gösterilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda yatay üretilen numunenin çekme özelliklerinin dikey üretilen numuneden %10 daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Yazarlar gerçekleştirdikleri çalışmalar sonucunda enerji yoğunluğu gözeneklilik ilişkisini Şekil 2.35'de ortaya koymuşlardır. 50 J/mm^3 değerine kadar enerji yoğunluğu arttıkça gözenek miktarının arttığı görülürken, yaklaşık 60 J/mm^3 değerinden sonra gözenek miktarının dalgalanmaya başladığı görülüyor. Bu kapsamda minimum gözenek oranını sağlayan enerji yoğunluğunun yaklaşık 60 J/mm^3 olduğunu paylaşmışlardır. Ek olarak alüminyum alaşımlarında maksimum malzeme yoğunluğunu veren enerji yoğunluğu aralığının 60-75 J/mm^3olduğunu ileri sürmüşlerdir [29].

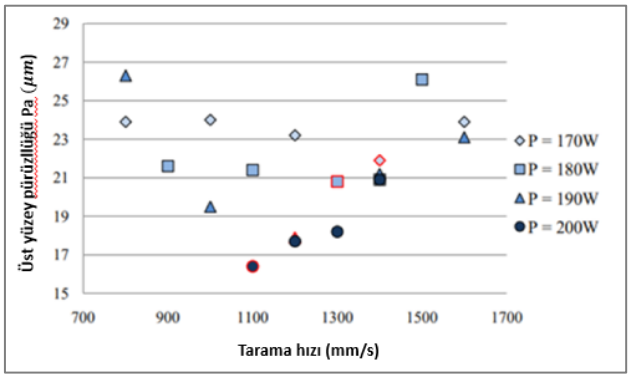


Şekil 2.35. Eşnerji yoğunluğuna karşı gözeneklilik değişimi [29]

Kempen ve diğerleri gerçekleştirdikleri bu çalışmada tarama hızı, tarama aralığı ve lazer gücü gibi proses parametrelerini optimize ederek, neredeyse tam yoğunluğa ulaşmayı ve daha iyi yüzey kalitesi elde etmeyi amaçlamışlar ve numunelerin mikro yapılarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmaları AlSi10Mg toz kullanarak Concept Lazer M1 SLE cihazı ile gerçekleştirmişlerdir. SLE ile üretilen parçalarda yüzey kalitesi ve yoğunluk açısından optimum parametre setini bulmanın çalışmanın temel amacı olduğundan bahsedilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda parçalar 170 W ile 200 W arasında değişen lazer gücü ve 200 mm/s ile 1600 mm/s aralığında tarama hızı ile üretilmiş. Tarama aralığı ise lazer odak çapının %70'i olan 105 μm olarak belirlenmiş. Arşimet metodu ile numunelerin yoğunluk ölçümleri yapılmış ve Şekil 2.36'da toplanmıştır. Çalışmalar sonucunda tarama hızının arttırılması ile parçanın yoğunluğunun arttırıldığı ortaya koyulmuştur. Parçaların üst yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür ve Şekil 2.37'de paylaşılmıştır. Enerji yoğunluğunun artması ile yüzey kalitesinin arttığı öne sürülmüştür. Yoğunluk ve yüzey kalitesi bakımından değerlendirildiğinde optimum parametre değerlerinin 200W lazer gücü ve 1200 mm/s tarama hızı olduğu aktarılmıştır. Ek olarak farklı tarama aralıkları ile yapılan çalışmalar sonucunda tarama aralığının yoğunluk değerine büyük bir etkisin olmadığı ortaya koyulmuştur [30].



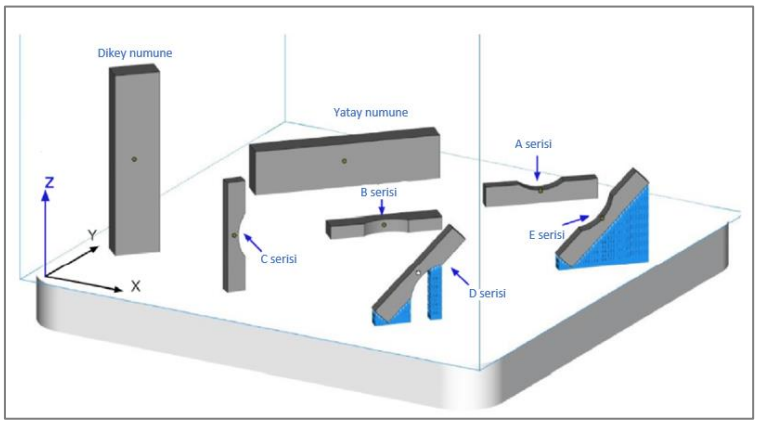
Şekil 2.36. a) Numunelerin izafi yoğunluğu, b) Yüksek tarama hızlarındaki sonuçların sınıflandırılması [30]



Şekil 2.37. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri [30]

Beretta ve diğerleri AlSi10Mg tozu ile üç farklı inşa yönüyle SLE metodu kullanılarak üretilen numunelerin yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Geleneksel üretim metotlarında yorulma özelliklerini kontrol eden temel parametreler olarak kusur varlığı, yüzey kalitesi ve artık gerilmeler gösterilmiştir. Üretim parametreleri olarak lazer gücü 350 W, tarama aralığı 0.13 mm, tarama hızı 1650 mm/s, katman kalınlığı 50 μm belirlenmiştir. Üretim haznesi 150°C'ye getirildikten sonra numunelerin üretildiği aktarılmış. AlSi10Mg malzemenin çekme özelliklerini elde etmek için Şekil 2.38'de gösterilen farklı inşa yönlerinde üretilen numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çizelge 2.5'de sonuçlar paylaşılmıştır. Yazarlar, en az anizotropi etkisinin yatay üretilen numunede gözlendiğini paylaşmışlar. Ek olarak en yüksek akma gerilmesi ile en düşük kopma gerilmesinin de yatay numunede ortaya çıktığı belirtilmiştir. 3 nokta eğme testlerinden elde edilen sonuçlara göre yatay numunelerin (seri B) en yüksek yorulma dayanımına sahip oldukları ortaya koyulmuştur. İki çapraz seri arasında ise E serisinin (yukarı bakan) D serisine (aşağı bakan) göre yorulma dayanımında çok daha iyi performans sergilediği paylaşılmıştır. D serisinin en düşük yorulma performansı

gösterdiği belirtilmiştir. Ek olarak artık gerilmelerin, dikey ve aşağı bakan çapraz numunelerin diğer serilere kıyasla daha düşük yorulma dayanımı göstermesinden sorumlu oldukları aktarılmıştır [31].



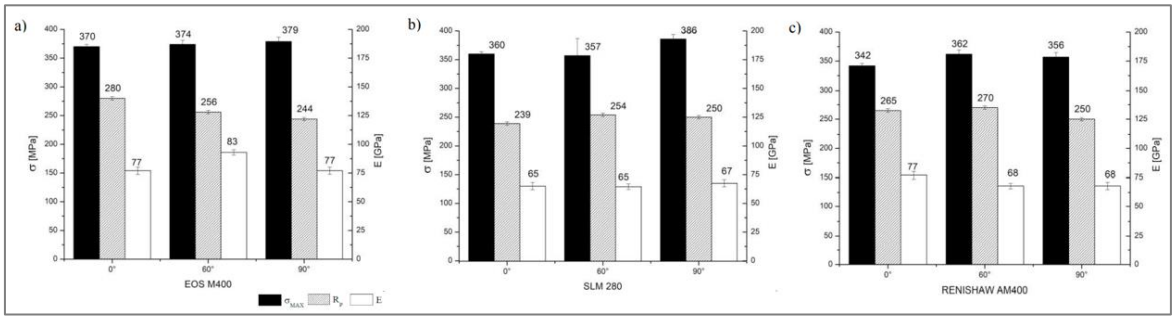
Şekil 2.38. Çalışmada kullanılan numuneler [31]

Çizelge 2.5. Numunelerin farklı oryantasyonlardaki çekme özellikleri [31]

Oryantasyon	E (GPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)
0°	70,4 – 73,5	224 – 231	377 – 381
45°	66,4 – 70,8	207 – 209	387 – 409
90°	62,3 – 68,6	203- 208	375 - 390

Majeed ve diğerleri SLE metodu ile üretilen AlSi10Mg bileşenlerin yüzey kalitesini analiz etme ve ilgili proses parametrelerini optimize etme üzerine yoğunlaşmışlardır. Deneysel çalışmalarda lazer gücü, tarama hızı ve bindirme oranının girdi parametreleri olarak kullanıldığı ifade edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5,36 μm olarak verilmiştir. Ek olarak 320 W, 360 W, 400 W lazer gücü değerleri için yüzey pürüzlülük değerlerinin sırası ile 4,23 μm, 4,64 μm ve 7,22 μm olduğu belirtilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün tarama gücü ve tarama aralığı ile pozitif, tarama hızı ve bindirme oranı ile negatif korelasyonda olduğundan bahsedilmiştir. Elde edilen minimum yüzey pürüzlülüğü değerinin, 320 W lazer gücü kullanılarak üretilmiş numuneye 540°C'de 2 saat bekletilerek uygulanan ısıl işlem sonucunda elde edildiği aktarılmıştır. Çalışmalar sonucunda en iyi yüzey kalitesine 320 W lazer gücü, 0,6 m/s tarama hızı, %35 bindirme oranı ve 88,7 μm tarama aralığı ile ulaşıldığı ortaya koyulmuştur [32].

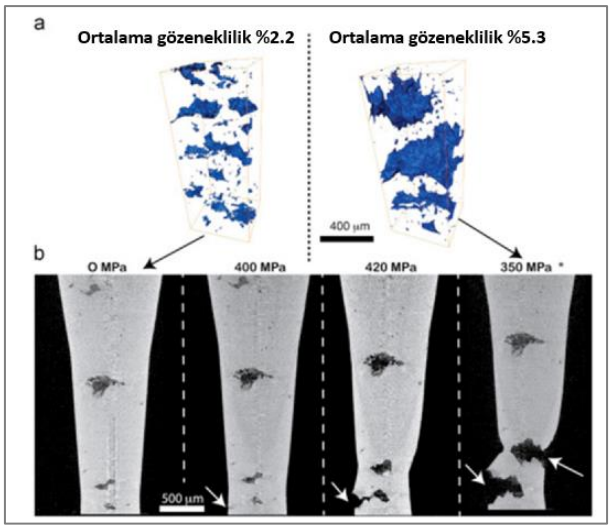
Teresa ve diğerleri tarafından sunulan bu çalışmada farklı SLE tezgahlarında ve farklı inşa yönlerinde üretilen AlSi10Mg numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Kullanılan 3 farklı SLE cihazının EOS M400, SLM 280 ve RENISHAW AM400 olduğunun bilgisi paylaşılmıştır. Her bir tezgah da 0°, 60° ve 90° inşa yönlerinde numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. İnşa açısı dışındaki üretim parametreleri hakkında bilgi verilmemiştir. Ardından numunelere çekme testinin uygulandığı belirtilmiştir. Çekme testinin sonucunda elde edilen en yüksek kopma gerilmesi değerinin 386 MPa olduğunun ve 90°'de SLM 280 tezgahı ile üretildiğinin bilgisi paylaşılmıştır. Elde edilen en düşük kopma gerilmesinin ise 340 MPa olduğunu ve 0°'de RENISHAW AM400 ile üretildiğini aktarmışlardır. Yazarlar, Şekil 2.39'da paylaşılan sonuçlar doğrultusunda inşa yönü ve kullanılan tezgah ile parçanın mekanik özellikleri arasında bir korelasyon oluşmadığını öne sürmüşlerdir [33].



Şekil 2.39. Numunelerin kopma gerilmesi, akma gerilmesi ve Young modülü değerleri a) EOS M400, b) SLM280, c) RENISHAW AM400 [33]

Thompson ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada eklemeli imalat ile üretilen parçalarda bilgisayarlı tomografi kullanımı incelenmiştir. Bilgisayarlı tomografinin yalnızca görüntüleme için kullanılan bir araçtan çok önemli metrolojik bir enstrümana geçişinin üzerinde durulmuştur. Gözeneklilik ölçümlerinde ve boyutsal ölçümlerde kullanılabildiğinden bahsedilmiştir. Eklemeli imalat ile üretilen özellikle kompleks iç yapılı parçalarda geleneksel ölçüm metotları ile erişilememe durumunun oluşabildiği belirtilmiştir. Yoğunluk ve gözenekliliğin tahribatsız muayene ile ölçümü ve gözenek morfolojisi ile gözenek dağılımının incelenmesi için bilgisayarlı tomografi kullanımının eklemeli imalat parçalarında giderek daha fazla kullanıldığı aktarılmıştır. Yazarlar özellikle SLE metodu ile parça üretilirken gözeneklilik, gözeneklilik dağılımı ve morfolojilerine bağlı olarak parçanın nihai mekanik özelliklerinin şekillendiğinden bahsetmişlerdir. Şekil 2.40'da paylaşılan görselde düşük ve yüksek gözeneklilik içeren paslanmaz çelik numunelerin çekme testinde farklı yükler altında meydana gelen kopmaları bilgisayarlı tomografi ile görüntülenmiştir.

Ek olarak bilgisayarlı tomografinin yorulma kritik gözenekleri belirlemede oldukça etkili olduğundan ve parça kusurları ile yorulma hasarı arasında güçlü bir korelasyon olduğundan bahsedilmiştir. Bunun yanında bu tekniğin Arşimet metodu gibi diğer gözeneklilik ölçüm metotlarına kıyasla bazı sınırlamaları olduğu belirtilmiştir. Daha büyük numunelerin iç gözeneklerinin şekil ve boylarının yanlış temsil edilmesi kaynaklı daha düşük doğrulukta gözeneklilik ölçümü sağladığından bahsedilmiş. Bilgisayarlı tomografinin gözeneklilik ölçümlerine ek olarak yaygın bir şekilde boyutsal metroloji uygulamalarında kullanıldığı ifade edilmiştir. Yazarlar bilgisayarlı tomografiyi CAD modeline kıyasla parçayı doğrulamak ve kusurları tespit etmek için kullanmışlardır. Parça geometrisinin CAD model ile toleransının ±0,15 mm sınırları içerisinde yer aldığını belirtmişlerdir [34].



Şekil 2.40. a) Solda düşük gözeneklilik, sağda ise yüksek gözeneklilik içeren numunelerin gözenekliliklerinin hacimsel gösterimleri, b) Numunelerin iç yapılarının bilgisayarlı tomografi görüntüleri [34]

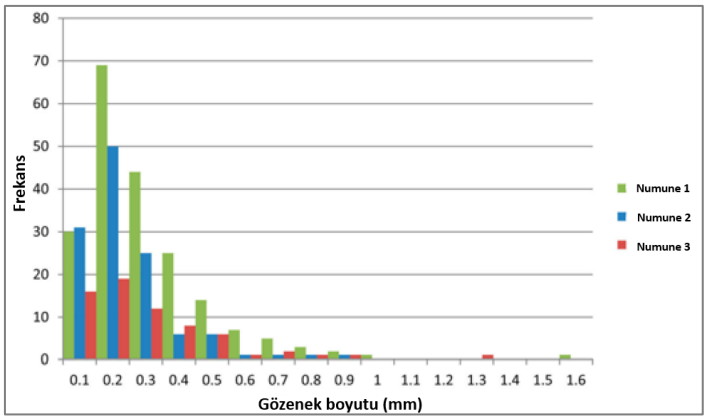
Cai ve diğerleri gerçekleştirdikleri bu çalışmada SLE prosesi ile AlSi10Mg toz kullanarak farklı parametrelerle üretilen numunelerin gözenekliliklerini tahribatsız muayene metotlarından bilgisayarlı tomografi ile incelemişlerdir. Elde ettikleri gözeneklilik seviyesini geleneksel metotlardan Arşimet yöntemi ile kıyaslamışlardır. Bilgisayarlı tomografi yönteminin, SLE ile üretilen parçaların iç yapısını 3 boyutlu bir şekilde karakterize ve analiz etmeyi sağladığını aktarmışlardır. Bu durumun da farklı proses parametrelerinin malzeme gözenekliliği üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağladığı belirtilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen numunelerin üretiminin SLM 250HL cihazı ile gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Lazer enerji yoğunluğunun SLE

işlemi sırasında malzeme hacmi başına uygulanan ortalama enerjiyi tanımlamak için yaygın olarak kullanıldığından bahsedilmiştir. Numunelerin üretiminde tarama hızı 500 mm/s, tarama aralığı 0,15 mm ve katman kalınlığı 0,05 mm olacak şekilde sabit tutulurken, lazer gücü parametresi 100 W, 150 W, 200 W ve 350 W olacak şekilde sırayla arttırılmıştır. Lazer enerji yoğunlukları ise sırayla 26,67 J/mm^3, 40,00 J/mm^3, 53,33 J/mm^3 ve 93,33 J/mm^3 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 2.6'da bt görüntülerinden elde edilen numunelerin gözeneklilik ölçümleri paylaşılmıştır. Daha sonra yapılan Arşimet ölçümü sonuçları ile bt sonuçlarının uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Numune 1'in en yüksek gözeneklilik yüzdesini içerdiğinden bahsedilmiştir. Yazarlar bunun öncelikle düşük lazer gücünün sonucunda düşük lazer enerjisi yoğunluğundan kaynaklandığını belirmişlerdir. Bu durumun da gözeneklerde sıkışabilecek toz parçacıklarının yetersiz ergimesine neden olduğunu açıklamışlardır. SLE prosesinde lazer gücünün arttırılması ile gözeneklilik miktarının azaldığı ortaya koyulmuştur. 350W lazer gücü kullanılan yüksek yoğunluklu numune 4'de gözenek gözlemlenmediği belirtilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda minimum gözenek boyutunun 46 μm olduğu belirlenmiştir. Bu durumun bilgisayarlı tomografinin sınırlı çözünürlüğünden kaynaklandığını ve 46 μm altında gözeneklerin tespit edilemediğini ifade etmişlerdir. Numune 2'deki maksimum gözenek boyutunun 0,819 mm, numene 1'de ise 1,572 mm olduğunun bilgisi paylaşılmıştır. Tomografi görüntülerinden ve Şekil 2.41'de sunulan gözenek boyutu histogramından görüleceği üzere 1-3 numunelerindeki gözeneklerin çoğunluğunun düzensiz şekilli ve 100 μm'dan büyük olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık 4. numunedeki gözeneklerin küresel olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak da düşük lazer enerji yoğunluğundan kaynaklı ergimesi tamamlanmayan metal tozları gösterilmiştir. Yazarlar, sınırlı çözünürlük nedeni ile küçük gözeneklerin verisinin kaybolmasına rağmen bt yönteminin mikroskopla yapılan kesit analizine göre daha güvenilir olduğunu açıklamışlardır. Bunun nedeni olarak da bilgisayarlı tomografide gözeneklilik ölçümü için bir kesit yerine tüm numunenin taranması gösterilmiştir [35].

Çizelge 2.6. AlSi10Mg numunelerin gözeneklilik sonuçları: bilgisayarlı tomografi yöntemi (solda) ve Arşimet metodu (sağda) [35]

Bilgisayarlı Tomografi Metodu	
Numune Numarası	% Gözeneklilik
1	8,752 ± 0,833
2	3,767 ± 0,771
3	2,456 ± 0,489
4	Gözeneklilik gözlenmemiştir.

Arşimet Metodu	
Numune Numarası	% Gözeneklilik
1	8,297 ± 0,001
2	3,163 ± 0,397
3	2,847 ± 0,594
4	0,526 ± 0,166

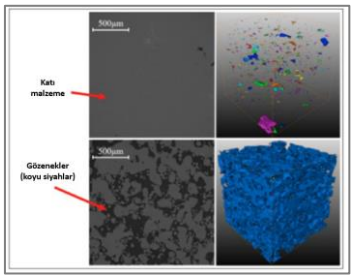


Şekil 2.41. Gözenek boyutu dağılım histogramı [35]

Dursun ve diğerleri bu çalışmada SLE metodu ile Ti6Al4V tozdan üretilen geçişli gözenekli yapıların gözeneklilik oranlarındaki sapmaları hücre yapısı, birim hücre boyutu ve kolon dikme kalınlıkları parametrelerini gözeterek incelemişlerdir. Numuneler üretildikten sonra üretilen parçaların tasarıma uygunluğunu karşılaştırmak için mikro bilgisayarlı tomografi ve Arşimet yoğunluk ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mikro-BT taraması sonucu elde edilen 3B model kafes yapının boyutlarını karşılaştırmayı sağlarken, Arşimet yoğunluk ölçümleri sonucu ile numunelerdeki gözeneklilik miktarının ortaya koyulması sağlanmıştır. Mikro-BT sonucunda kafes yapının kolon dikme kalınlığında ergiyen malzemenin sarkmasına bağlı olarak artış gözlenmiştir. Ortalama kalınlık artış miktarının 200 μm olduğu ifade edilmiştir. Kolon dikme kalınlığındaki artışın da gözeneklilikte azalmaya neden olduğu ortaya koyulmuştur [36].

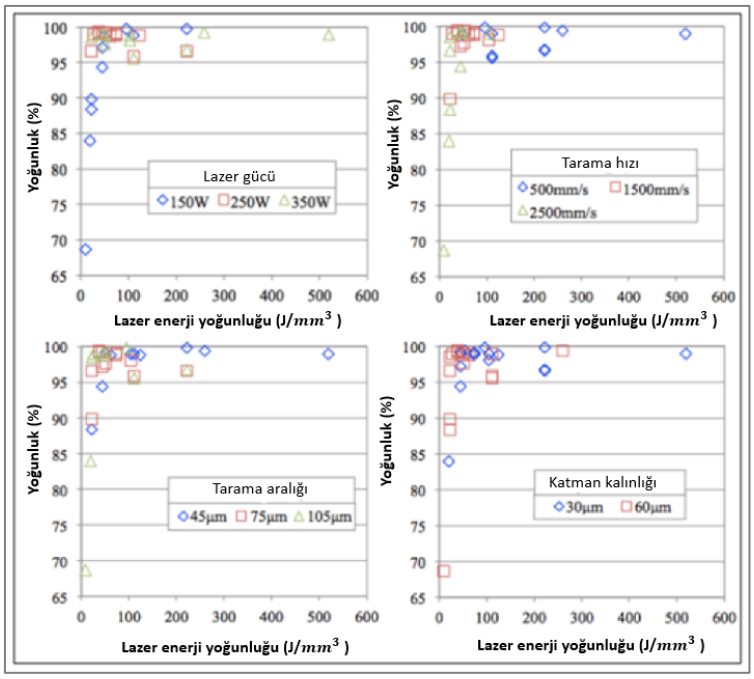
Hastie ve diğerleri sundukları bu çalışmada farklı parametreler kullanarak AlSi10Mg numuneleri üretmişler ve mikro bilgisayarlı tomografi kullanarak mikroyapıyı analiz etmişlerdir. Mikro bilgisayarlı tomografinin 3B gözenek karakteristiğini gözeneklerin boy, şekil, frekans ve lokasyon özelliklerini kullanarak çıkarmada oldukça yaygın kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemi olduğundan bahsedilmiştir. Mikro-BT'nin geleneksel yöntemlere göre 2 ana avantaj sunduğunu aktarmışlardır. Birinci olarak numunenin yüzeydeki gözenek morfolojisini değiştirebilecek öğütme ve cilalamaya maruz kalmaması, ikinci olarak ise sınırlı sayıda 2B kesit yerine malzemenin 3B görüntüsünün kullanılması gösterilmiştir. Lazer gücü (150, 250, 350 W), tarama hızı (500, 1500, 2500 mm/s), tarama aralığı (45, 75, 105 μm) ve katman kalınlığı (30, 60 μm) parametrelerinin 30 farklı kombinasyonu için toplam 34 numune üretmişlerdir. Bu 4 parametrenin yoğunlaştırma, mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde en etkili parametreler olduğu öne sürülmüştür.

Lazer enerji yoğunluğunun malzemeye ne kadar enerji verildiğinin basit bir göstergesi olarak kullanıldığı ifade edilmiştir. Elde edilen maksimum yoğunluğun %99,78, en düşük yoğunluğun ise %68,64 olarak ölçüldüğü aktarılmıştır. En yüksek ve en düşük gözeneklilik içeren numunelerin gözenekleri 2B ve 3B olarak Şekil 2.42'de paylaşılmıştır.

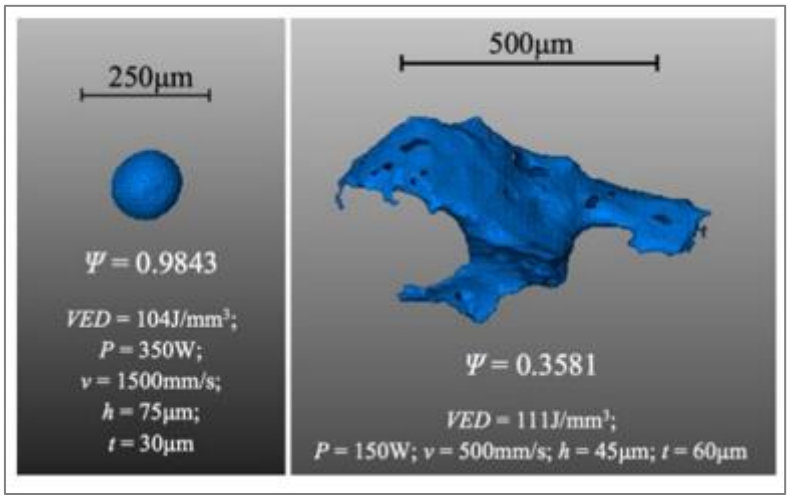


Şekil 2.42. Üstte en yoğun, altta en düşük yoğunluktaki numunelerin gözeneklerinin Mikro-BT ile gösterimi [37]

Tüm numuneler için lazer enerji yoğunluğu ve malzeme yoğunluğu karşılaştırması ise Şekil 2.43'de verilmiştir. Yüksek tarama hızlarında gözenekliliğin eriyik akış kararsızlığından kaynaklandığını ve 150 W lazer gücünde 2500 mm/s tarama hızı kombinasyonu uygulanan tüm numunelerin yoğunluk değerinin %95'den küçük olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen en yüksek yoğunluk değerinin en düşük tarama hızı, en düşük lazer gücü, en düşük tarama aralığı ve en düşük et kalınlığı parametreleri kullanılarak elde edildiğinden bahsedilmiştir. En yüksek yoğunluk değerlerinde kullanılan parametrelerden sadece lazer gücü 350 W'a arttırldığında yoğunluk değeri %98,96'ya düşmüştür. Enerji yoğunluğu artmasına rağmen yoğunluk değerinin düşmesinin nedeni olarak da aşırı ısınma kaynaklı buharlaşma ve oksidasyon gösterilmiştir. Lazer enerji yoğunluğunun gözeneklilik üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için gönenek şekillerini göz önünde bulundurmak gerektiğinden bahsedilmiştir. Gözenek büyüklükleri 50 μm'dan küçük ise çok küçük, 50-100 μm arası ise küçük, 100-150 μm arası ise orta, 150 μm'dan büyük ise çok büyük olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 2.44'den de görüleceği üzere genellikle gözenek boyutu küçüldükçe ortalama küresellik artmaktadır. Deneysel çalışmalarda ulaşılan en yüksek yoğunluk olan %99,78'in elde edilmesini sağlayan 222 J/mm^3 lazer enerji yoğunluğu değerinin, aynı zamanda nispeten düşük yoğunluk değerleri olan %96,74 ve %96,61 yoğunluklarını ürettiği belirtilmiştir. Sadece 95 J/mm^3 kullanılarak neredeyse optimum olan %99,77 yoğunluğun elde edilmesinin üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda tek başına lazer enerji yoğunluğunun yoğunluk değerini optimize edemeceği ortaya koyulmuştur [37].



Şekil 2.43. Farklı parametrelere göre lazer enerji yoğunluğu ve malzeme yoğunluğunun değişimi [37]



Şekil 2.44. Küresel gaz gözeneği ve düzensiz şekilli füzyon kusuru örnekleri [37]

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde topoloji optimizasyonu metodunun eklemeli imalata yönelik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Çalışmalarda, topoloji optimizasyonu uygulanırken tanımlanan tasarım alanı genellikle parçaların son geometrisine dayalı ilerlemektedir. Bu durum da modele kısıtlar oluşturmakta ve optimizasyon performansını düşürmektedir. Bu çalışmada ise orijinal modelin işlenmemiş haldeki zarf boyutlarını içeren bir kütük yapının tasarım alanı olarak kullanılmasıyla bu sorunun üstesinden gelinmiştir. Bunun yanında, literatürdeki benzer çalışmalarda sonlu elemanlar

modeli oluşturulurken, eleman büyüklüğü olarak bir değer seçildiği görülmüştür. Bu durumda, eleman büyüklüğünün çalışmanın sonuçlarına olan etkisi göz ardı edilmektedir. Bu çalışmada, optimizasyon fonksiyonlarının değerleri ve sonlu eleman büyüklükleri değiştirilerek gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarının sonucunda en uygun parametreler belirlenmiştir. Bu sayede sonlu eleman büyüklüğünün sonuçlar üzerindeki etkisi dikkate alınmış ve uygun parametrelerin belirlenmesi ile optimizasyonun performansı artmıştır. Ek olarak ilgili literatürde, optimizasyon sonucunda elde edilen modellerin doğrulanması için genellikle parçaların sadece statik analizinin gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise statik analize ek olarak, parça kopma tipleri açısından da incelendikten sonra emniyetli bulunmuştur. Analiz çalışmalarının daha kapsamlı yapılması sonucunda tasarımlar doğrulanmıştır.

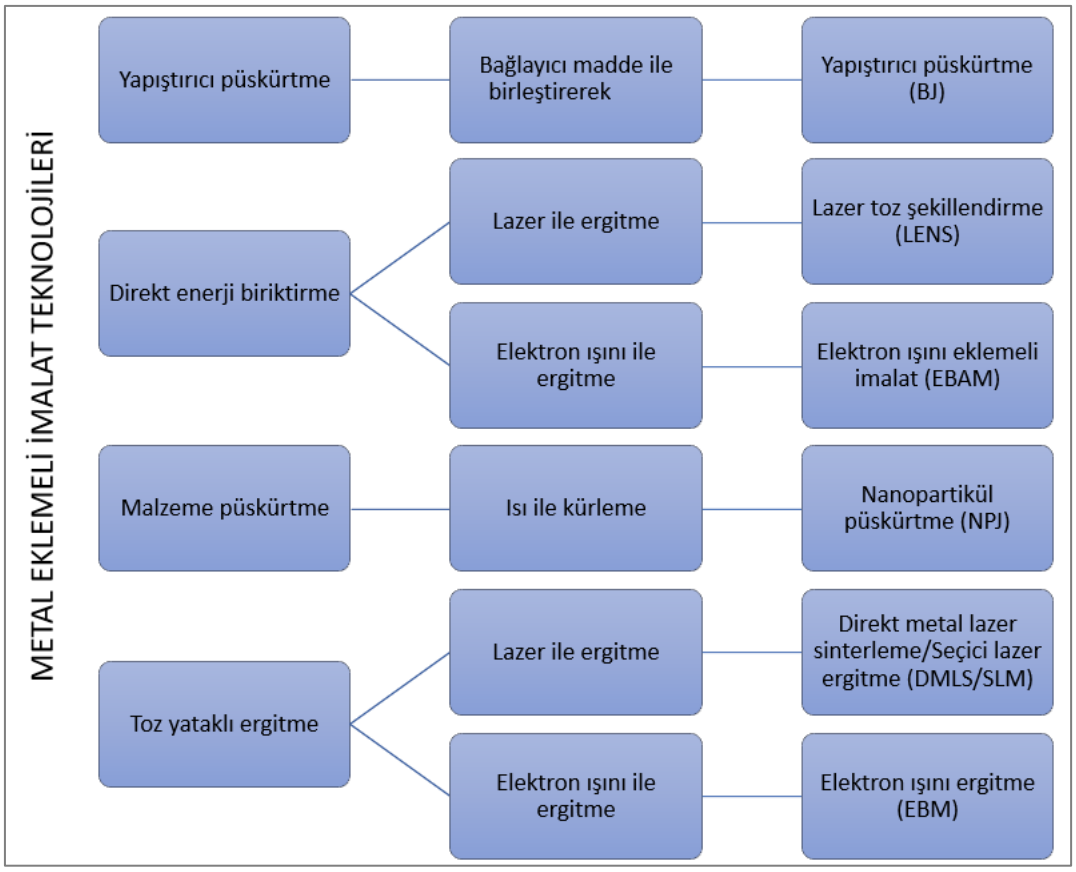
3. KAVRAMSAL BİLGİLER

3.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri ASTM (American Society for Testing Materials) tarafından 7 ayrı kategoride sınıflandırılmıştır. Bunlar yapıştırıcı püskürtme (ing. Binder Jetting), direkt enerji biriktirme (ing. Directed Energy Deposition), malzeme ekstrüzyonu (ing. Material Extrusion), malzeme püskürtme (ing. Material Jetting), toz yataklı ergitme (ing. Powder Bed Fusion), plaka tabakalaştırma (ing. Sheet Lamination) ve fotopolimerizasyon (ing. Vat Photopolymerization) metotlarıdır [38]. Yukarıda paylaşılmış olan ASTM tarafından sınıflandırılması yapılan eklemeli imalat kategorileri plastik, kompozit, kum, kağıt ve metal gibi tüm malzemeleri kapsamaktadır. Yapıştırıcı püskürtme, direkt enerji biriktirme, malzeme püskürtme ve toz yataklı ergitme metotlarında metal parçaların üretimi yapılabilmektedir.

3.2. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri

Metal eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması Şekil 3.1'de paylaşılmıştır [39].



Şekil 3.1. Metal eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması [39]

Metal eklemeli imalat teknolojileri ergime haline göre (sıvı, sıvı–katı gibi), hammadde malzeme türüne göre (toz, tel gibi), malzeme dağıtımına göre (nozul, toz yatağı gibi) veya enerji kaynağına göre (lazer, elektron ışını gibi) de sınıflandırılabilirler [38]. Ek olarak hammaddenin kullanım tekniğine göre toz yatağı teknolojileri ve direkt enerji biriktirme teknolojileri olmak üzere iki gruba ayrılabilirler. Bu tez çalışmasında optimizasyonu yapılan parçalar toz yataklı ergitme metotlarından SLE ile üretime yönelik çalışılmıştır. Bu kapsamda toz yataklı prosesler incelenecektir.

3.2.1. Toz yataklı ergitme yöntemleri

Toz yataklı ergitme yöntemleri direkt metal direkt metal lazer sinterleme (DMLS), seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer ergitme (SLE) ve elektron ışını ile ergitme (EBM) metotlarını içermektedir. Toz yataklı sistemlerde platforma serilmiş olan toz malzemeyi eritmek ve bir araya getirmek için enerji kaynağı olarak lazer veya elektron ışını kullanılır. SLE, SLS ve DMLS metotlarında enerji kaynağı olarak lazer kullanılırken, EBM metodunda enerji kaynağı olarak elektron ışını kullanılmaktadır. SLE ve EBM proseslerinde tozların

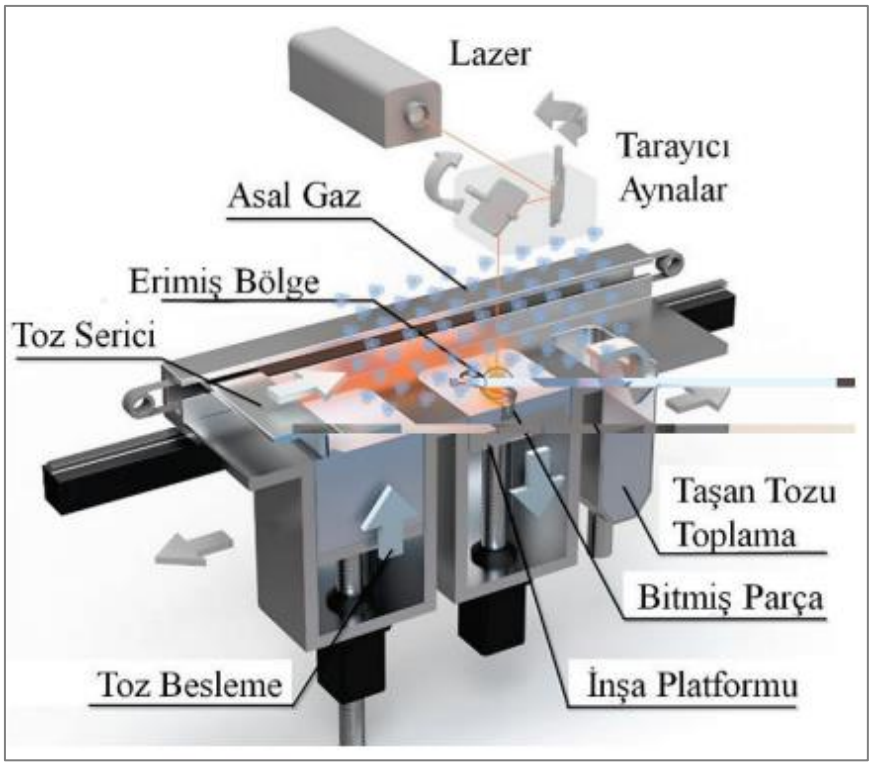
ergitilmesi ile önceki katmanla bağ kurulurken, SLS ve DMLS proseslerinde tozların sinterlenmesi ile bağ kurulur. SLS teknolojisi DMLS ile aynıdır. SLS teknolojisinde polimer ve seramik malzemelerin üretimi yapılırken, DMLS'de metalik malzemelerin üretimi yapılır. EBM ve SLE uygulamalarında da metal tozları kullanılmaktadır. EBM sisteminin inşa alanı vakum altında çalışan kapalı bir kabinle çevriliyken, SLE sisteminin inşa alanı ise bir soy gaz ile doldurulan kapalı bir kabinle çevrilidir [40].

3.2.2. Seçici lazer ergitme

SLE, enerji kaynağı olarak yüksek yoğunluklu lazer kullanılan bir toz yatağında ergitme yöntemi olarak tanımlanmıştır. Bu lazer kaynağının, CAD verileri doğrultusunda seçilmiş bölgelerdeki tozları katman katman erittiği ifade edilmiştir. Bu toz yataklı eklemeli imalat yönteminin ilk olarak 1997 yılında Almanya'da uygulanmıştır ve 1998 yılında patenti alınmıştır. Bu yöntem sayesinde %100 yoğunluğa yakın karmaşık geometrili yapılar elde edilebilmektedir [41]. Bu bölümde bu metodun çalışma prensibine değinilecektir.

Prosesin işleyişi

CAD verisi SLE cihazına aktarılmadan önce destek elemanların atılması ve lazerle taranacak her bir katmanın STL formatındaki dilimlenmiş verisinin oluşturulması için Magics vb. bir yazılımın kullanılmasının gerekmektedir. Üretim işlemi bir katman tozun tablaya toz serici vasıtasıyla serilmesi ile başlamaktadır. Toz serildikten sonra tarayıcı aynalardan yönlendirilen lazer ışını tabla üzerindeki tozları ergitmektedir. Lazer taraması tamamlandıktan sonra platform bir katman kalınlığı kadar aşağı inmektedir ve üretim tablasının üzerine gelecek yeni katmanın tozu serilmektedir. Lazer yeni katmanı tarar ve bu işlem parça tamamlanana kadar devam eder. Parçanın tarama işleminin tamamlanmasının ardından etrafında bulunan tozlar kaldırılır. Son olarak da parça hazneden sökülmektedir [41]. Şekil 3.2'de SLE cihazının makine yerleşimi gösterilmiştir.

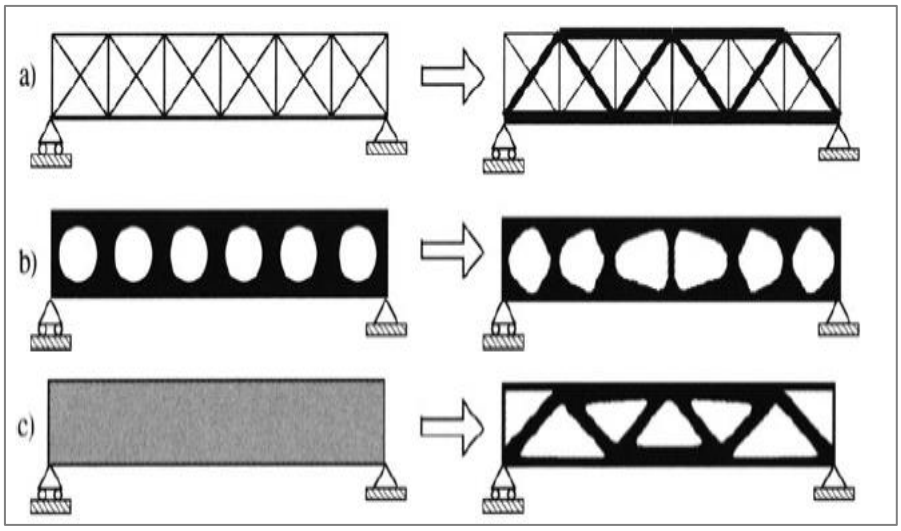


Şekil 3.2. SLE prosesi [42]

SLE işlemi sırasında ısıtılmış metal parçaların oksitlenmesini engellemek amacıyla inert atmosfer oluşturulması gerekmektedir. Bu kapsamda ortama genellikle nitrojen veya argon verilerek kontrollü ortam sağlanmaktadır. Bazı SLE cihazlarının üretim tablasına ya da üretim haznesine ön ısıtma işlemi uygulanabilmektedir [41].

3.3. Yapısal Optimizasyon Metotları

Yapısal optimizasyon metotları 3 ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar boyut, şekil ve topoloji optimizasyonudur. Bu optimizasyon metotları yapısal tasarım probleminin farklı yönlerini ele alırlar [43].



Şekil 3.3. Yapısal optimizasyon türleri a) Boyut optimizasyonu, b) şekil optimizasyonu, c) topoloji optimizasyonu [43]

3.3.1. Boyut optimizasyonu

Boyut optimizasyonu yapısal optimizasyonun en basit şekli olarak değerlendirilmektedir. Bu metotta yapının şekli bilinmektedir ve amaç tasarım değişkenlerinin boyutlarını ayarlayarak yapıyı optimize etmektir. Tasarım değişkenlerine örnek olarak bir rotun çapı, bir kirişin veya sacın et kalınlığı gösterilmektedir. Rotların çapının tasarım değişkeni olduğu boyut optimizasyonu örneği Şekil 3.3a'da verilmiştir [44].

3.3.2. Şekil optimizasyonu

Boyut optimizasyonunda olduğu gibi şekil optimizasyonunda da yapının topolojisi bilinir. Şekil optimizasyonunda tasarım değişkenlerine parçanın dış çevresi, konturu veya deliklerin çapı örnek gösterilebilir. Optimum tasarım için yapının kendi içindeki bağlantısı değiştirilmez, yeni sınırlar oluşturulmaz, delikler kaldırılmaz ancak şekilleri değiştirilebilir. Şekil optimizasyonu örneği Şekil 3.3b'de paylaşılmıştır [44].

3.3.3. Topoloji optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu yapısal optimizasyonun en genel şekli olarak gösterilmektedir. Şekil ve boyut optimizasyonunda olduğu gibi amaç, malzemenin optimum dağılımını bulmaktır. Topoloji optimizasyonunda tasarım alanında bulunan tüm öğeler tasarım değişkenidir. Optimum malzeme dağılımı, tanımlanan yük koşulları ve kısıtlar altında her bir tasarım

elemanın yoğunluğunun değiştirilmesiyle belirlenir. Topoloji optimizasyonu örneği Şekil 3.3c'de gösterilmiştir [44].

Yukarıda da bahsedildiği üzere topoloji optimizasyonu belirli bir yük ve sınır koşulları için tanımlanan tasarım alanında sistem performansını en üst düzeye çıkarmak adına uygulanan bir yapısal optimizasyon metodudur. Bu metotta yük ve sınır koşulları belirlenen tasarım alanı N tane sonlu elemana bölünmektedir. En uygun malzeme dağılımını elde etmek için önceden belirlenmiş olan hedef ve kısıt fonksiyonları kullanılmaktadır. Tüm sonlu elemanlar ρ ile tanımlanan yoğunluklara sahiptirler ve bu yoğunluklar tasarım değişkeni olarak kullanılmaktadır. Yoğunluklar 0 ile 1 arasında değerler alırlar. 0 değerini alan elemanlar yük taşımayan elemanları ifade edip boşluğu temsil ederler, 1 değerini alan elemanlar ise tam yüklü elemanları ifade edip malzemenin varlığını temsil ederler.

Topoloji optimizasyonunda elastik yapılar için pek çok yöntem geliştirilmiştir. En yaygın kullanılan yöntemler aşağıda gösterilmiştir:

- Malzeme dağılımı yöntemi (ing. Material Distribution Method)
- Level set yöntemi (ing. Level Set Method)
- Evrimsel algoritma (ing. Evolutionary Algorithm)
- Malzeme bulutu yöntemi (ing. Material Cloud Method)
- Homojenleştirme yöntemi (ing. Homogenization Method)

Malzeme dağılımı yöntemi literatürde yoğunluk metodu olarak da gösterilmektedir [45].

Topoloji optimizasyonu için yazılım kullanımı

FEM analizi ve yapısal optimizasyon çalışmalarında kullanılan çok sayıda ticari yazılım bulunmaktadır. Altair şirketi tarafından geliştirilen Hyperworks bu yazılımlardan bir tanesidir. Analiz ve optimizasyon için ayrı modüller içermektedir. Bu tez çalışmasında uygulanan topoloji optimizasyonu Hyperworks modülü olan Optistruct ile gerçekleştirilmiştir. Optistruct yapısal bir optimizasyon çözücüsüdür. Meşleme işlemi ve optimizasyon girdileri Hypermesh ile oluşturulmuştur. Optistruct çözücüsünde topoloji optimizasyonu gerçekleştirilirken yoğunluk metodundan türetilmiş olan SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yaklaşımı kullanılmaktadır.

Optimizasyon terminolojileri

Optimizasyon için temel terminolojilerin tanımı aşağıda gösterilmiştir:

- Tasarım alanı: Optimizasyon kısıtlarına göre malzemenin çıkarıldığı alan.
- Tasarım dışı alan: Optimizasyondan sonra sabit kalan alan.
- Tasarım değişkenleri: SIMP metodu ile gerçekleştirilen bir topoloji optimizasyonu için her bir elemanın malzeme yoğunluğu tasarım değişkeni olarak kullanılmaktadır.
- Kısıt fonksiyonu: Uygulanabilir bir tasarım için, optimizasyonun tanımlanmış yanıtını sınırlar. Kütle veya hacim oranı için bir aralık tanımlanması örnek olarak gösterilebilir.
- Hedef fonksiyonu: Optimize edilecek yanıtın fonksiyonudur. İlgili yanıt için en düşük veya en yüksek değer tanımlanabilir. Kompliansı ya da hacmi minimum tutmak örnek olarak gösterilebilir.

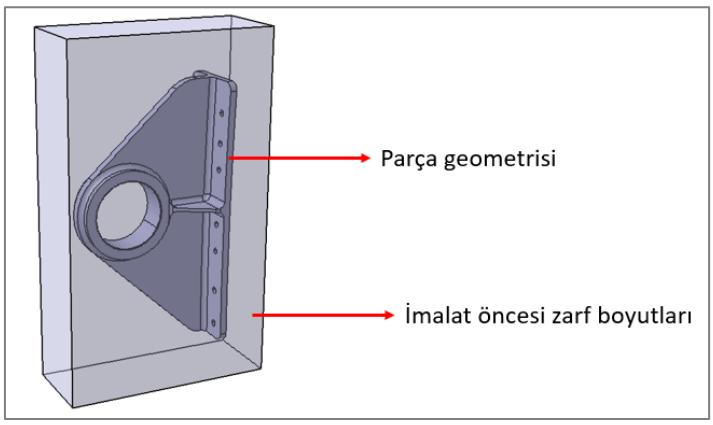
4. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU VE ANALİZ

4.1. Model Belirleme

Eklemeli imalat yöntemleri konvansiyonel imalat yöntemlerine göre çok daha az artık malzeme çıkarmaktadır. Geleneksel imalat mantığına göre modelin imalat öncesi zarf boyutlarını içeren işlenmemiş hacminin son model hacmine oranı satın al ve uç oranı (ing. Buy to Fly Ratio) şeklinde tanımlanmaktadır. Geleneksel imalat ile işlenen havacılık parçalarının satın al ve uç oranı 12 ile 25 arasındayken, eklemeli imalat ile üretilen parçalarda bu oran 1,5'e kadar düşürülebilmektedir [7]. Bu oranın düşük tutulması ile havacılık ve uzay alanında kullanılan pahalı hammaddelerin daha az harcanarak üretim maliyetlerinin düşürülmesi sağlanmaktadır. Bu kapsamda optimizasyonu yapılacak parça belirlenirken eklemeli imalat ile üretimi avantajlı kılmak adına yüksek satın al ve uç oranı olan parçalar incelenmiştir. Çizelge 4.1'de bu tez çalışmasında kullanılacak parçanın satın al ve uç oranı ile malzeme bilgileri paylaşılmıştır. Şekil 4.1'de ise parçanın CAD modeli ile yarı-saydam şekilde imalat öncesi zarf boyutları paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1. Konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçanın satın al ve uç oranı

Malzeme	Al7050-T7451
Zarf boyutları	50,8 mm X 240 mm X 130 mm
Zarf kütlesi	4,470 kg
Talaş kütlesi	4,205 kg
Son kütle	0,265 kg
Son hacim	94,14 cm^3
Satın al ve uç oranı	16,9



Şekil 4.1. Konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçanın boyutları ve imalat öncesi zarf boyutları

Hava araçlarında yaygın olarak 7000 serisi alüminyum malzemeler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında metal eklemeli imalat yöntemlerinden SLE prosesi ile üretime uygun bir çalışma gerçekleştirilmektedir. Literatür kapsamlı bir şekilde irdelendiğinde Al7050 malzeme kullanılan geleneksel modelin aksine malzeme olarak toz yatağı füzyon proseslerinde yaygın olarak kullanılan AlSi10Mg metal tozu seçilmiştir. Ancak AlSi10Mg tozunun mukavemet değerleri 7000 serisi alüminyumdan daha düşüktür. Bundan ötürü optimizasyonu yapılacak parçada istenilen hafifletme miktarlarını sağlayabilmek adına nihai parçayı belirlerken satın al ve uç oranına ilave olarak parçaların emniyet katsayıları incelenmiştir.

4.1.1. Mevcut tasarımın sonlu elemanlar ile analizi

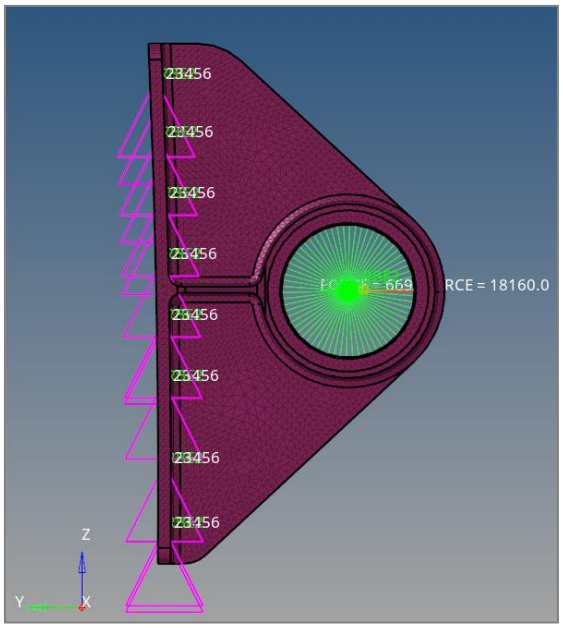
Parça topoloji optimizasyonu yardımıyla yeniden tasarlanmadan önce mevcut tasarımının maruz kaldığı gerilmeleri inceleyebilmek, emniyet katsayısını hesaplayabilmek ve potansiyel malzeme atılabilecek bölgeleri belirleyebilmek amacıyla parçanın sonlu elemanlar yöntemi ile statik analizi gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar modeli Hyperworks yazılımının Hypermesh aracı ile oluşturulmuştur. Optimizasyon modeli ile uyumlu olması için eleman boyutu 2 mm seçilmiştir. 83940 adet 3 boyutlu TET10 eleman ile model oluşturulmuştur. Parçanın bağlayıcı bağlantıları ve yükleme noktası için bir boyuta sahip RB2 elemanlar oluşturulmuştur.

Parçanın maruz kalacağı yükler ile sınır koşulları parçanın çalışma mekanizması ve aerodinamik yüklere göre önceden belirlenmiştir. Çizelge 4.2'de parçanın maruz kaldığı yük koşulları paylaşılmıştır. Parçanın maruz kaldığı limit yük koşulları havacılık sanayii isterleri doğrultusunda 1,5 ile çarpılarak nihai yük durumları elde edilmiştir. Bağlayıcı lokasyonlarında bulunan merkez düğüm noktalarına yerleştirilen kısıtlamalar ile parçanın 3 eksendeki öteleme ve dönme hareketleri kısıtlandırılmıştır. Şekil 4.2'de parçanın sonlu elemanlar analizi modeli paylaşılmıştır.

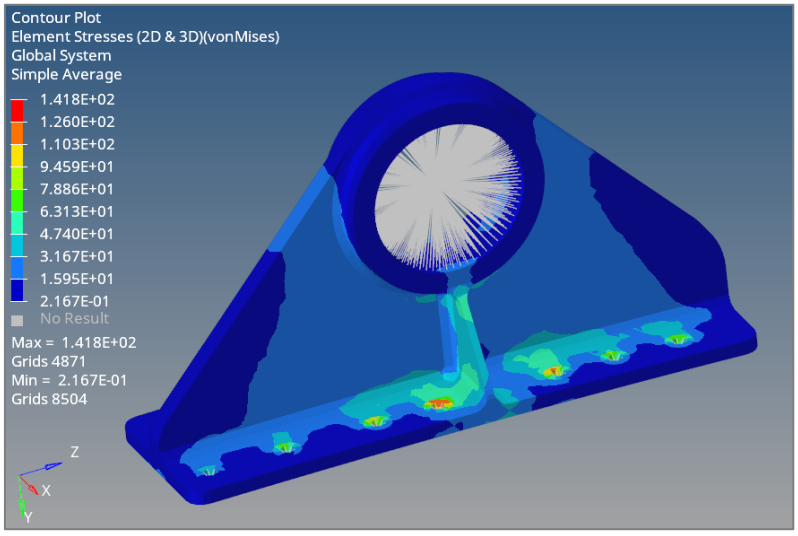
Çizelge 4.2. Hava aracı koordinat sistemine göre yük durumları

	P_x (N)	P_y (N)	P_z (N)
Yük Durumu 1	0	18160	0
Yük Durumu 2	0	-6696	0



Şekil 4.2. Parçanın Hyperworks programında oluşturulan analiz modeli

Yük durumlarının tanımlanmasının ardından modelin statik analizi Altair Optistruct modülü ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise Altair Hyperview aracı ile görüntülenip incelenmiştir. Analiz çalışmalarında her iki yük durumuna da yönelik çözümler gerçekleştirilmiştir ancak kritik yük koşulu yük durumu 1 olduğu için sonuçlar bu yük durumu üzerinden irdelenmiştir. Parçanın statik analiz sonucunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.3'de paylaşılmıştır. Çizelge 4.3'de ise malzemenin çekme dayanımı, parçanın maruz kaldığı maksimum Von Mises gerilmesi değeri ve mevcut tasarımın emniyet katsayısı verilmiştir.



Şekil 4.3. Mevcut tasarımın Von Mises gerilme dağılımı

Çizelge 4.3. Mevcut tasarımın statik analiz sonuçları

Maksimum Von Mises Gerilmesi (MPa)	Al7050 alaşımının Çekme Dayanımı (MPa)	Emniyet Katsayısı
141,8	510	3,6

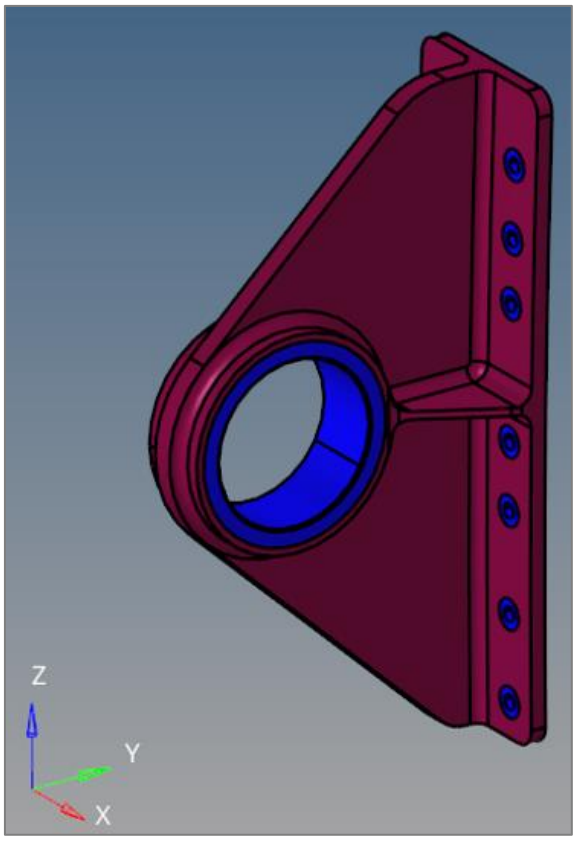
4.2. Topoloji Optimizasyonu

Aşağıdaki optimizasyon işlemleri kapsamında paylaşılan şekillerde gösterilen tüm koordinat sistemleri parçanın hava aracı üzerindeki konumunu temsil etmektedir.

4.2.1. Optimizasyon basamakları

Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

Optimizasyon için tasarım alanı ve tasarım dışı alan belirlenirken parçanın çalışma fonksiyonu, bağlayıcıların lokasyonları, bağlayıcıların boyutları ve monte edilebilirliği göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 4.4’de mavi ile gösterilen bölgeler tasarım dışı alanları temsil ederken, bordo ile gösterilen kısımlar ise optimizasyona dahil edilen tasarım alanını temsil etmektedir.



Şekil 4.4. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

Sonlu elemanlar modeli

Aynı işlem mevcut tasarımın sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için de gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonda farklı olarak tasarım alanı ve tasarım dışı alan olmak üzere iki farklı bileşen tanımlanmıştır. Optimizasyon parametrelerini çeşitlendirmek ve meş boyutunun optimizasyona etkisini inceleyebilmek amacıyla beş farklı eleman büyüklüğü kullanılarak farklı modeller oluşturulmuştur. Çizelge 4.4'de modellerin eleman büyüklüğü ve eleman sayıları paylaşılmıştır.

Çizelge 4.4. Modellerde kullanılan eleman büyüklükleri ve eleman sayıları

Sonlu eleman büyüklüğü (mm)	Toplam eleman sayısı
1,0	473455
1,5	176767
2,0	83924
3,0	37874
4,0	20699

Malzeme özellikleri

Tezgah üreticisi ve aynı zamanda AlSi10Mg tozunun tedarikçisi olan EOS firmasının sağladığı malzeme özellikleri dokümanı sayesinde Hypermesh'de gerekli malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bu tanımlar Çizelge 4.5'de paylaşılmıştır [46].

Çizelge 4.5. Hypermesh'de tanımlanan AlSi10Mg malzeme özellikleri

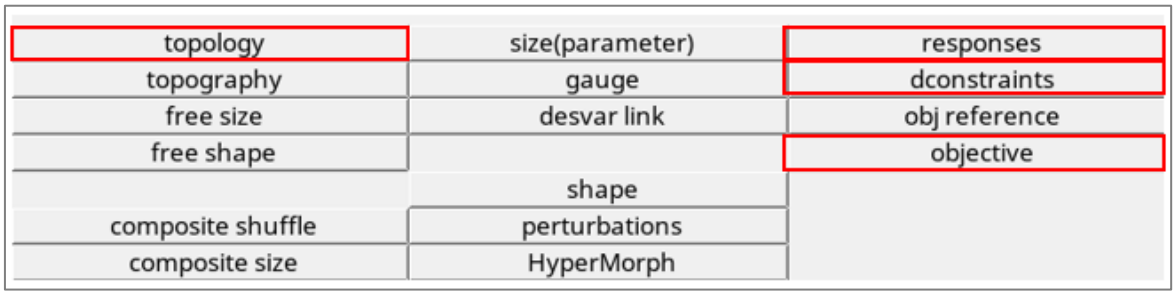
E (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (g/cm^3)
71	0,33	2,67

Yük koşulları

Çizelge 4.2'de daha önce paylaşılan yük koşulları geçerlidir.

Optimizasyon parametreleri

Optimizasyon değişkenlerini oluşturmak için Hypermesh programında analiz sekmesinin altında bulunan optimizasyon paneli seçilir. Optimizasyon paneli seçildikten sonra optimizasyon için yeni bir menü ortaya çıkar. Tasarım değişkenleri, cevap, kısıt ve hedef fonksiyonları Şekil 4.5'de gösterilen bu menü üzerinden tanımlanmaktadır.

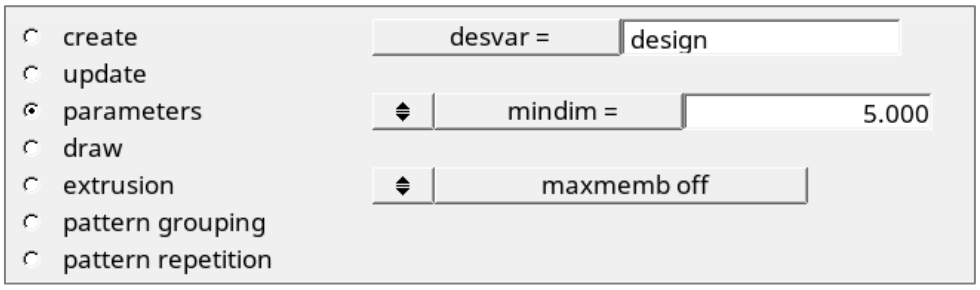


Şekil 4.5. Hypermesh programında bulunan optimizasyon paneli

Tasarım değişkenleri topoloji menüsü altında oluşturulmuştur. Şekil 4.4'de gösterilen bordo kısımlar tasarım bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada tasarım değişkeni olarak minimum eleman büyüklüğü eklenilmesine karar verilmiştir. Minimum eleman büyüklüğü değişkeni üretim kısıtlamalarının üstesinden gelmek ve parçanın yapısal bütünlüğünü sağlamak için kullanılmaktadır. Minimum eleman boyutunun, sonlu elemanlar boyutundan

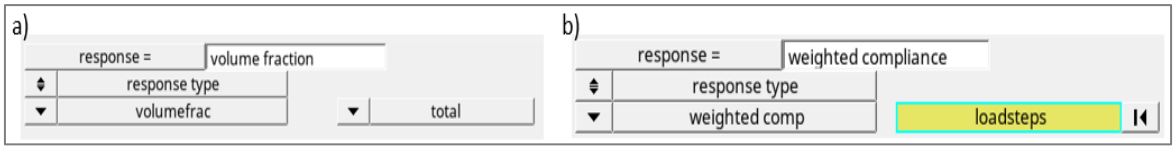
2 ila 3 kat arası daha büyük olması önerilmektedir. Bu çalışmada da bu katsayı 2,5 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4'de gösterildiği üzere beş farklı sonlu eleman boyutu kullanılmıştır. Her biri için minimum eleman boyutu ayrı tasarım değişkeni olarak girilmiştir. 2 mm sonlu eleman büyüklüğü olan model için minimum eleman büyüklüğünün tasarım değişkeni olarak tanımlanması Şekil 4.6'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.6. 2 mm sonlu eleman büyüklüğü olan modelin tasarım değişkeninin tanımlanması

Kısıt ve hedef fonksiyonlarının tanımlanabilmesi için öncelikle cevap fonksiyonlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda öncelikle Şekil 4.5'de gösterilen optimizasyon panelinden cevaplar menüsüne girilmiştir. Kısıt fonksiyonu için cevap olarak hacim oranı oluşturulurken, hedef fonksiyonu için de komplians oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. Cevap fonksiyonlarının tanımlanması a) hacim oranı, b) komplians

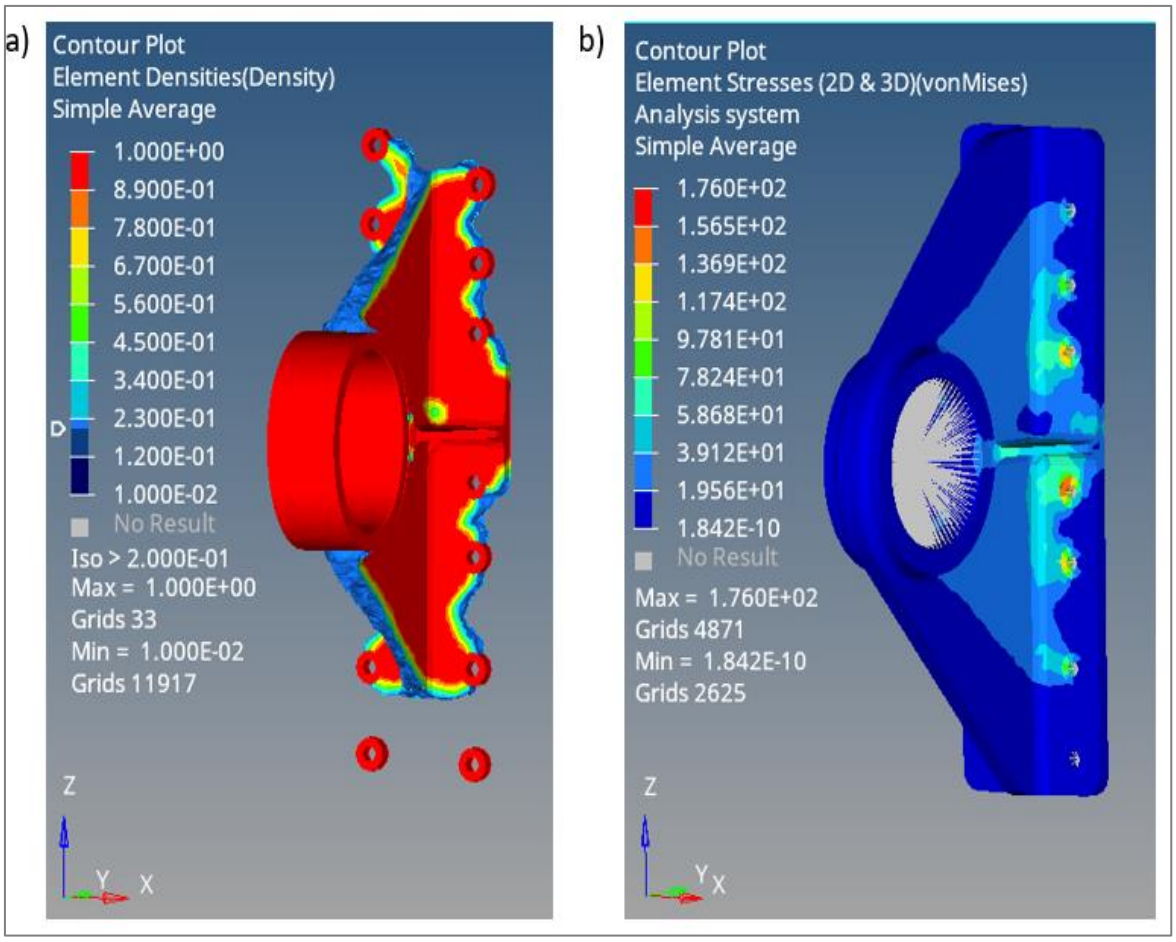
Kısıt fonksiyonu için kullanılan hacim oranına alt ve/veya üst değer belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda bu değeri belirleyebilmek adına Çizelge 4.4'de paylaşılan beş farklı sonlu eleman büyüklüğüne sahip model için üst değer olarak üç farklı hacim oranında toplam on beş adet topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Hedef fonksiyonu olarak ise komplians minimizasyonu kullanılmıştır ve bu parametre sabit tutulmuştur. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan parametreler Çizelge 4.6'da gruplandırılmıştır.

Çizelge 4.6. Gerçekleştirilen topoloji optimizasyonlarının parametreleri

Topoloji optimizasyonu	Sonlu eleman büyüklüğü (mm)	Minimum eleman büyüklüğü (mm)	Hacim oranı (üst sınır)
1	4,0	10,00	0,3
2	4,0	10,00	0,4
3	4,0	10,00	0,5
4	3,0	7,50	0,3
5	3,0	7,50	0,4
6	3,0	7,50	0,5
7	2,0	5,00	0,3
8	2,0	5,00	0,4
9	2,0	5,00	0,5
10	1,5	3,75	0,3
11	1,5	3,75	0,4
12	1,5	3,75	0,5
13	1,0	2,50	0,3
14	1,0	2,50	0,4
15	1,0	2,50	0,5

4.2.2. Optimizasyon parametrelerinin değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinin ardından optimizasyonlar için belirlenen iso yoğunluk değeri için parçanın modeli, oluşan modelin hacmi ve bu modelin maruz kaldığı gerilmeler incelenmiştir. 9 numaralı topoloji optimizasyonun 0,2 iso yoğunluk değeri için optimizasyon modeli ve parçanın Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.8'de paylaşılmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen diğer on dört optimizasyon çalışmasının tanımlanan iso değeri için oluşan optimizasyon modelleri ve Von Mises gerilme dağılımları EK-1'de verilmiştir. Çizelge 4.7'de çalışmanın sonuçları bir arada paylaşılmıştır.

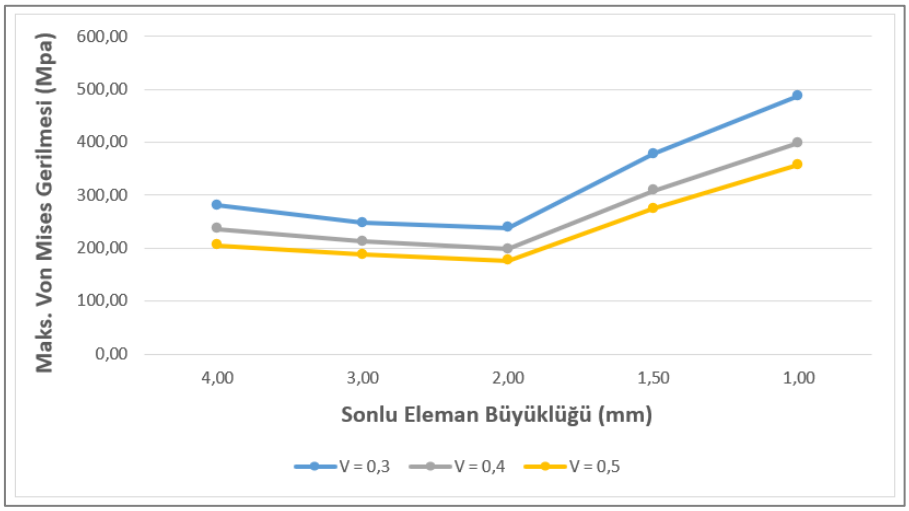


Şekil 4.8. a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

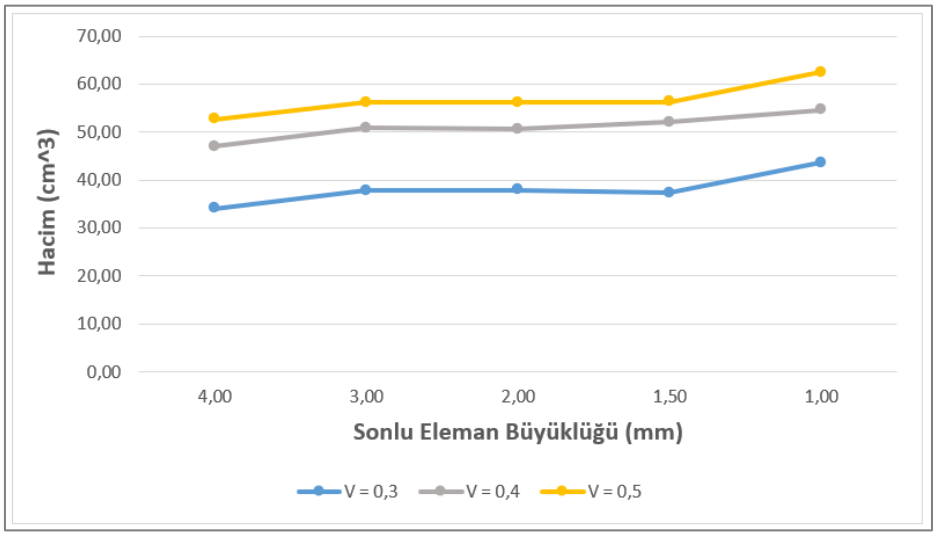
Çizelge 4.7. Gerçekleştirilen topoloji optimizasyonlarının sonuçları

Topoloji optimizasyonu	Toplam hacim (cm^3)	Maksimum Von Mises gerilmesi (MPa)
1	34,02	280,40
2	46,97	235,90
3	52,73	205,30
4	37,82	247,20
5	50,9	212,80
6	56,14	187,90
7	37,98	238,70
8	50,58	198,40
9	56,18	176,00
10	37,31	377,40
11	52,08	308,30
12	56,28	274,80
13	43,66	487,20
14	54,57	398,30
15	62,45	357,20

Optimizasyon çalışmalarında kullanılan her bir sonlu eleman değeri için, kısıt fonksiyonu olarak tanımlanan farklı hacim oranlarının uygulanması ile ortaya çıkan maksimum Von Mises değerleri Şekil 4.9'da paylaşılan grafikte verilmiştir. Şekil 4.10'da sunulan grafikte ise aynı parametrelerin uygulanmasının hacim üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Sonlu eleman büyüklüğü ve hacim oranı değişiminin Von Mises gerilmelerine etkisi



Şekil 4.10. Sonlu eleman büyüklüğü ve hacim oranı değişiminin toplam hacme etkisi

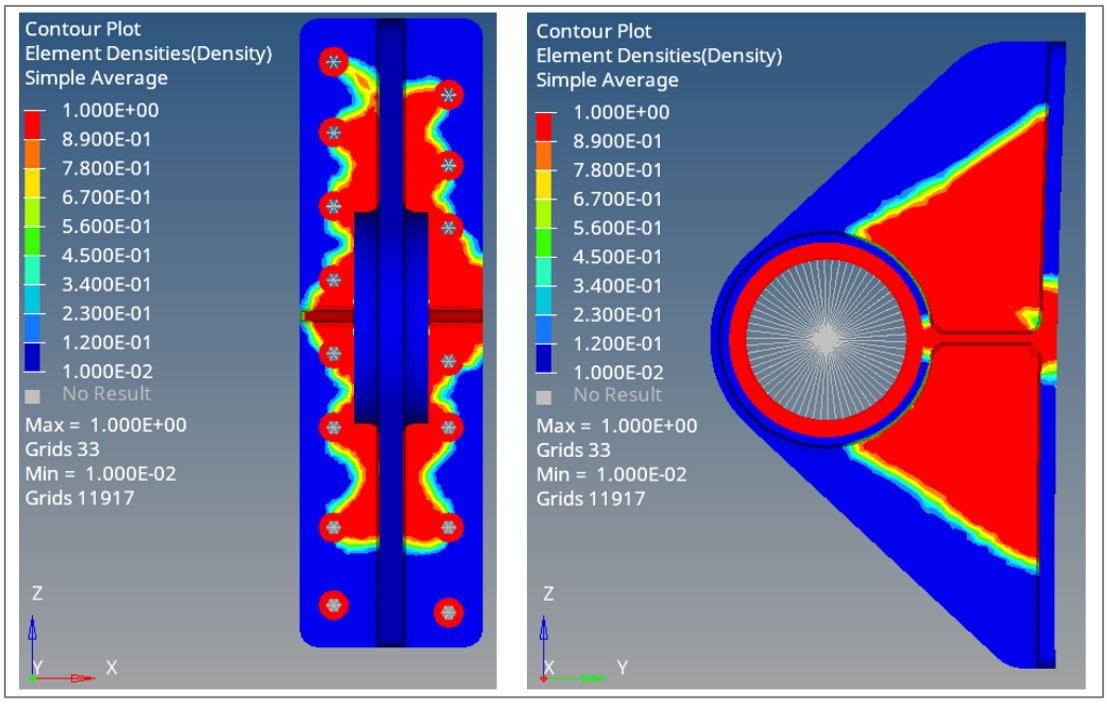
Şekil 4.9 incelendiğinde sonlu eleman büyüklüğü belirli bir değere kadar küçüldüğünde modelde görülen maksimum Von Mises gerilmesinin azaldığı görülmüştür. 4, 3 ve 2 mm değerleri için grafik uyumlu gözükmektedir ancak 1,5 ve 1 mm sonlu eleman boyutu kullanıldığında ortaya çıkan gerilme değerlerinde büyük miktarda artış görülmektedir. Bu

büyük artış gerilme konsantrasyonu yüksek bölgeye fazla yakın değerlerin okunmasından kaynaklanmaktadır. Bağlayıcı deliklerinin etrafında görülen gerilme konsantrasyonu yüksek bölgelerin analizi ayrıca gerçekleştirilecektir. Bu kapsamda 2 mm sonlu eleman boyutu kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir. Hacim oranı olarak da konservatif bir yaklaşımla daha düşük gerilme değerleri elde edilen 0,5 değerinin kullanılması uygun görülmüştür.

Şekil 4.10. incelendiğinde ise oluşan son hacimlerin direkt olarak hacim oranı parametresinin katları şeklinde ortaya çıkmadığı görülmüştür. Aradaki farkın nedeni olarak son modeli belirlerken iso yoğunluk değerini değiştirmenin model hacmini etkilemesi gösterilmiştir. Sonlu eleman boyutunun 1,5 , 2 ve 3 mm değerleri için optimizasyonda uygulanan hacim oranları sonucunda neredeyse aynı hacim büyüklüğünün elde edildiği, 4 mm değerinde diğer eleman büyüklüklerinin biraz altında kaldığı ve son olarak 1 mm değerinde ise yukarı yönlü sapmalar oluştuğu görülmüştür. Bu grafiğin de ilk grafik çıktılarını destekler şekilde çıkması ile nihai optimizasyon parametreleri belirlenmiştir.

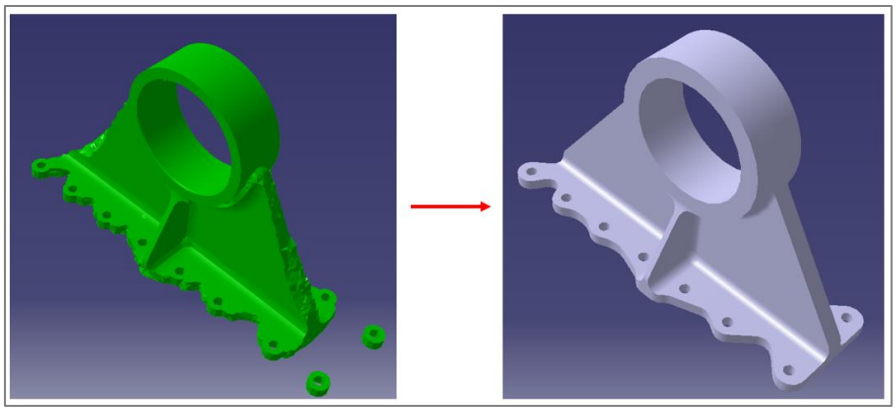
4.2.3. Yeniden modelleme

Yeniden modelleme işlemi öncesi optimizasyon sonuçları Hyperview modülü ile detaylı şekilde incelenmiştir. Şekil 4.11’de modelin 0 ile 1 arasındaki yoğunluk değerleri paylaşılmıştır.



Şekil 4.11. Parçanın yoğunluk değerleri (üstten bakış, yandan bakış)

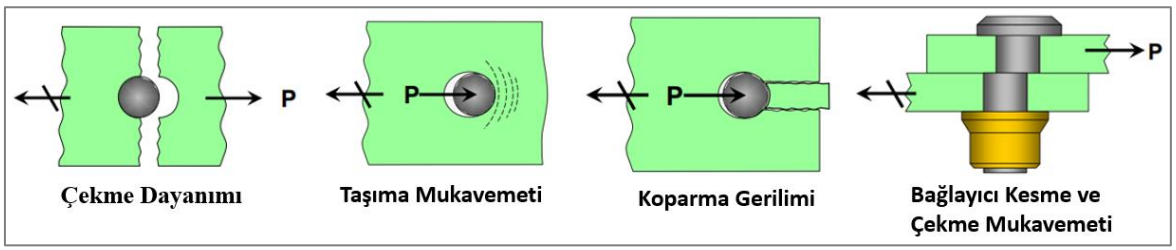
4.2.2 başlığında da aktarıldığı üzere iso değeri olarak 0,2 değeri alınmıştır. Ardından yeniden modellemenin tasarıma başarıyla yansıtılabilmesi için Hyperview'da incelenen model STL formatında dışarı alınarak Catia ortamına aktarılmıştır. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere optimizasyon sonucunda parçanın bağlayıcılarında azaltılma yapılmasına karar verilmiştir. Yeniden modelleme sonrası gerçekleştirilecek analizlerde parça emniyetli bulunmazsa bu aşamaya geri dönülecektir. Şekil 4.12'de STL veri baz alınarak oluşturulan parça tasarımı paylaşılmıştır. Ortaya çıkan yeni tasarımın ağırlığı 172 g'dır ve ilk tasarımdan %35 daha az ağırlığa sahiptir. Optimizasyon çalışmaları devam edeceğinden bu modelin model-1 diye isimlendirilmesine karar verilmiştir.



Şekil 4.12. Parçanın yeniden modellenmesi

4.2.4. Model-1'in analizi

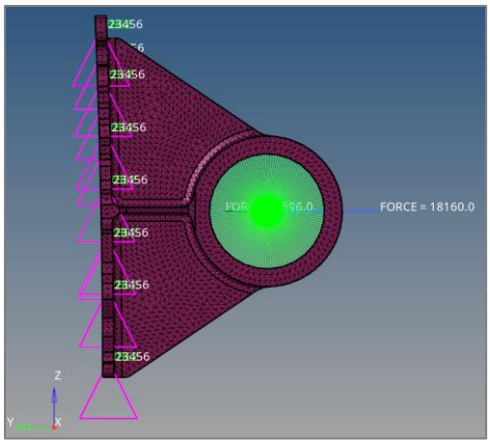
Optimizasyon çıktıları doğrultusunda yeniden modellenen parçanın aynı yük koşulları için emniyetli olup olmadığının tekrar değerlendirilmesi gereklidir. Bu kapsamda yeni modelin öncelikle statik analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından parça çekme dayanım yetmezliği, taşıma dayanım yetmezliği ve koparma dayanım yetmezliği açısından değerlendirilmiştir. Son olarak da parçasının bağlayıcıları bağlayıcı kesme ve çekme dayanım yetmezliği üzerinden incelenmiştir. Parça ve bağlayıcıların maruz kalabileceği kopma tipi gösterimleri Şekil 4.13'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.13. Parça ve bağlayıcılarının kopma gösterimleri

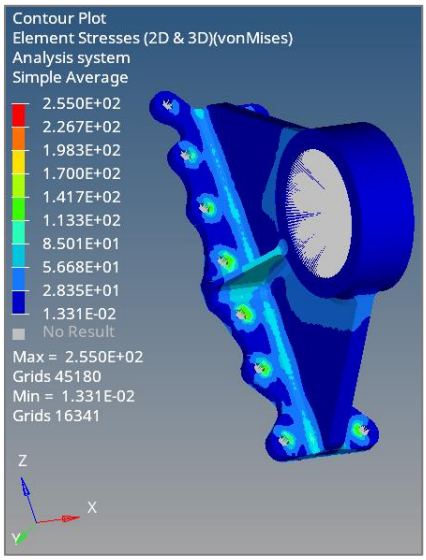
Statik analiz

4.1.1 başlığında mevcut tasarım için oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile benzer şekilde aynı kısıtlar ve girdiler için yeniden modellenen parçanın sonlu elemanlar modeli Hyperworks yazılımının Hypermesh aracı ile oluşturulmuştur. Malzeme olarak ise optimizasyonda da kullanılan AlSi10Mg metal tozu tanımlanmıştır. Optimizasyon modeli ve mevcut tasarımın sonlu elemanlar modeli ile uyumlu olması için eleman boyutu yine 2 mm seçilmiştir. 54674 adet 3 boyutlu TET10 eleman ile model oluşturulmuştur. Çizelge 4.2'de paylaşılan yükler yine aynı şekilde uygulanmıştır. Şekil 4.14'de oluşturulan analiz modeli paylaşılmıştır.



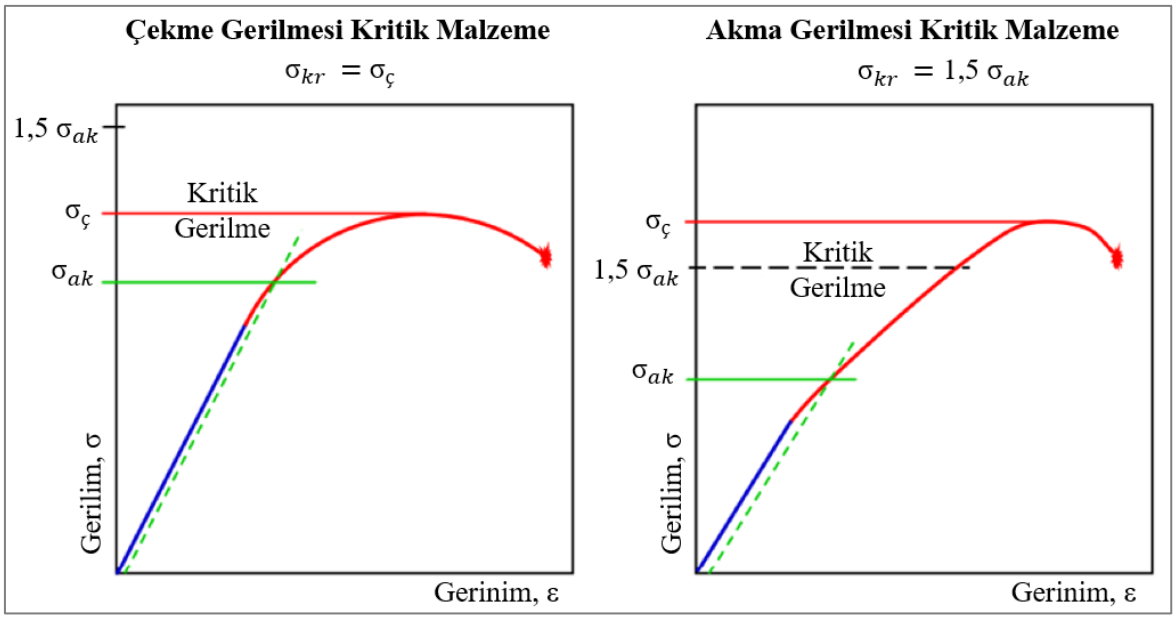
Şekil 4.14. Model-1'in Hyperworks programında oluşturulan analiz modeli

Modelin statik analizi yine önceki model ile benzer şekilde Altair Optistruct modülü ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar da Altair Hyperview aracı ile görüntülenmiştir. Kritik yük koşulu olan yük durumu 1 için elde edilen Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.15'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.15. Model-1'in Von Mises gerilme dağılımı

Parçanın emniyet katsayısını belirleyebilmek amacıyla öncelikle parçada kullanılan malzemenin kritik gerilmesinin akma gerilmesi mi çekme gerilmesi mi olduğu incelenmiştir. Şekil 4.16'da iki malzeme tipinin de gerilme gerinim eğrileri paylaşılmıştır.



Şekil 4.16. Çekme gerilmesi kritik malzemenin ve akma gerilmesi kritik malzemenin gerilme gerinim eğrileri

AlSi10Mg metal tozunun akma ve çekme gerilmesi değerleri aşağıda verilmiştir [46].

σ_{ak}= 230 MPa

$\sigma_ç$ = 460 MPa

1,5σ_{ak} = 345 MPa

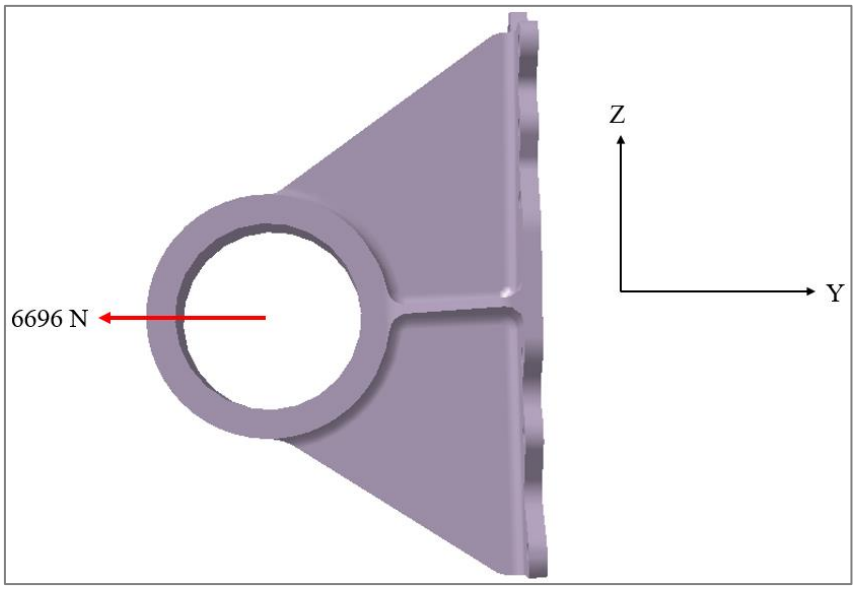
AlSi10Mg malzemesinin 1,5 σ_{ak} değeri $\sigma_ç$ değerinden küçük olduğu için bu malzeme akma gerilmesi kritik malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bundan dolayı kritik gerilme 1,5σ_{ak} değerine eşit olacaktır. Çizelge 4.8'de malzemenin kritik dayanımı, yeni tasarımın maruz kaldığı maksimum Von Mises gerilmesi değeri ve emniyet katsayısı verilmiştir.

Çizelge 4.8. Model-1'in statik analiz sonuçları

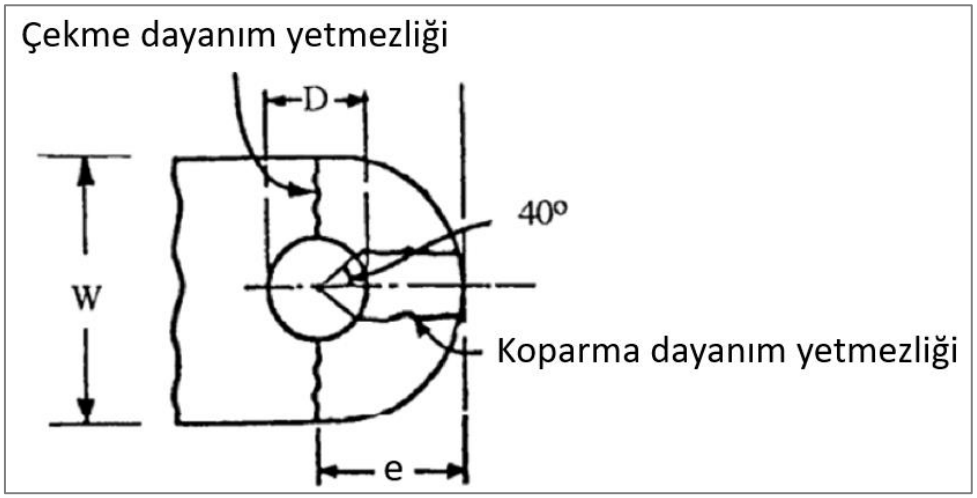
Maksimum Von Mises Gerilmesi (MPa)	AlSi10Mg Malzemesinin Kritik Dayanımı (MPa)	Emniyet Katsayısı
255	345	1,35

Çekme dayanım yetmezliği

Şekil 4.17'de çeki kuvveti olan yük 2'nin parça üzerinde uygulanışı gösterilmiştir. Şekil 4.18'de ise bu kulak bölgesinde oluşabilecek olan kopma tipleri gösterilmiştir [47].



Şekil 4.17. Yük 2'nin parçaya uygulanması



Şekil 4.18. Kulak kopma tipleri [47]

Parçada çekme dayanım yetmezliği kaynaklığı oluşabilecek bir kopmanın önüne geçmek için öncelikle parçada yükün yönüne dik gelen en zayıf alanda taşınabilecek yük kapasitesi hesaplanmıştır. Tanımlanan bu alanın kesiti Şekil 4.19'da verilmiştir. Ardından parça üzerine gelen mevcut çekme yükü ile kıyaslanarak emniyetli olup olmadığı incelenmiştir. Hesaplamalarda Eş. 4.1-4.2 kullanılmıştır [47]:

$$P_{çk} = \sigma_{ak}.A_{net} \tag{4.1}$$

A_{net} = 2(6,5.19,5) = 253,5 mm^2

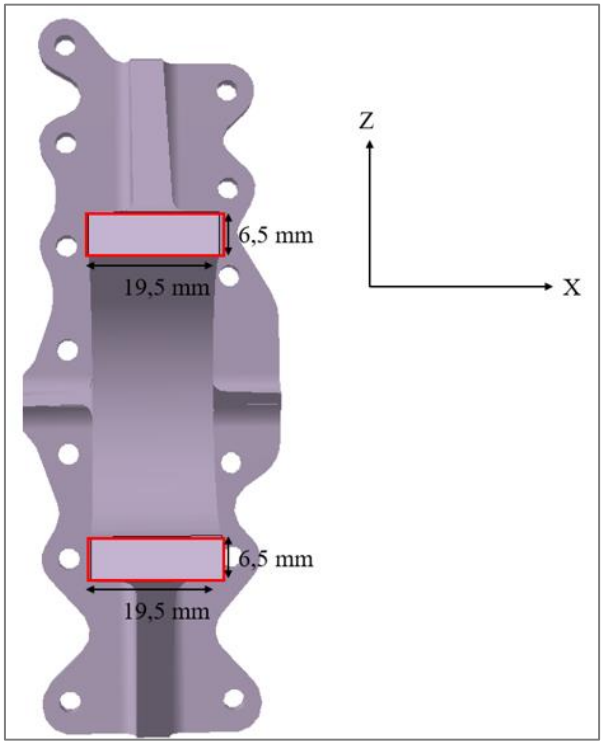
σ_{ak} = 230 MPa

$P_{çk}$ = 230. 253,5 = 58300 N

EK = $P_{çk}$ / $P_{çy}$ (4.2)

EK = 58300/6696 = 8,7

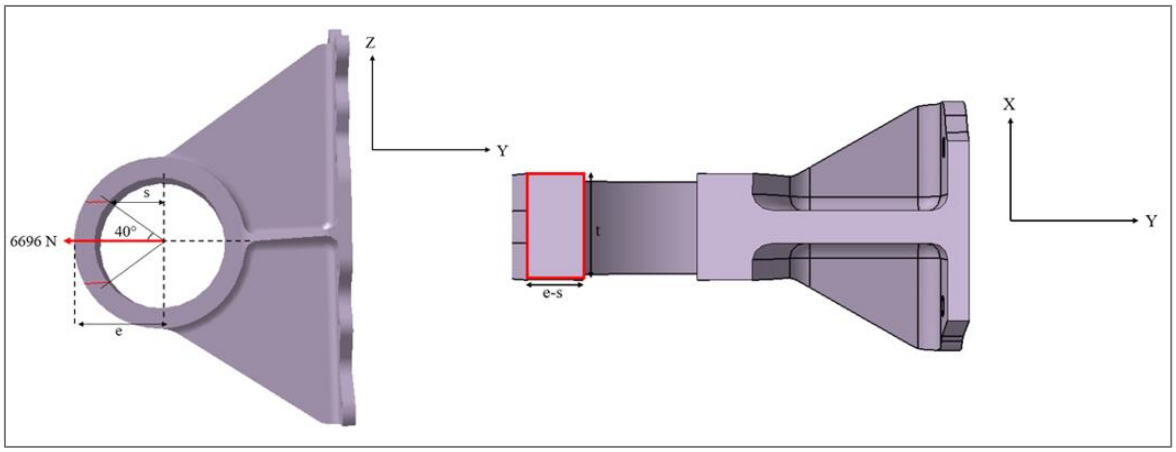
- $P_{çk}$ = Çekme yük kapasitesi
- σ_{ak} = AlSi10Mg malzemenin akma dayanımı
- A_{net} = Net alan
- $P_{çy}$ = Parçaya uygulanan çekme yükü



Şekil 4.19. Çekme dayanımının kesit alanı

Koparma dayanım yetmezliği

Şekil 4.18'de parçanın kulak bölgesinde oluşan kopma tipleri gösterilmişti. Bu kapsamda çekme dayanımın yetmezliğinin incelenmesinin ardından koparma dayanım yetmezliği değerlendirilmiştir. Şekil 4.20'de koparma gerilimi ve kesit alanı paylaşılmıştır.



Şekil 4.20. Koparma dayanımı ve kesit alanı

Parçaya koparma dayanım yetmezliği açısından emniyetli diyebilmek için öncelikli olarak Şekil 4.20'de verilen kesit alanı için koparma yük kapasitesi hesaplanmıştır. Koparma yük kapasitesi hesaplanırken kullanılan σ_{kd} değeri AlSi10Mg tozu için sağlanamadığından akma ve çekme gerilmesi değerleri yakın olan 2024-T3 alüminyum alaşımından sağlanmıştır [48]. Sonrasında parçanın maruz kaldığı çekme yükü ile kıyaslanarak emniyetliliği ortaya koyulmuştur. Hesaplamalar Eş. 4.3-4.5 kullanılarak formülize edilmiştir [47]:

$$P_{kk} = \sigma_{kd} . A_{net} \tag{4.3}$$

$$A_{net} = 2(e\text{-}s)t \tag{4.4}$$

A_{net} = 2[27,5- (0,766. 21)]39 = 445,1 mm^2

σ_{kd} = 269 MPa

P_{kk} = 269. 445,1 = 119730 N

$$EK = P_{kk} / P_{çy} \tag{4.5}$$

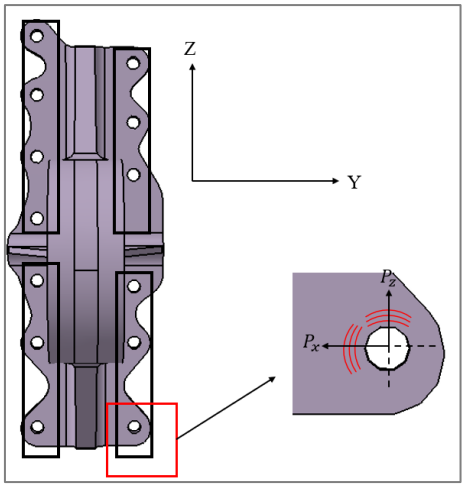
EK = 119730/6696 = 17,9

- P_{kk} = Koparma yük kapasitesi
- σ_{kd} = AlSi10Mg malzemenin kesme gerilmesi dayanımı
- A_{net} = Net alan
- $P_{çy}$ = Parçaya uygulanan çekme yükü

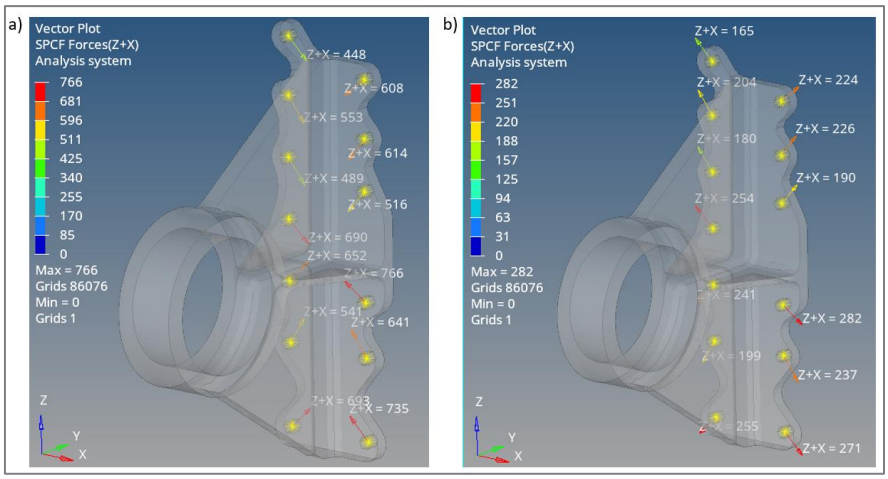
- e = parçanın serbest kenarına uzaklık
- r = delik yarı çapı
- s = r.cos40
- t = et kalınlığı

Taşıma dayanım yetmezliği

Parçada taşıma dayanım yetmezliği kaynaklı bir kopma yaşanıp yaşanmayacağını belirlemek için parçanın bağlayıcı deliklerinde oluşan kesme kuvvetleri incelenmiştir. Şekil 4.21'de gösterildiği üzere bu kopma tipine eksenel kuvvetler etki etmemektedir. Şekil 4.22'de 13 deliğin hepsinde oluşan bileşke kesme kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 4.21. Taşıma mukavemetine etki eden kesme gerilmeleri



Şekil 4.22. Bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri a) yük koşulu 1, b) yük koşulu 2

Bu kopma durumu için emniyet katsayısını hesaplayabilmek amacıyla öncelikle parçanın taşıma yük kapasitesi hesaplanmıştır. Taşıma yük kapasitesi hesaplanırken kullanılan σ_{td} değeri AlSi10Mg tozu için sağlanamadığından akma ve çekme gerilmesi değerleri yakın olan 2024-T3 alüminyum alaşımından sağlanmıştır [48]. Burada kullanılan alan parça kalınlığı ve bağlayıcı çapının çarpımıyla elde edilen dikdörtgensel bir bölgedir. Daha sonra Şekil 4.22'de paylaşılan kesme kuvvetlerinden maksimum olan ile taşıma yükü karşılaştırılarak emniyet katsayısı Eş. 4.6-4.8 kullanılarak hesaplanmıştır [47]:

$$P_{tk} = \sigma_{td}.A_{net} \quad (4.6)$$

$$A_{net} = \text{t.D} \quad (4.7)$$

A_{net} = 4.4 = 16 mm^2
σ_{td} = 503 MPa
P_{tk} = 503. 16 = 8048 N

$$\text{EK} = P_{tk} / V_k \quad (4.8)$$

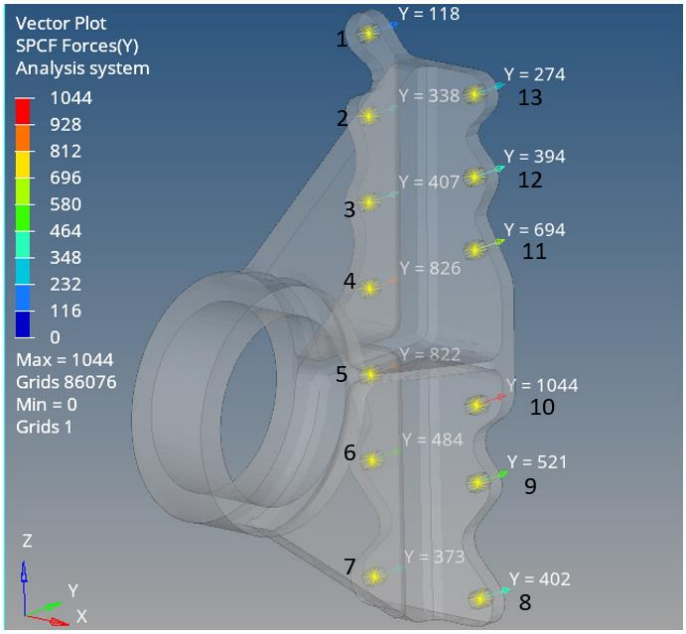
EK = 8048/766 = 10,5

- P_{tk} = Taşıma yük kapasitesi
- σ_{td} = AlSi10Mg malzemenin taşıma gerilmesi dayanımı
- A_{net} = Net alan
- V_k = Parçaya uygulanan kesme kuvveti
- D = bağlayıcı çapı
- t = et kalınlığı

Bağlayıcı kesme ve çekme dayanım yetmezliği

Yukarıda incelenen taşıma dayanım yetmezliğinde bağlayıcı deliklerinin merkezinde oluşan kesme kuvvetleri parçanın malzemesinin dayanımları üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kopma biçiminde ise parçanın montajında kullanılan vidanın dayanımları üzerinden değerlendirilmektedir. Vidaya kesme ve çekme kuvvetleri aynı anda etki ediyorsa kesme ve çekme yüklerinin birlikte etkisi hesaplanmalıdır. Yukarıda paylaşılan Şekil 4.22'de

bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri verilmişti. Yük koşulu 1 bası yükü içerdiğinden sadece yük koşulu 2 için Şekil 4.23'de çekme kuvvetleri verilmiştir. Ek olarak bu şekilde delik numaraları da sunulmuştur.



Şekil 4.23. Yük koşulu 2 için bağlayıcı merkezlerinde oluşan çekme kuvvetleri

Bağlayıcı merkezlerindeki kesme ve çekme kuvvetleri ile bağlayıcının yük taşıma kapasiteleri kıyaslanarak her bir delik için emniyet katsayısı hesaplanmıştır. EN6115 vidasının kesme ve çekme yük kapasitesi değerleri bağlayıcının kendi dokümanından sağlanmıştır [49]. Çizelge 4.9 ve 4.10'da sonuçlar özetlenmiştir. Hesaplamalar Eş. 4.9-4.11 kullanılarak hesaplanmıştır [50]:

$$R_k = V_k / V_{kk} \tag{4.9}$$

$$R_ç = P_{çy} / P_{çk} \tag{4.10}$$

$$\text{EK} = \frac{1}{\sqrt{{R_k}^2 + {R_ç}^2}} \tag{4.11}$$

- R_k = Vida kesme yük oranı
- V_k = Vidaya uygulanan kesme kuvveti
- V_{kk} = Vidanın kesme kuvveti kapasitesi

- $R_{ç}$ = Vida çekme yük oranı
- $P_{çy}$ = Vidaya uygulanan çekme yükü
- $P_{çp}$ = Vidanın çekme yük kapasitesi

Çizelge 4.9. Yük durumu 1 için vidanın emniyet katsayısı

Delik	Kesme kuvveti (N)	Çekme yükü (N)	Emniyet katsayısı
1	448	0	19,8
2	553	0	16,0
3	489	0	18,1
4	690	0	12,9
5	652	0	13,6
6	541	0	16,4
7	693	0	12,8
8	735	0	12,1
9	641	0	13,9
10	766	0	11,6
11	516	0	17,2
12	614	0	14,5
13	608	0	14,6

Çizelge 4.10. Yük durumu 2 için vidanın emniyet katsayısı

Delik	Kesme kuvveti (N)	Çekme yükü (N)	Emniyet katsayısı
1	165	118	45,0
2	204	338	23,9
3	180	407	21,4
4	254	826	11,1
5	241	822	11,2
6	199	484	18,2
7	255	373	20,8
8	271	402	19,4
9	237	521	16,6
10	282	1044	8,9
11	190	694	13,3
12	226	394	20,8
13	224	274	26,3

4.3. Alternatif Topoloji Optimizasyonu-1

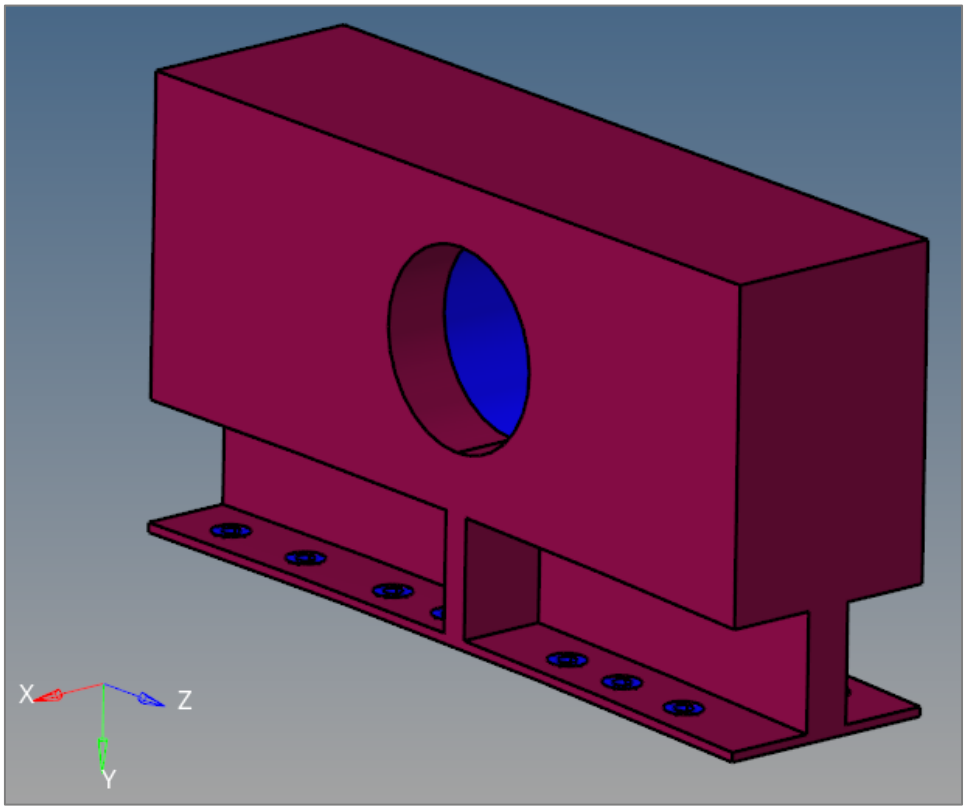
4.2.4 başlığında gerçekleştirilen çalışmalar model-1'in emniyetli olduğunu ortaya koymuştur. Ancak eklemeli imalat ile üretime yönelik bir çalışma gerçekleştirildiğinden daha organik bir model ortaya konulmak istenmektedir. Bunun sonucunda da yapının daha

da hafifleyeceği öngörülmektedir. Bu kapsamda topoloji optimizasyonu çalışmalarının temelde tasarım alanını değiştirerek tekrarlanmasına karar verilmiştir.

4.3.1. Optimizasyon basamakları

Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

Önceki çalışmada orijinal modelin kendisi üzerinden tasarım alanı tanımlandığında modele kendiliğinden kısıtlar yaratıldığı fark edilmiştir. Ondan dolayı yeni tasarım alanı belirlerken parçanın işlenmemiş halindeki zarf boyutları baz alınarak bir kütük yaratılmıştır. Bu kütükten bağlayıcıların montajının gerçekleştirilebilmesi belirli boşaltmalar yapılırken, ortadaki kiriş yapının desteklenebilmesi için tasarım alanına eklenmiştir. Tasarım dışı alan ise sabit tutulmuştur. Şekil 4.24'de bordo ile gösterilen kısım tasarım alanını mavi ile gösterilen kısım ise tasarım dışı alanı temsil etmektedir.



Şekil 4.24. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

Sonlu elemanlar modeli

Bu başlıkta oluşturulan modellerde 4.2.1 başlığından farklı olarak sadece 2 mm sonlu eleman büyüklüğü kullanılarak devam edilmiştir. Tasarım alanının büyümesi sonucunda toplam eleman sayısı 239618'e çıkmıştır.

Malzeme özellikleri – yük koşulları

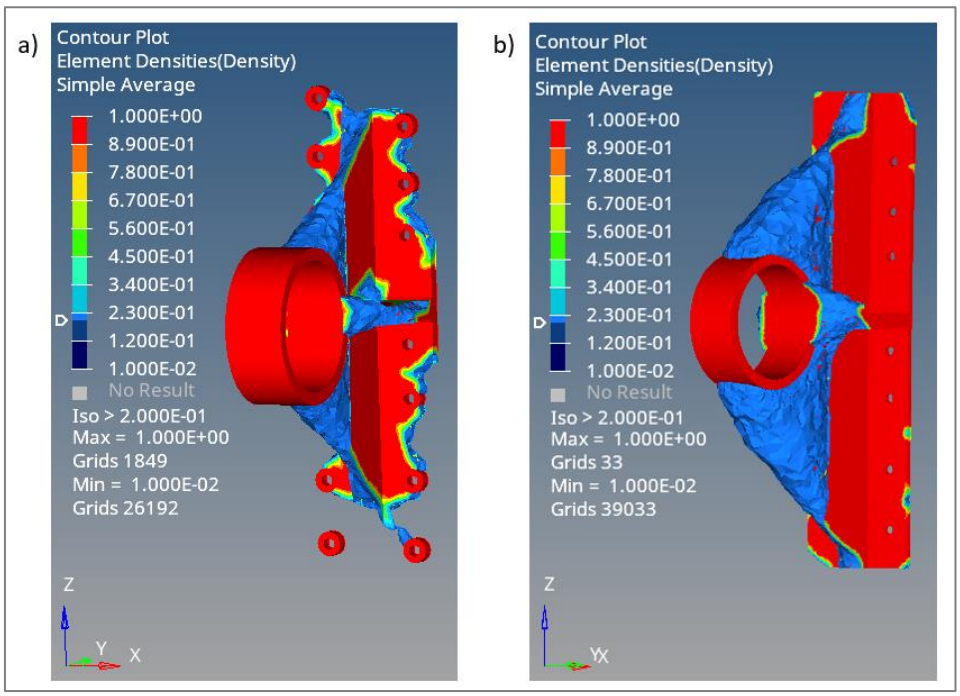
4.2.1 başlığı ile aynı tutulmuştur.

Optimizasyon parametreleri

Sonlu eleman büyüklüğü 2 mm kullanıldığından tasarım değişkeni olarak minimum eleman büyüklüğü 5 mm kullanılmıştır. Hedef fonksiyonu sabit tutulurken, tasarım alanı büyüdüğü için kısıt fonksiyonunda hacim oranı olarak 0,1 ve 0,2 değerleri belirlenmiştir.

4.3.2. Optimizasyonun değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinin ardından belirlenen 0,2 iso yoğunluk değeri için ortaya çıkan modeller Şekil 4.25'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.25. Optimizasyon modelleri a) 0,1 hacim oranı, b) 0,2 hacim oranı

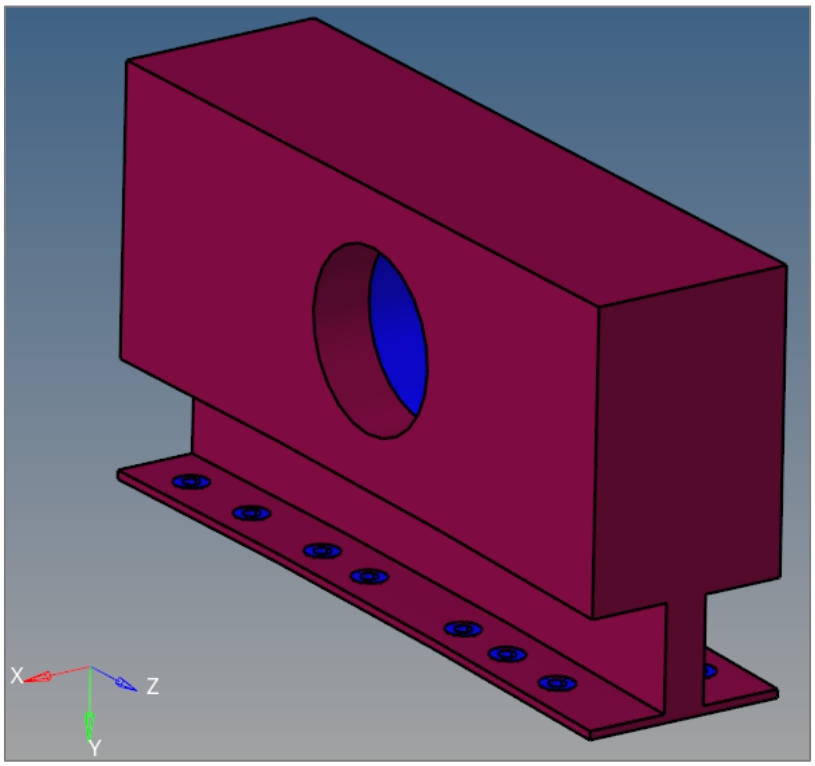
4.4. Alternatif Topoloji Optimizasyonu-2

Alternatif topoloji optimizasyonu-1 sonucunda ortaya çıkan modellerde beklenen organik modelin elde edilememesi sonucunda optimizasyon çalışmalarına devam edilmiştir.

4.4.1. Optimizasyon basamakları

Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

4.3.1 başlığında tanımlanan kütükteki tasarım alanındaki gibi bağlayıcı montajı için boşaltmalar sabit kalırken, ortadaki kiriş kaldırılmıştır. Şekil 4.26'da paylaşılan görselde bordo kısım tasarım alanını, mavi kısım ise tasarım dışı alanı göstermektedir.



Şekil 4.26. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

Sonlu elemanlar modeli

4.3.1. başlığındaki model ile aynı şekilde 2 mm sonlu eleman büyüklüğü kullanılmıştır. Toplam eleman sayısı bir miktar azalarak 234292'ye düşmüştür.

Malzeme özellikleri – yük koşulları

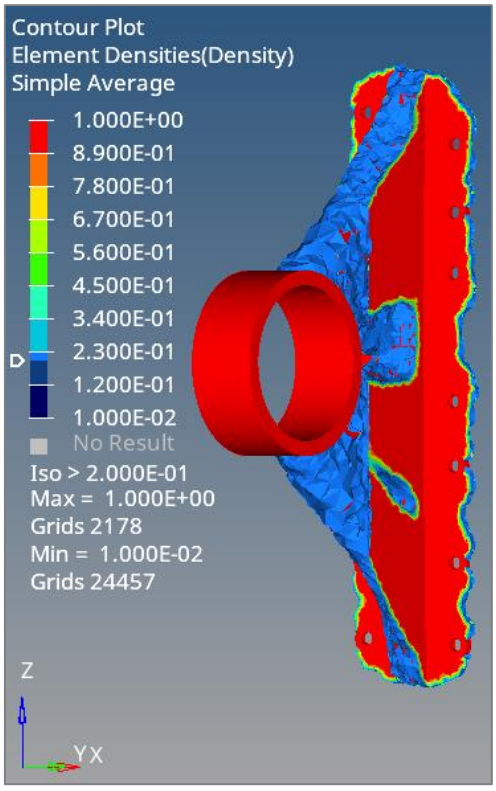
4.2.1 başlığı ile aynı tutulmuştur.

Optimizasyon parametreleri

Sonlu eleman büyüklüğü 2 mm kullanıldığından tasarım değişkeni olarak minimum eleman büyüklüğü 5 mm kullanılmıştır. Hedef fonksiyonu olarak yine komplians minimizasyonu kullanılmıştır. Kısıt fonksiyonu olarak kullanılan hacim oranında ise 0,1 üst değeri belirlenmiştir. Önceki modelde kullanılan 0,2 hacim oranında istenilen boşaltma miktarı sağlanamadığından yalnızca 0,1 değeri ile devam edilmiştir.

4.4.2. Optimizasyonun değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasının ardından 0,2 iso yoğunluk değeri için ortaya çıkan model Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli

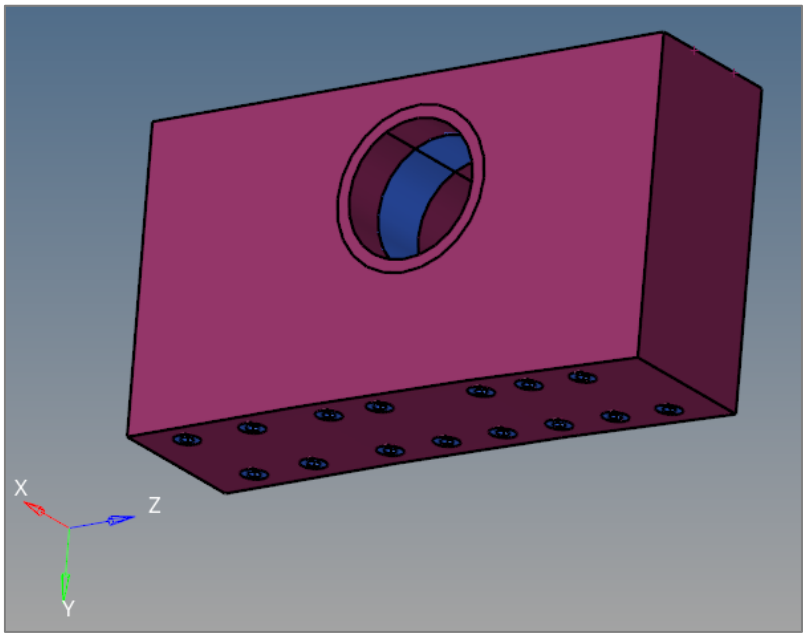
4.5. Alternatif Topoloji Optimizasyonu-3

Alternatif topoloji optimizasyonu-2 sonucunda da beklenen organik modelin elde edilememesi sonucunda çalışmalara devam edilmiştir.

4.5.1. Optimizasyon basamakları

Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

Önceki iki optimizasyonda tanımlanan tasarım alanları parçanın orijinal modele yakınsamasına neden olmuştur. Bundan ötürü 4.4.1 başlığında tanımlanan bölgedeki bağlayıcı montajı için olan boşaltmalar da kaldırılmıştır. Şekil 4.28'de mavi ile gösterilen tasarım dışı alanlar haricinde kütük komple tasarım alanına dahil edilmiştir.



Şekil 4.28. Tasarım alanı ve tasarım dışı alan

Sonlu elemanlar modeli

Önceki iki başlıktaki gibi sonlu eleman büyüklüğü 2 mm kullanılmıştır. Toplam eleman sayısı ise tasarım alanının büyümesine paralel artış göstererek 252578'e çıkmıştır.

Malzeme özellikleri – yük koşulları

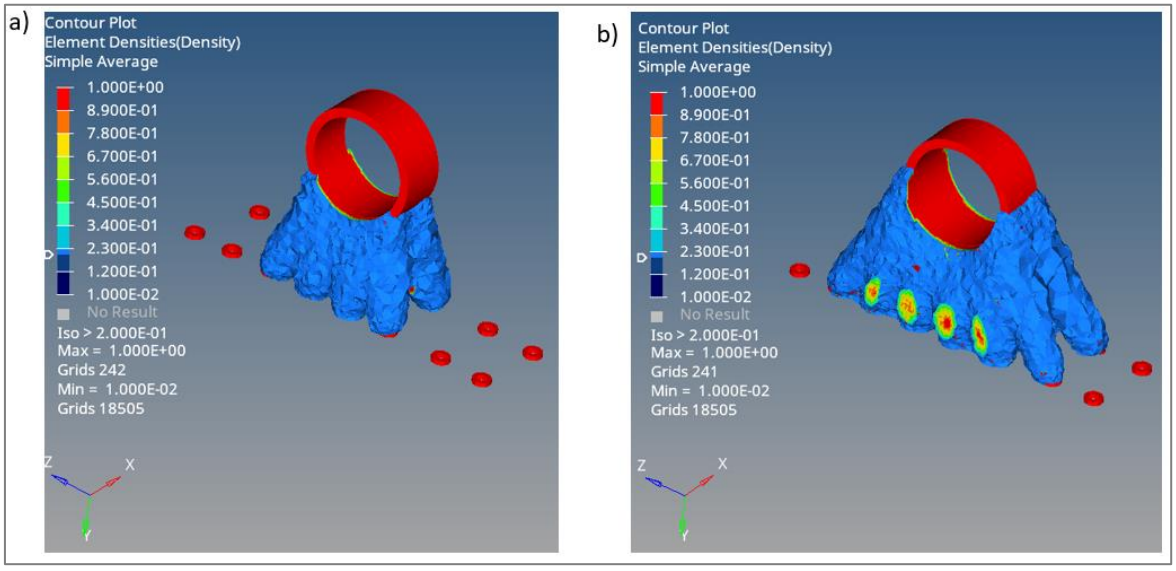
4.2.1 başlığı ile aynı tutulmuştur.

Optimizasyon parametreleri

Sonlu eleman büyüklüğü 2 mm kullanıldığı için tasarım değişkeni olanı minimum eleman boyutu yine 5 mm kullanılmıştır. Hedef fonksiyonu komplians minimizasyonu olarak korunmuştur. Kısıt fonksiyonu olarak da 0,1 ve 0,2 hacim oranı kullanılmıştır.

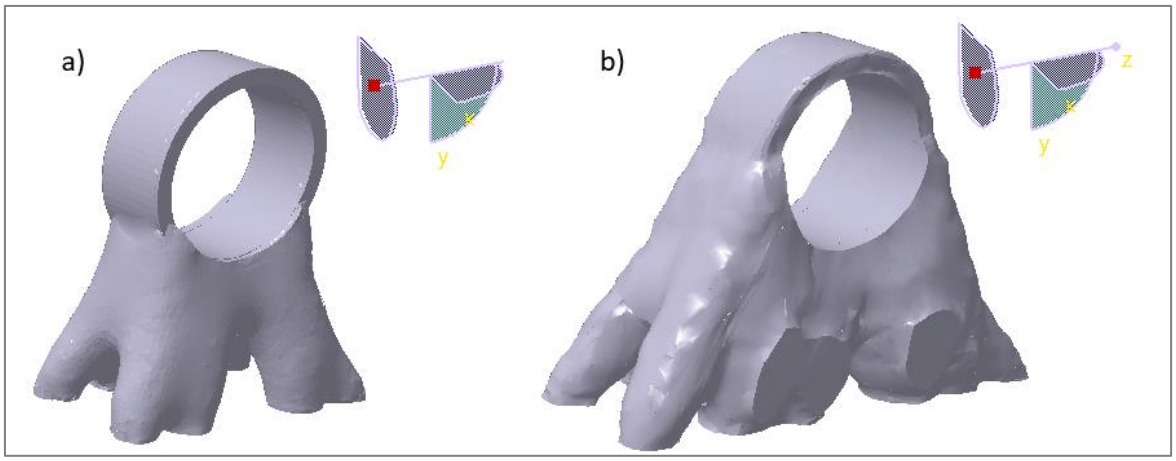
4.5.2. Optimizasyonun değerlendirilmesi

Gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinin ardından belirlenen 0,2 iso yoğunluk değeri için ortaya çıkan modeller Şekil 4.29'da sunulmuştur.



Şekil 4.29. Optimizasyon modelleri a) 0,1 hacim oranı, b) 0,2 hacim oranı

Hyperview'da incelenen model STL formatında dışarı alınarak Inspire ortamına aktarılmıştır. Altair Inspire aracında yüzeyler yumuşatılıp, kullanılmayan bağlayıcı bölgeleri çıkarılmıştır. Şekil 4.30'da yüzeyleri yumuşatılmış modeller paylaşılmıştır.

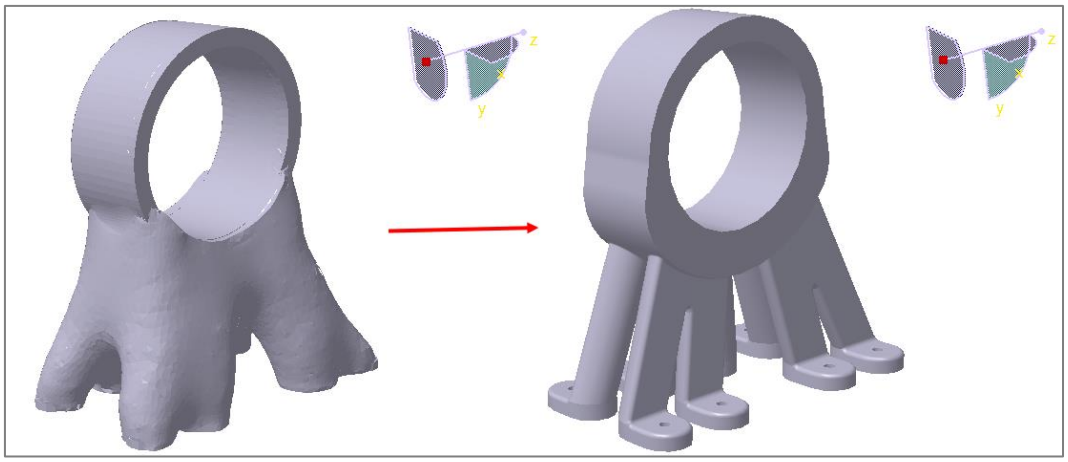


Şekil 4.30. Yüzeyleri düzenlenmiş modeller a) 0,1 hacim oranı, b) 0,2 hacim oranı

0,1 hacim oranı kullanıldığına oluşan modelin hacmi 27,31cm^3, 0,2 hacim oranı kullanıldığında 52,64cm^3'dür. Bu topoloji optimizasyonu sonucunda istenilen organik modeller ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda bu çalışma üzerinden devam edilmesine karar verilmiştir. Ancak 0,2 hacim oranı arzu edilen hafifleme miktarını sağlayamayacağı için 0,1 hacim oranı kullanılmıştır.

4.5.3. Yeniden modelleme

Şekil 4.30'da paylaşılan modelin direkt kullanılması uygun değildir. Tasarım ayrık yüzeyler barındırmaktadır. Ek olarak organik bir tasarım ortaya çıkarabilmek adına bağlayıcı montaj gereksinimi olan bölge de optimizasyona sokulmuştu, mevcut haliyle vidanın montajının yapılması mümkün değildir. Literatürdeki çalışmalar göz önünde bulunarak ve Şekil 4.29'daki çıktı baz alınarak parçanın yeniden modellemesi Catia programında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.31'de paylaşılan yeni tasarımın ağırlığı 123 g'dır. Bu tasarımdan model-2 şeklinde bahsedilecektir.



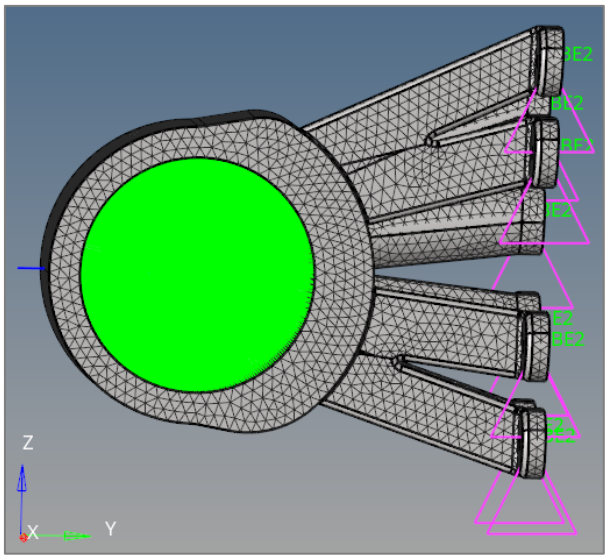
Şekil 4.31. Parçanın yeniden modellenmesi

4.5.4. Model-2'nin analizi

Model-1'de gerçekleştirildiği bu gibi bu modelin de emniyetli olup olmadığının değerlendirilmesi gereklidir. Bu kapsamda model-2'nin öncelikle statik analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından parçanın kopma tipleri açısından emniyetli olup olmadığı değerlendirilmiştir.

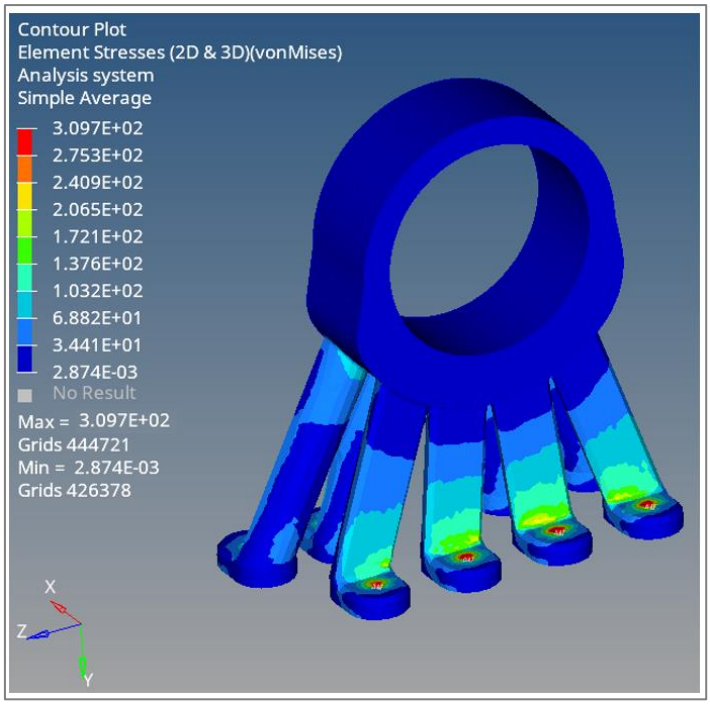
Statik analiz

4.2.4 başlığında oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile benzer şekilde aynı kısıtlar, girdiler ve malzeme ile model-2'nin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon modeli ile uyumlu olması adına yine 2 mm eleman boyutu kullanılmıştır. 47845 adet 3 boyutlu TET10 eleman kullanılmıştır. Şekil 4.32'de oluşturulan analiz modeli paylaşılmıştır.



Şekil 4.32. Model-2'nin sonlu elemanlar modeli

Modelin statik analizi yine önceki model ile benzer şekilde Altair Optistruct modülü ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Altair Hyperview aracı ile görüntülenmiştir. Kritik yük koşulu olan yük durumu 1 için elde edilen Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.33'de paylaşılmıştır. Parçanın maruz kaldığı maksimum Von Mises gerilmesi değeri, malzemenin kritik dayanımı ve emniyet katsayısı Çizelge 4.11'de verilmiştir.



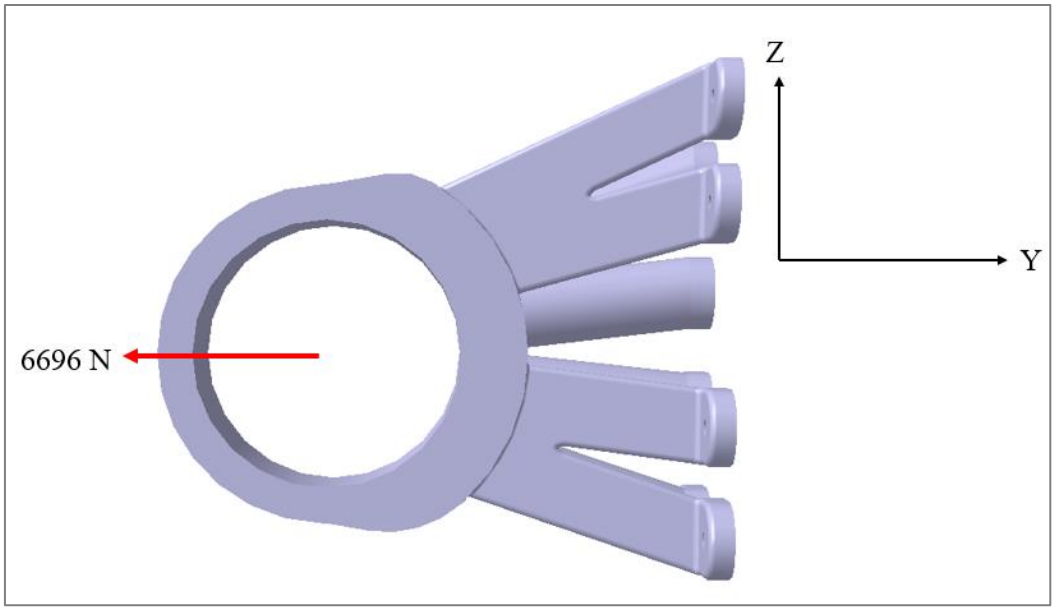
Şekil 4.33. Model-2'nin Von Mises gerilme dağılımı

Çizelge 4.11. Model-2'nin statik analiz sonuçları

Maksimum Von Mises Gerilmesi [MPa]	AlSi10Mg Malzemesinin Kritik Dayanımı [MPa]	Emniyet Katsayısı
309,7	345	1,11

Çekme dayanım yetmezliği

Şekil 4.34'de çeki yükü olan yük 2'nin parça üzerine uygulanışı gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Yük durumu 2'nin parçaya uygulanması

Parçada yük yönüne dik gelen en zayıf alanda taşınabilecek yük kapasitesi hesaplanmıştır. Bu alanın kesiti Şekil 4.35'de paylaşılmıştır. Yük kapasitesi ile parça üzerine gelen yükün kıyaslanması sonucunda bu kopma tipi için emniyet katsayısının hesaplanması aşağıda gösterilmiştir. Eş. 4.1-4.2'de verilen eşitlikler kullanılmıştır [47]:

$$P_{çk} = \sigma_{ak}.A_{net} \tag{4.1}$$

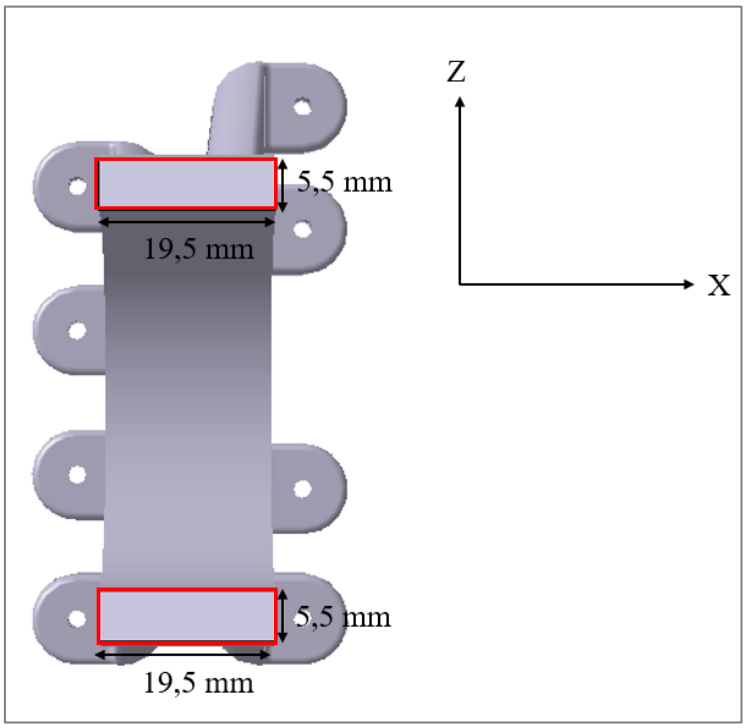
A_{net} = 2(5,5.19,5) = 214,5 mm^2

σ_{ak} = 230 MPpa

$P_{çk}$ = 230. 214,5 = 49330 N

EK = $P_{çk}$ / $P_{çy}$ (4.2)

EK = 49330/6696 = 7,4



Şekil 4.35. Çekme dayanımının kesit alanı

Koparma dayanım yetmezliği

Parçanın kulak bölgesinde çeki yükü kaynaklı çekme dayanım yetmezliğinin incelenmesinin ardından koparma dayanım yetmezliği incelenmiştir. Şekil 4.36'de koparma gerilimi ve kesit alanı sunulmuştur. Öncelikle paylaşılan kesit alanı için yük kapasitesi hesaplanmıştır. Ardından parçanın maruz kaldığı çekme yükü ile kıyaslanarak emniyet katsayısı hesaplanmıştır. Hesaplamalar Eş. 4.3-4.5 arasında aşağıda ifade edilmiştir [47]:

$P_{kk} = \sigma_{kd}.A_{net}$ (4.3)

A_{net} = 2(e-s)t (4.4)

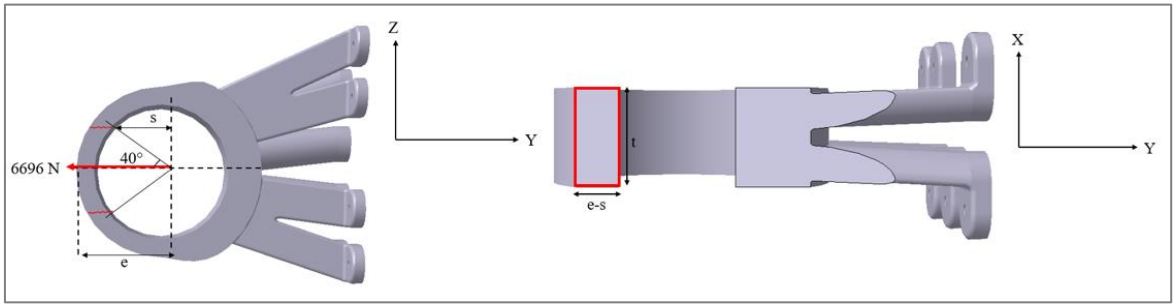
A_{net} = 2[26,5- (0,766. 21)]39 = 406,1 mm^2

σ_{kd} = 269 MPa

P_{kk} = 269. 406,1 = 109253 N

$$EK = P_{kk} / P_{çy} \quad (4.5)$$

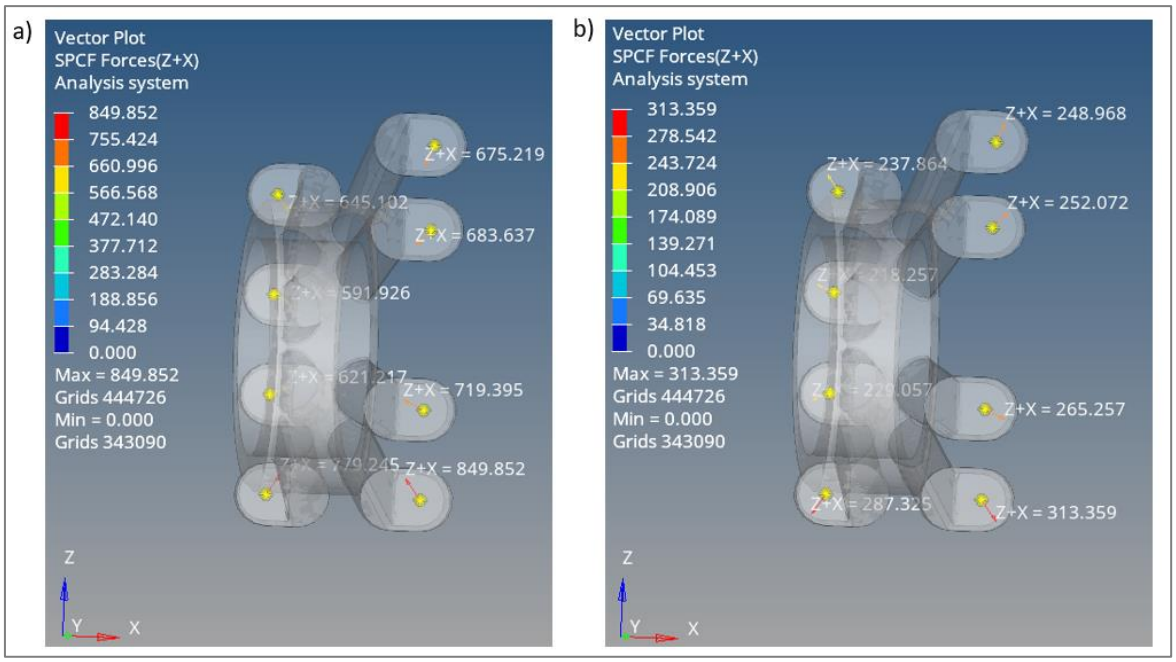
EK = 109253/6696 = 16,3



Şekil 4.36. Koparma dayanımı ve kesit alanı

<u>Taşıma dayanım yetmezliği</u>

Model-2'de dayanım yetmezliği kaynaklı bir kopma yaşanıp yaşanmayacağını belirlemek için bağlayıcı deliklerinde oluşan kesme kuvvetleri incelenmiştir. Şekil 4.37'de 8 delikte oluşan bileşke kesme kuvvetleri her iki yük durumu için de verilmiştir.



Şekil 4.37. Bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri a) yük koşulu 1, b) yük koşulu 2

Öncelikle parçanın taşıma yük kapasitesi hesaplanmıştır. Taşıma yük kapasitesi hesaplanırken kullanılan net alan parça kalınlığı ve bağlayıcı çapının çarpımıyla elde edilen dikdörtgensel bölgedir. Ardından Şekil 4.37'de paylaşılan kesme kuvvetlerinden maksimum olan ile taşıma yükü karşılaştırılarak bu kopma tipi için emniyet katsayısı hesaplanmıştır. Eş. 4.6-4.8 arasında verilen eşitlikler kullanılmıştır [47]:

$$P_{tk} = \sigma_{td}.A_{net} \quad (4.6)$$

$$A_{net} = \text{t.D} \quad (4.7)$$

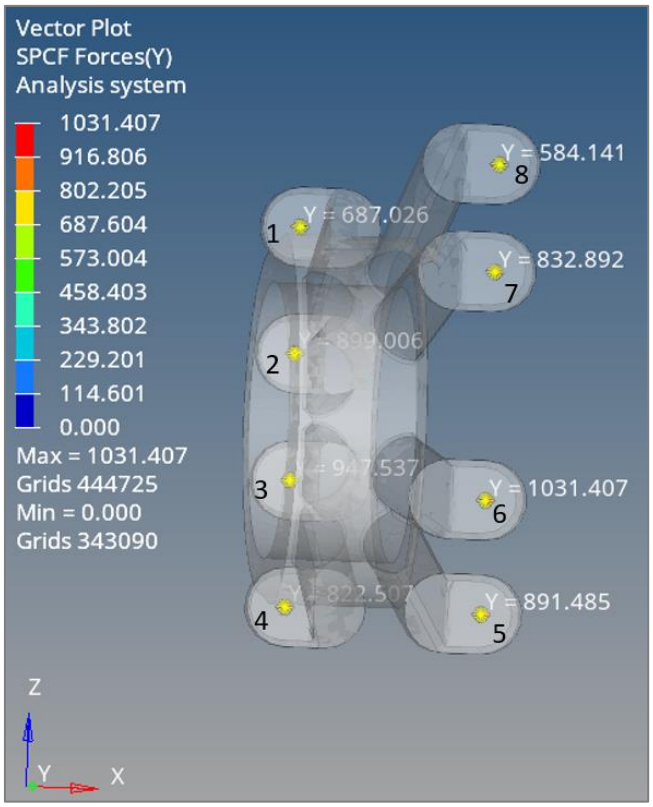
A_{net} = 4.4 = 16 mm^2
σ_{td} = 503 MPa
P_{tk} = 503. 16 = 8048 N

$$\text{EK} = P_{tk} / V_k \quad (4.8)$$

EK = 8048/850 = 9,5

Bağlayıcı kesme ve çekme dayanım yetmezliği

Taşıma dayanım yetmezliğinde delik merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri parçanın malzemesinin dayanımları üzerinden incelenmiştir. Bu başlıkta ise vidanın dayanımları üzerinden değerlendirilmektedir. Vidaya kesme ve çekme kuvvetleri aynı anda etki ediyorsa bileşke etkisi hesaplanmalıdır. Yukarıda paylaşılan Şekil 4.37'de iki yük durumu içinde kesme kuvvetleri verilmiştir. Yük koşulu 2'de oluşan çekme kuvvetleri delik numaraları ile birlikte Şekil 4.38'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.38. Yük koşulu 2 için bağlayıcı merkezlerinde oluşan çekme kuvvetleri

Her bir delik için bağlayıcının kesme yük kapasitesi ile bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme ve çekme kuvvetleri kıyaslanarak emniyet katsayıları hesaplanmıştır. Çizelge 4.12 ve 4.13'de sonuçlar özetlenmiştir. Hesaplamalarda Eş. 4.9-4.11 kullanılmıştır [50]:

$$R_k = V_k / V_{kk} \tag{4.9}$$

$$R_ç = P_{çy} / P_{çk} \tag{4.10}$$

$$\text{EK} = \frac{1}{\sqrt{R_k{}^2 + R_ç{}^2}} \tag{4.11}$$

Çizelge 4.12. Yük durumu 1 için vidanın emniyet katsayısı

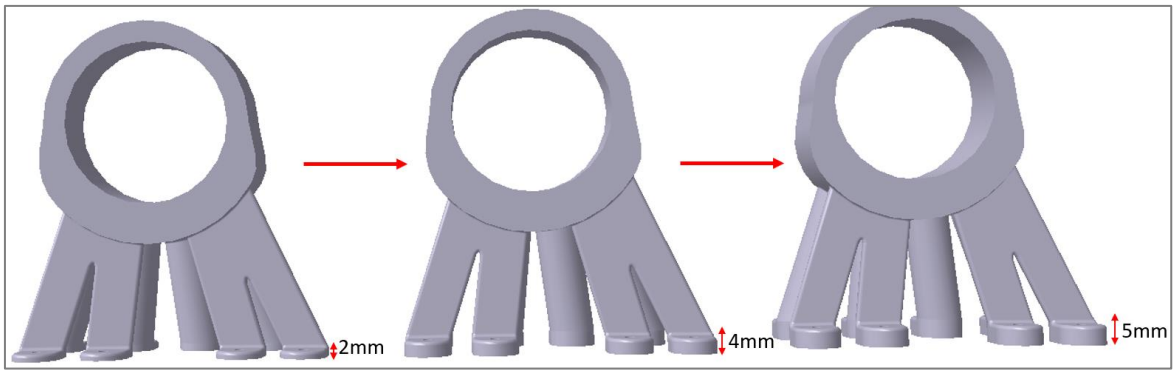
Delik	Kesme kuvveti (N)	Çekme yükü (N)	Emniyet katsayısı
1	645	0	13,8
2	592	0	15,0
3	621	0	14,3
4	779	0	11,4
5	850	0	10,4
6	719	0	12,3
7	684	0	13,0
8	675	0	13,1

Çizelge 4.13. Yük durumu 2 için vidanın emniyet katsayısı

Delik	Kesme kuvveti (N)	Çekme yükü (N)	Emniyet katsayısı
1	238	687	13,1
2	218	899	10,4
3	229	948	9,9
4	287	823	10,9
5	313	891	10,1
6	265	1031	9,0
7	252	833	11,0
8	249	584	15,0

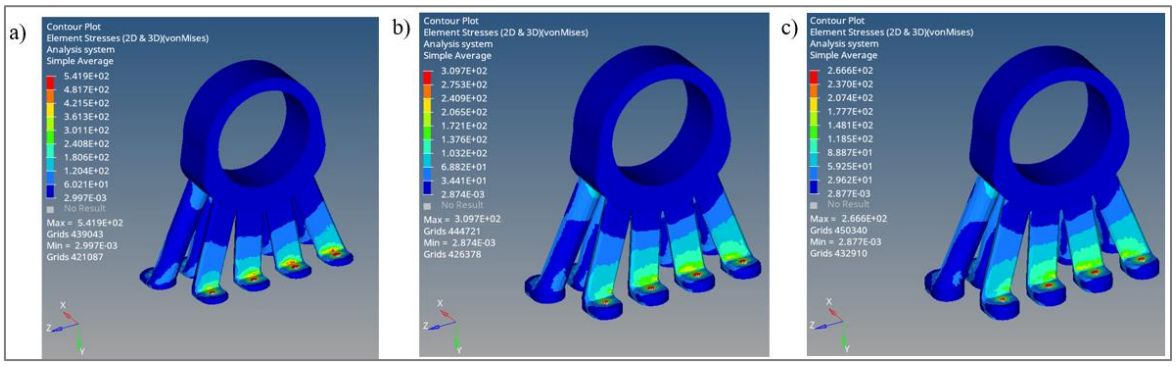
4.6. Flanş Et Kalınlıklarının Değerlendirilmesi

Bu başlıkta parçanın vidalarla montajının gerçekleştirildiği kısımdaki et kalınlığının gerilme ve ağırlık üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yüksek gerilmeler bağlayıcı deliğinin etrafında görüldüğü için o kısımdaki et kalınlığı değişimi parçada oluşan yüksek gerilmeleri etkilemektedir. Orijinal modelde bu kısımdaki et kalınlığı 4 mm'dir. Önceki çalışmalarda bu değer korunarak devam edilmiştir. Bu başlıkta ise et kalınlığının 2,4 ve 5 mm değerlerinde parça üzerindeki etkisi değerlendirilecektir. Flanş et kalınlıklarının değişimi Şekil 4.39'da gösterilmiştir.



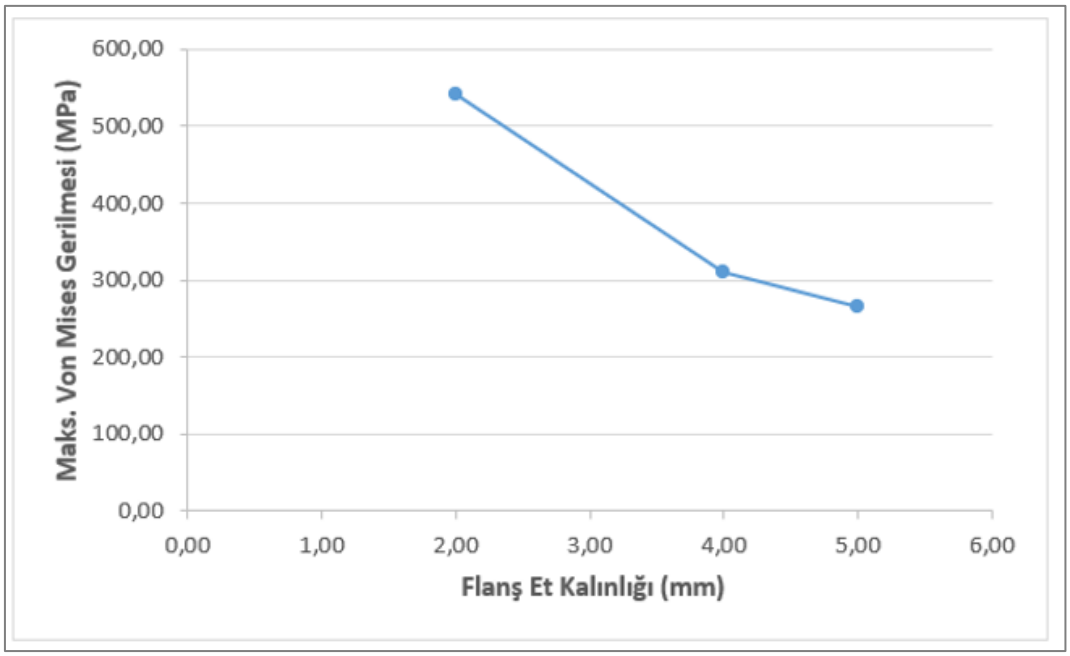
Şekil 4.39. Flanş et kalınlıklarının değişimi

4 mm flanş kalınlığı olan model 4.5 başlığında oluşturulmuştur. 2 ve 5 mm et kalınlıklarının ise ayrı ayrı sonlu elemanlar modeli bu başlık altında oluşturulmuştur. Önceki modeller ile benzer şekilde aynı kısıtlar, girdiler, malzeme ve 2 mm eleman boyutu kullanılarak modeller kurulmuştur. Modeller Altair Optistruct modülü ile çözdürüldükten sonra Altair Hyperview aracı ile görüntülenmiştir. Yük durumu 1 için elde edilen Von Mises gerilme dağılımları Şekil 4.40'da aktarılmıştır.

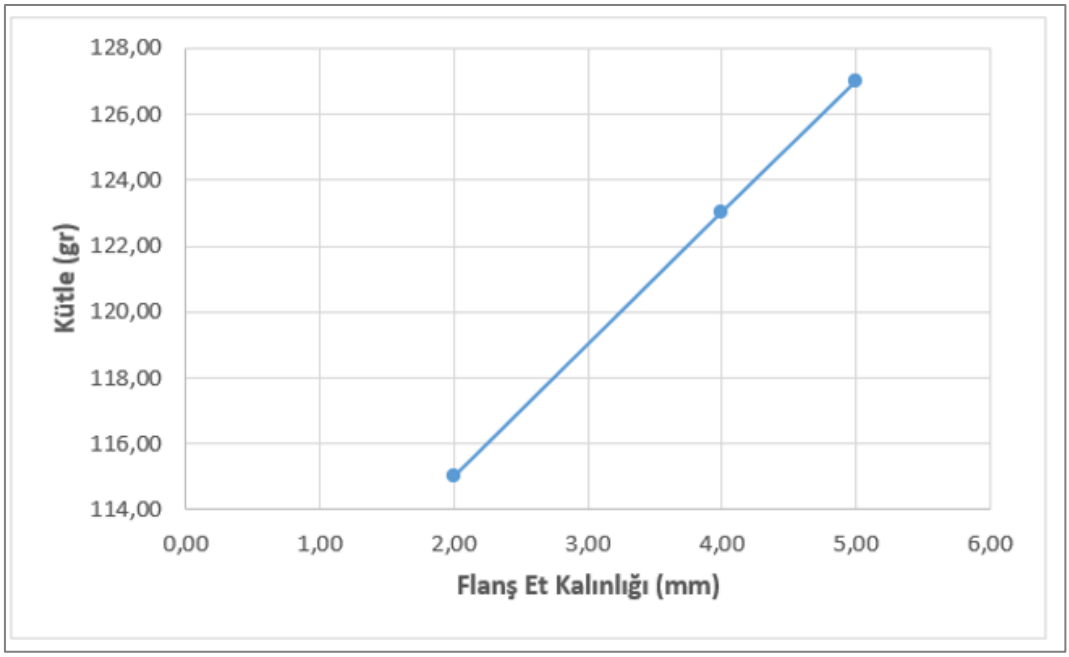


Şekil 4.40. Farklı et kalınlıklarındaki Von Mises gerilme dağılımları a) 2 mm, b) 4 mm, c) 5 mm

2 mm et kalınlığı kullanıldığında parçanın ağırlığı 115 g olarak ölçülürken, 4 mm'de 123 g, 5 mm'de ise 127 g olarak ölçülmüştür. Et kalınlığı değişiminin maksimum Von Mises gerilmesine etkisi Şekil 4.41'de, ağırlığa etkisi ise Şekil 4.42'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.41. Flanş et kalınlığı değişiminin Von Mises gerilmelerine etkisi



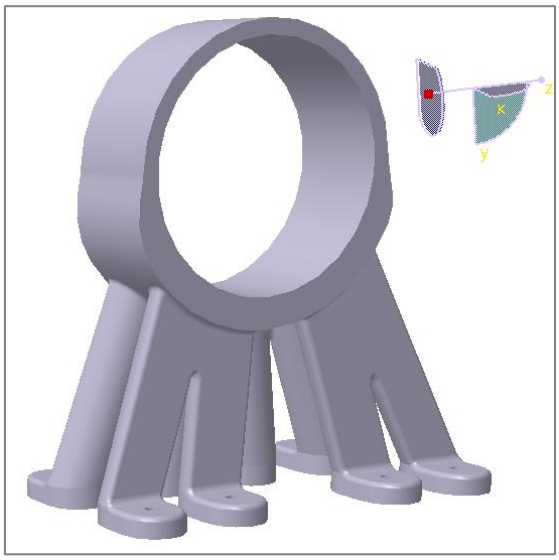
Şekil 4.42. Flanş et kalınlığı değişiminin ağırlığa etkisi

4.7. Model-2'nin Düzenlenmesi

4.7.1. Yeniden modelleme

Model-2'nin analiz çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda mevcut model üzerinde bazı küçük değişiklikler yapılmasına karar verilmiştir. Öncelikle düşük gerilmelerin görüldüğü

kulak bölgesinde et kalınlığı azaltılmıştır. Ardından gerilme konsantrasyonu yüksek olan bölgelerde radyus değerleri arttırılmıştır. Taşıma dayanım yetmezliği incelendiğinde parçanın taşıma yük kapasitesi yeterli bulunduğundan flanş et kalınlığı 4 mm'de sabit tutulmuştur. Parçanın yeniden modellenmesi Catia programında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.43'de paylaşılan yeni tasarımın ağırlığı 100 g'dır. Oluşturulan bu son tasarımdan model-3 tanımlamasıyla bahsedilecektir.



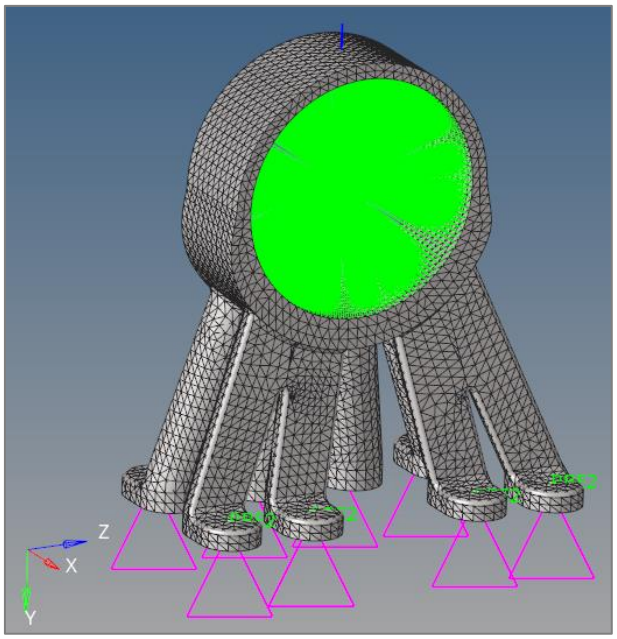
Şekil 4.43. Model 3

4.7.2. Model-3'ün analizi

Model-1 ve model-2'de de değerlendirildiği gibi modelin de emniyetli olup olmadığının değerlendirilmesi gerekmektedir. Model-3'ün önce statik analiz açısından, ardından da kopma tipleri açısından emniyet katsayıları hesaplanmıştır.

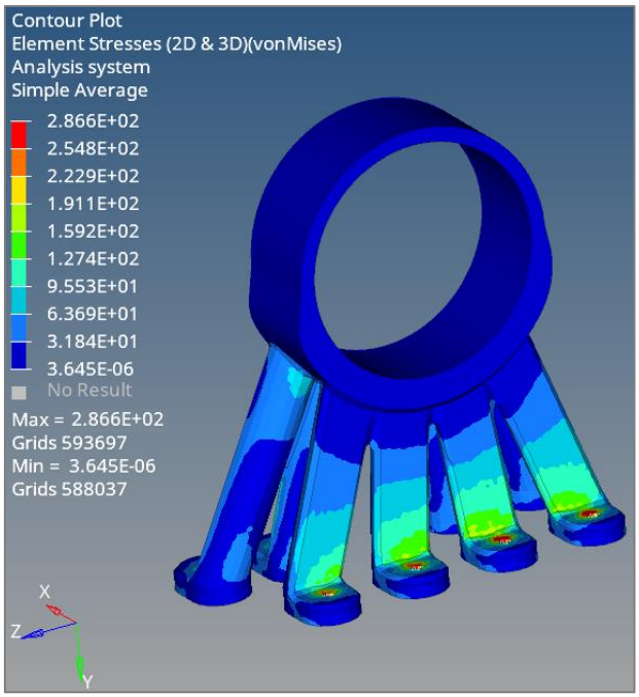
Statik analiz

4.2.4 başlığında kullanılan model ile benzer şekilde aynı kısıtlar, girdiler, malzeme ve 2 mm sonlu eleman boyutu kullanarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. 44488 adet 3 boyutlu TET10 eleman kullanılmıştır. Şekil 4.44'de oluşturulan analiz modeli paylaşılmıştır.



Şekil 4.44. Model-3'ün sonlu elemanlar modeli

Modelin statik analizi önceki modellerle benzer şekilde Altair Optistruct aracı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Altair Hyperview modülüyle görüntülenmiştir. Kritik yük koşulu olan yük durumu 1 için elde edilen Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.43'de paylaşılmıştır. Parçanın maruz kaldığı maksimum Von Mises gerilmesi değeri, malzemenin kritik dayanımı ve emniyet katsayısı Çizelge 4.14'de verilmiştir.

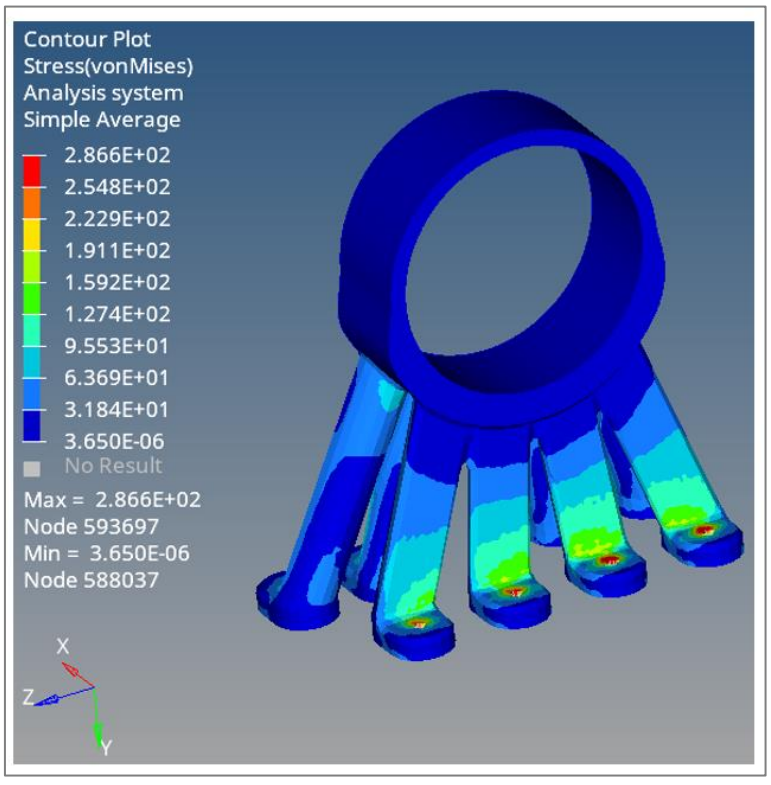


Şekil 4.45. Model-3'ün Von Mises gerilme dağılımı

Çizelge 4.14. Model-3'ün statik analiz sonuçları

Maksimum Von Mises Gerilmesi (MPa)	AlSi10Mg Malzemesinin Kritik Dayanımı (MPa)	Emniyet Katsayısı
286,6	345	1,20

Model-3'ün statik analizinin Altair Optistruct aracı ile gerçekleştirilmesinin ardından bir farklı çözücü daha kullanarak gerilme dağılımında ve maksimum Von Mises değerinde nasıl bir değişim olacağı gözlenmek istenmiştir. Bu kapsamda MSC Nastran çözücüsü kullanılmıştır. Kritik yük koşulu olan yük durumu 1 için elde edilen Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4.46'da paylaşılmıştır. Bu şekilden görüleceği üzere gerilme dağılımı ve parçada görülen maksimum Von Mises gerilmesi değerleri aynı gelmiştir.



Şekil 4.46. Model-3'ün Von Mises gerilme dağılımı

Çekme dayanım yetmezliği

Şekil 4.34'de çeki yükü olan yük 2'nin parça üzerine uygulanışı gösterilmiştir. Önceki modellerde hesaplandığı gibi parçada yük yönüne dik gelen en zayıf alanda taşınabilecek yük kapasitesi hesaplanmıştır. Bu alanın kesiti Şekil 4.47'de paylaşılmıştır. Parça üzerine

gelen yük ile yük kapasitesi kıyaslanarak emniyet katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Eş. 4.1-4.2'de verilen eşitlikler kullanılmıştır [47]:

$$P_{çk} = \sigma_{ak}.A_{net} \quad (4.1)$$

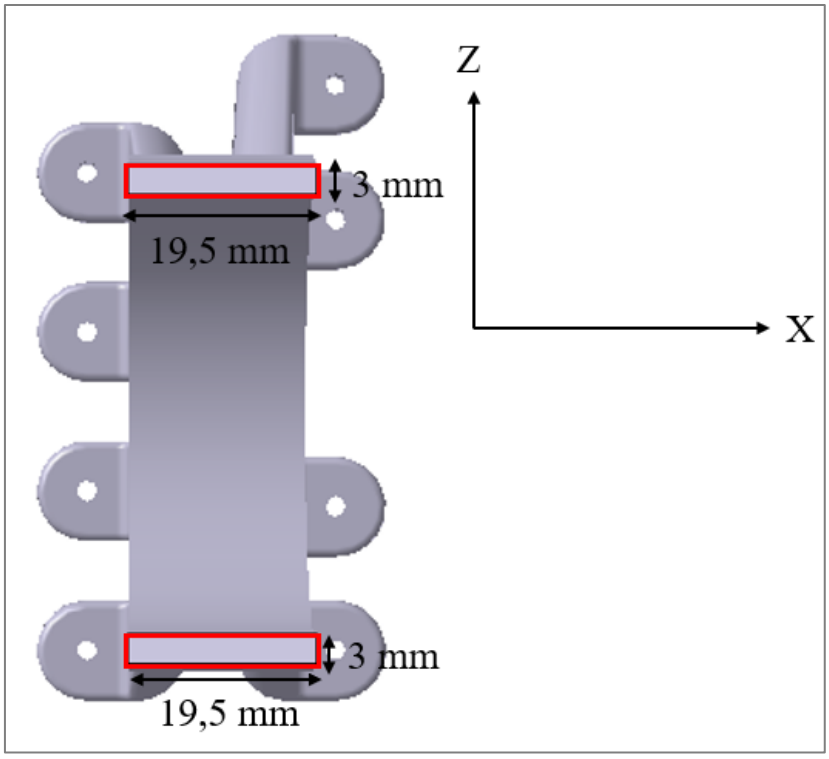
A_{net} = 2(3.19,5) = 117 mm^2

σ_{ak} = 230 MPa

$P_{çk}$ = 230. 117 = 26910 N

$$EK = P_{çk} / P_{çy} \quad (4.2)$$

EK = 26910/6696 = 4



Şekil 4.47. Çekme dayanımının kesit alanı

Koparma dayanım yetmezliği

Kulak bölgesinde çeki yükü kaynaklı çekme dayanım yetmezliğinin incelenmesinin ardından koparma dayanım yetmezliği incelenmiştir. Koparma gerilimi ve kesit alanı Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Şekilde gösterilen kesit alanı için yük kapasitesi hesaplanmıştır.

Sonrasında parçanın maruz kaldığı çeki yükü ile karşılaştırılarak emniyet katsayısı hesaplanmıştır. Hesaplamalar Eş. 4.3-4.5 arasında aşağıda ifade edilmiştir [47]:

$$P_{kk} = \sigma_{kd}.A_{net} \tag{4.3}$$

$$A_{net} = 2(e-s)t \tag{4.4}$$

A_{net} = 2[24- (0,766. 21)]39 = 308,6 mm^2

σ_{kd} = 269 MPa

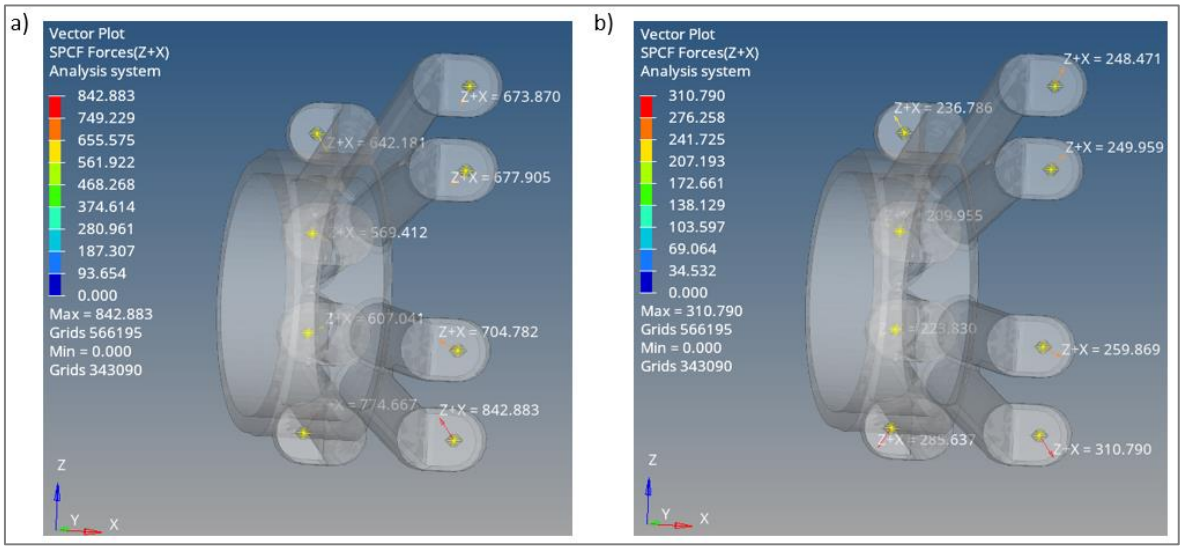
P_{kk} = 269. 308,6 = 83025 N

$$EK = P_{kk} / P_{çy} \tag{4.5}$$

EK = 83025/6696 = 12,4

Taşıma dayanım yetmezliği

Model-3 için dayanım yetmezliği kaynaklı bir kopma yaşanıp yaşanmayacağını belirlemek amacıyla bağlayıcı deliklerinde oluşan kesme kuvvetleri incelenmiştir. Her iki yük durumu için 8 delikte oluşan bileşke kesme kuvvetleri Şekil 4.48'de sunulmuştur.



Şekil 4.48. Bağlayıcı merkezlerinde oluşan kesme kuvvetleri a) yük koşulu 1, b) yük koşulu 2

Öncelikle parçanın taşıma yük kapasitesi hesaplanmıştır. Taşıma yük kapasitesi hesaplanırken kullanılan net alan parça kalınlığı ve bağlayıcı çapının çarpımıyla elde edilen dikdörtgensel bölgedir. Ardından Şekil 4.48'de paylaşılan kesme kuvvetlerinden maksimum olan ile taşıma yükü karşılaştırılarak bu kopma tipi için emniyet katsayısı hesaplanmıştır. Eş. 4.6-4.8 arasında verilen eşitlikler kullanılmıştır [47]:

$$P_{tk} = \sigma_{td}.A_{net} \quad (4.6)$$

$$A_{net} = \text{t.D} \quad (4.7)$$

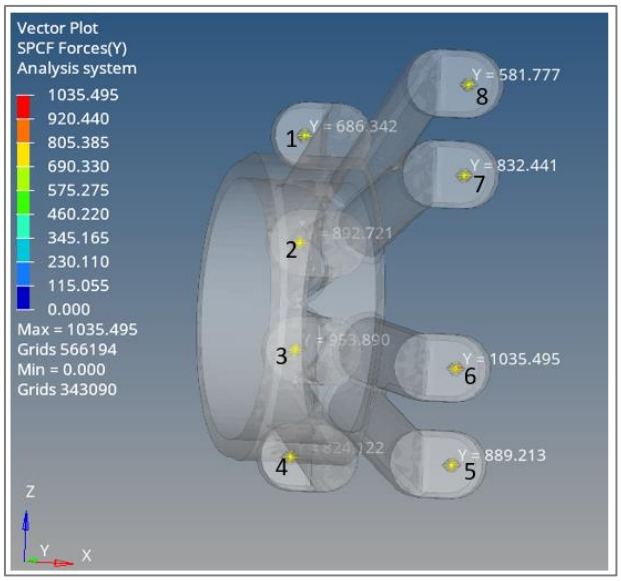
A_{net} = 4.4 = 16 mm^2
σ_{td} = 503 MPa
P_{tk} = 503. 16 = 8048 N

$$\text{EK} = P_{tk} / V_k \quad (4.8)$$

EK = 8048/843 = 9,5

Bağlayıcı kesme ve çekme dayanım yetmezliği

Yukarıda incelenen taşıma dayanım yetmezliğinde bağlayıcı deliklerinin merkezinde oluşan bileşke kesme kuvvetleri parçanın dayanımları üzerinden değerlendirilmiştir. Bağlayıcı kesme ve çekme dayanım yetmezliğinde ise vidanın dayanımları üzerinden değerlendirilmiştir. Bağlayıcıya kesme ve çekme yükleri aynı anda etki ediyorsa yüklerin birlikte etkisi hesaplanmalıdır. Şekil 4.48'da kesme kuvvetleri verilmiştir, Şekil 4.49'da ise çekme kuvvetleri paylaşılmıştır. İlave olarak delik numaraları da verilmiştir.



Şekil 4.49. Yük koşulu 2 için bağlayıcı merkezlerinde oluşan çekme kuvvetleri

Bağlayıcı merkezlerindeki kesme ve çekme kuvvetleri ile bağlayıcının yük taşıma kapasiteleri kıyaslanarak her bir delik için emniyet katsayısı hesaplanmıştır. Çizelge 4.15 ve 4.16'da sonuçlar özetlenmiştir. Hesaplamalarda Eş. 4.9-4.11 kullanılmıştır [50]:

$$R_k = V_k / V_{kk} \tag{4.9}$$

$$R_ç = P_{çy} / P_{çk} \tag{4.10}$$

$$\text{EK} = \frac{1}{\sqrt{R_k{}^2 + R_ç{}^2}} \tag{4.11}$$

Çizelge 4.15. Yük durumu 1 için vidanın emniyet katsayısı

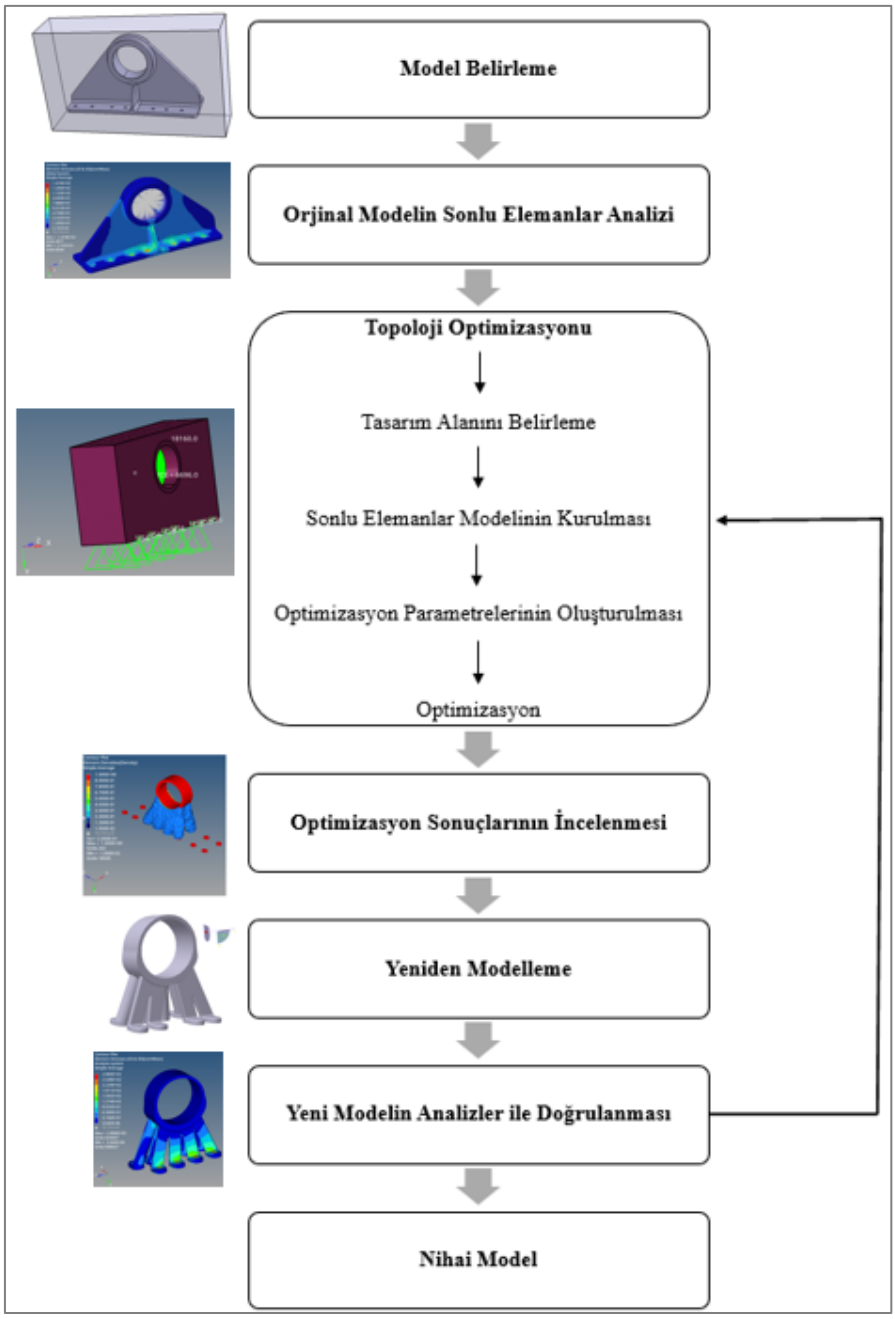
Delik	Kesme kuvveti (N)	Çekme yükü (N)	Emniyet katsayısı
1	642	0	13,8
2	569	0	15,6
3	607	0	14,6
4	775	0	11,5
5	843	0	10,5
6	705	0	12,6
7	678	0	13,1
8	673	0	13,2

Çizelge 4.16. Yük durumu 2 için vidanın emniyet katsayısı

Delik	Kesme kuvveti (N)	Çekme yükü (N)	Emniyet katsayısı
1	237	686	13,2
2	210	893	10,5
3	224	954	9,8
4	286	824	11,0
5	311	889	10,2
6	260	1036	9,0
7	250	832	11,0
8	249	582	15,1

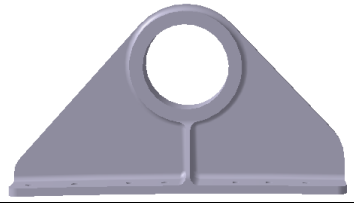
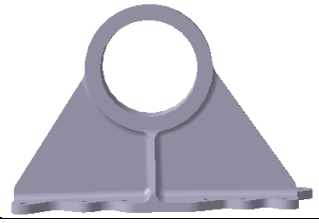
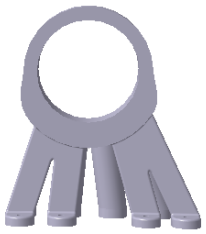
4.8. Modellerin Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması

Model-3 ile elde edinilen hafifleme miktarı ve modelin mekanik performansı sonucunda optimizasyon çalışması sonlandırılmıştır. Çalışmada ortaya konulan optimizasyonun bitiş şeması Şekil 4.50'de paylaşılmıştır. Ek olarak bu başlıkta orijinal model ile optimizasyon sonuçlarının yansıtıldığı model-1, model-2 ve model-3 bir arada sunulmaktadır. Çizelge 4.17'de modellerdeki ağırlık değişimi ortaya koyulmuştur.



Şekil 4.50. Optimizasyon bitiş şeması

Çizelge 4.17. Modellerin karşılaştırılması

Parçalar	Ağırlık (g)	Ağırlık değişimi (%)	Emniyet katsayısı	Emniyet katsayısı değişimi (%)
Orijinal model 	265	-	3,6	-
Model-1 	176	34	1,35	62,5
Model-2 	123	54	1,11	70,0
Model-3 	100	63	1,20	67

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında, hava araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlı yapısal bir parçanın eklemeli imalat yöntemlerine göre topoloji optimizasyonu metodu kullanılarak yeniden tasarlanması ve analizler ile doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle çalışmanın gerçekleştirileceği model belirlenmiştir. Eklemeli imalat ile üretimi avantajlı kılmak adına yüksek satın al ve uç oranı olan parçalar incelenmiştir. Bu incelemelerin sonunda satın al ve uç oranı 16,9 olan talaşlı imalat ile Al7050 malzeme kullanılarak üretilen orijinal model belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda ortaya çıkacak modellerin sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için orijinal modele statik analiz uygulanmıştır. Al7050 malzemenin çekme dayanımının yüksek olması ve parçanın konservatif tasarlanmasının sonucu olarak emniyet katsayısı 3,6 bulunmuştur.

Bu çalışmada topoloji optimizasyonu işlemleri Optistruct çözücüsü kullanılarak SIMP yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, talaşlı imalat ile Al7050 malzeme kullanılarak üretilen orjinal modelin aksine Eİ metotlarında yaygın şekilde kullanılan AlSi10Mg toz malzeme seçilmiştir. Öncelikle, optimizasyon için kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için 15 farklı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarda, sonlu eleman büyüklüğünün gerilme ve hacim üzerindeki etkileri incelenmiştir ve bunun sonucunda 2 mm eleman büyüklüğü kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, kısıt fonksiyonu olarak 0,5 hacim oranı ve hedef fonksiyonu olarak da komplians minimizasyonu seçilmiştir. Bu parametreler kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda model-1 adlı tasarım ortaya çıkmıştır. Bu tasarım, ilk tasarımdan %35 daha hafif olmakla birlikte emniyet katsayısı 1,35 bulunmuştur. Ek olarak kopma tiplerinin açısından da parçanın uygunluğu değerlendirilmiş ve parça emniyetli bulunmuştur.

Eİ ile üretime yönelik bir çalışma gerçekleştirildiğinden daha organik ve daha hafif bir parça ortaya konulmak istenmiştir. Bu amaçla, optimizasyon çalışmaları devam ettirilmiştir. Orijinal modelin kendisi üzerinden tasarım alanı tanımlamanın modele kısıtlar yarattığı fark edildiğinden, işlenmemiş haldeki zarf boyutlarını içeren bir kütük yapı tasarım alanı olarak belirlenmiştir. Sonlu eleman büyüklükleri ve kısıt fonksiyonu sabit tutulurken, hedef

fonksiyonu olan hacim oranı değiştirilmiştir. Büyüyen tasarım alanı nedeniyle 0,1 hacim oranı kullanıldığında istenen yapı elde edilmiştir. Bu optimizasyon çıktısı, parçanın montajını gerçekleştirebilmek için tekrar tasarlanmıştır. Model, literatürde yer alan çalışmaları da göz önünde bulundurarak optimizasyon sonucundan çok uzaklaşmadan yeniden tasarlanmıştır. Bu çalışmanın sonucu elde edilen model-2, orijinal modelden %54 daha hafiftir ve emniyet katsayısı 1,11'dir. Ayrıca, kopma tipleri açısından da değerlendirilen model-2 emniyetli bulunmuştur.

Model-2'nin analiz çalışmaları tamamlandıktan sonra, flanş et kalınlıkları ayrıca incelenmiştir. Model-2'nin analiz sonuçları ve flanş et kalınlıklarının etkisi dikkate alındığında, parçanın az yüklenen bölgelerindeki et kalınlıkları azaltılmış ve gerilme konsantrasyonu yüksek bölgelerindeki radyus değerleri arttırılmıştır. Böylece ortaya model-3 çıkmıştır. Model-3 ilk parçadan %63 daha hafif ve 1,2'lik bir emniyet katsayısına sahiptir. Ayrıca, kopma tipleri açısından da değerlendirildiğinde emniyetli bulunmuştur. Model-3 ile emniyetli ve çok daha hafif bir yapı ortaya koyulmuştur. Bu yapının statik analizi, farklı bir çözücü kullanarak MSC Nastran programıyla da gerçekleştirilmiştir. Gerilme dağılımları ve gerilme değerlerinin Optistruct çözücüsünün sonuçlarıyla birebir örtüştüğü görülmüştür.

5.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında ortaya koyulan modellerle birlikte, kafes yapılara yönelik optimizasyon çalışmaları da gerçekleştirilebilir. Bu sayede, mevcut tasarımların çeşitlendirilmesi sağlanabilir.

Farklı malzemeler kullanılarak ek topoloji optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilebilir. Malzeme özellikleri dikkate alınarak tasarım alanı, tasarım değişkenleri, hedef ve amaç fonksiyonları gözden geçirilmelidir.

Eİ yöntemleri kullanılarak üretilecek parçaların üretim süreci, farklı üretim parametreleri kullanılarak simüle edilebilir. Bu sayede hem tasarım yaklaşımları geliştirilebilir hem de üretim sırasında ortaya çıkabilecek hatalar önden tespit edilebilir.

Bu tezde, mühendislik araçları kullanılarak oluşturulan ve doğrulanan modeller ortaya koyulmuştur. Ancak ortaya koyulan sonlu elemanlar analizlerinin sonuçlarını

doğrulayabilmek adına parçaların üretimlerinin gerçekleştirilmesi ve testlerinin yapılarak sonuçların karşılaştırılması yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Introduction to Additive Manufacturing Technology Brochure. (2019). Web: https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-additive-manufacturing-brochure, Son Erişim Tarihi: 25/09/2022.

2. Gebisa, A. W., and Lemu, H. G. (2017). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 276(1).

3. Berrocal, L., Fernández, R., González, S., Periñán, A., Tudela, S., Vilanova, J., Rubio, L., Martín Márquez, J. M., Guerrero, J., and Lasagni, F. (2019). Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(2), 83–95.

4. Walker, D., Liu, D., and Jennings, A. (2015). *Topology optimization of an aircraft wing*. 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 1–8.

5. Reddy, S. N., Maranan, V., Simpson, T. W., Palmer, T., and Dickman, C. J. (2016). Application of topology optimization and design for additive manufacturing guidelines on an automotive component. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2A-2016, 1–10.

6. Dubrovskaya, A., Dongauzer, K., and Faskhutdinov, R. (2017). *The design of lightweight gas turbine engine parts using topology optimization*. MATEC Web of Conferences, 129.

7. Orme, M. E., Gschweitl, M., Ferrari, M., Vernon, R., Madera, I. J., Yancey, R., and Mouriaux, F. (2017). Additive manufacturing of lightweight, optimized, metallic components suitable for space flight. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 54(5), 1050–1059.

8. Brusa, E., Sesana, R., and Ossola, E. (2017). Numerical modeling and testing of mechanical behavior of AM Titanium alloy bracket for aerospace applications. *Procedia Structural Integrity*, 5, 753–760.

9. Dagkolu, A., Gokdag, I., and Yilmaz, O. (2020). Design and additive manufacturing of a fatigue-critical aerospace part using topology optimization and L-PBF process. *Procedia Manufacturing*, 54, 238–243.

10. Viqaruddin, M., and Ramana Reddy, D. (2017). Structural optimization of control arm for weight reduction and improved performance. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 9230–9236.

11. Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Gouveia, R. M., Pinto, G., and Baptista, A. (2018). A Novel Approach to Optimize the Design of Parts for Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 17, 53–61.

12. Uriati, F., Zambrelli, L., Nicoletto, G., and Garibaldi, M. (2021). Design, production, and fatigue testing of an optimized structural component made of L-PBF AlSi10Mg. *Procedia Structural Integrity*, 34, 184–190.

13. Salonitis, K., and Al Zarban, S. (2015). Redesign optimization for manufacturing using additive layer techniques. *Procedia CIRP*, *36*, 193–198.

14. Klippstein, H., Duchting, A., Reiher, T., Hengsbach, F., Menge, D., and Schmid, H. J. (2019). Development, production and post-processing of a topology optimized aircraft bracket. *Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2019*, 813, 1932–1945.

15. Walton, D., and Moztarzadeh, H. (2017). Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation. *Procedia CIRP*, 60, 205–210.

16. Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos, R., and Pedro Mortágua, J. (2016). Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes. *Procedia Structural Integrity*, 1, 289–296.

17. Merulla, A., Gatto, A., Bassoli, E., Munteanu, S. I., Gheorghiu, B., Pop, M. A., Bedo, T., and Munteanu, D. (2019). Weight reduction by topology optimization of an engine subframe mount, designed for additive manufacturing production. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1014–1018.

18. İnternet: 3D Printing of Aircraft Parts, EOS GmbH. (2020). Web: https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/all-3d-printing-applications/airbus-a350-xwb-3d-printed-cable-mount, Son Erişim Tarihi: 02/05/2021.

19. İnternet: 3D Printing for Aerospace with EOS Technology. (2019). Web: https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/all-3d-printing-applications/ruag-aerospace-3d-printed-satellite-components, Son Erişim Tarihi: 02/05/2021.

20. Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., and Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91–110.

21. İnternet: 7 Helpful Numbers Quantify Design Rules for Additive Manufacturing. (2016). Web: https://www.additivemanufacturing.media/articles/7-helpful-numbers-quantify-design-rules-for-am, Son Erişim Tarihi: 25/04/2021.

22. Yasa, E., Kruth, J. P., and Deckers, J. (2011). Manufacturing by combining Selective Laser Melting and Selective Laser Erosion/laser re-melting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), 263–266.

23. Mazur, M., Leary, M., Sun, S., Vcelka, M., Shidid, D., and Brandt, M. (2016). Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5–8), 1391–1411.

24. Xiong, Y., Yao, S., Zhao, Z. L., and Xie, Y. M. (2020). A new approach to eliminating enclosed voids in topology optimization for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 32, 101006.

25. Zhou, Y., Lu, H., Ren, Q., and Li, Y. (2019). Generation of a tree-like support structure for fused deposition modelling based on the L-system and an octree. *Graphical Models*, 101, 8–16.

26. Bi, M., Tran, P., and Xie, Y. M. (2020). Topology optimization of 3D continuum structures under geometric self-supporting constraint. *Additive Manufacturing*, 36, 101422.

27. İnternet: New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles, GE Additive. (2018). Web: https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles, Son Erişim Tarihi: 14/02/2022.

28. Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., and Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 1, 77–86.

29. Read, N., Wang, W., Essa, K., and Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials and Design*, 65, 417–424.

30. Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke, W., and Kruth, J. P. (2011). Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. *22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011*, 484–495.

31. Beretta, S., Gargourimotlagh, M., Foletti, S., du Plessis, A., and Riccio, M. (2020). Fatigue strength assessment of "as built" AlSi10Mg manufactured by SLM with different build orientations. *International Journal of Fatigue*, 139, 105737.

32. Majeed, A., Ahmed, A., Salam, A., and Sheikh, M. Z. (2019). Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4), 288–295.

33. Teresa, A., Astarita, A., El, A., Manzo, A., Hassanin, E., Iannuzzo, G., Rosa, V. de, Acerra, F., Squillace, A., Iannuzzo, G., Rosa, V. de, Acerra, F., and Squillace, A. (2020). Assessment of the Mechanical Properties of AlSi10Mg Parts Produced Assessment of the Mechanical Properties of AlSi10Mg Parts Produced through Selective Laser Melting Under Different Conditions *Procedia Manufacturing*, 47, 1058–1064.

34. Thompson, A., Maskery, I., and Leach, R. K. (2016). X-ray computed tomography for additive manufacturing: A review. In *Measurement Science and Technology* (Vol. 27, Issue 7). Institute of Physics Publishing.

35. Cai, X., Malcolm, A. A., Wong, B. S., and Fan, Z. (2015). Measurement and characterization of porosity in aluminium selective laser melting parts using X-ray CT. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), 195–206.

36. Dursun, A. M., Tüzemen, M. Ç., Salamcı, E., Yılmaz, O., and Ünal, R. (2021). Investigation of Compatibility Between Design and Additively Manufactured Parts of Functionally Graded Porous Structures. *Journal of Polytechnic,* 25(3), 1069-1082

37. Hastie, J. C., Kartal, M. E., Carter, L. N., Attallah, M. M., and Mulvihill, D. M. (2020). Classifying shape of internal pores within AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion using 3D X-ray micro computed tomography: Influence of processing parameters and heat treatment. *Materials Characterization*, 163.

38. İnternet: International Organization for Standardization (ISO) and American Society for Testing and Materials (ASTM). (2015). Additive manufacturing - General principles – Terminology. Web: https://www.iso.org/standard/69669.html, Son Erişim Tarihi: 10/10/2022.

39. İnternet: What are the types of 3D printers and what can they do? (2019). Web: https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing, Son Erişim Tarihi: 18/09/2022.

40. İnternet: Powder Bed Fusion, Additive Manufacturing Research Group. (2017). Web: https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion, Son Erişim Tarihi: 20/09/2022.

41. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., and Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2, 041101.

42. Poyraz, Ö., and Kuşhan, M. C. (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 729–742.

43. Bendsøe, M.P., and Sigmund, O. (2011). *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications.* (İkinci Baskı). New York: Springer Limited, 2.

44. Olason, A., and Tidman, D. (2010). *Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process*. MSc Thesis, Mechanical Engineering Department, Chalmers University of Technology.

45. Göv, İ., Kütük, M. A. (2007). *Topoloji Optimizasyonunda Eleman Silme Metodunun Uygulanması,* XV Ulusal Mekanik Kongresi, Isparta, Türkiye.

46. İnternet: EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet Metal Solutions. Web: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf, Son Erişim Tarihi: 15/07/2022.

47. Niu, M.C. (2005). *Airframe Stress Analysis and Sizing.* (İkinci Baskı). Hong Kong: Conmilit Press Limited, 198.

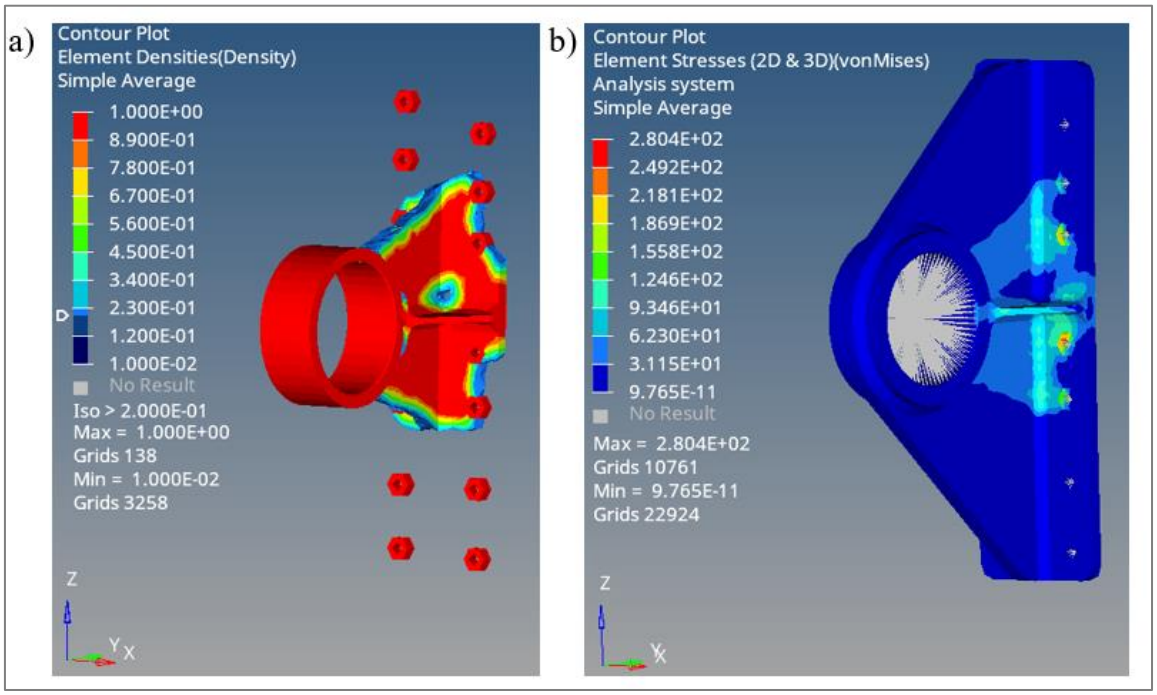
48. İnternet: MMPDS. (2013). Metallic Materials Properties Development and Standardization. Web: https://oss.jishulink.com/upload/202207/13dc46f8325d4bbebb11fabcaa7838d6.pdf, Son Erişim Tarihi: 28/11/2022.

49. İnternet: European Association of Aerospace Industries prEN 6115 Fastener Data Sheet. Web: https://genorma.com/en/project/show/cen:proj:67024, Son Erişim Tarihi: 12/10/2022.

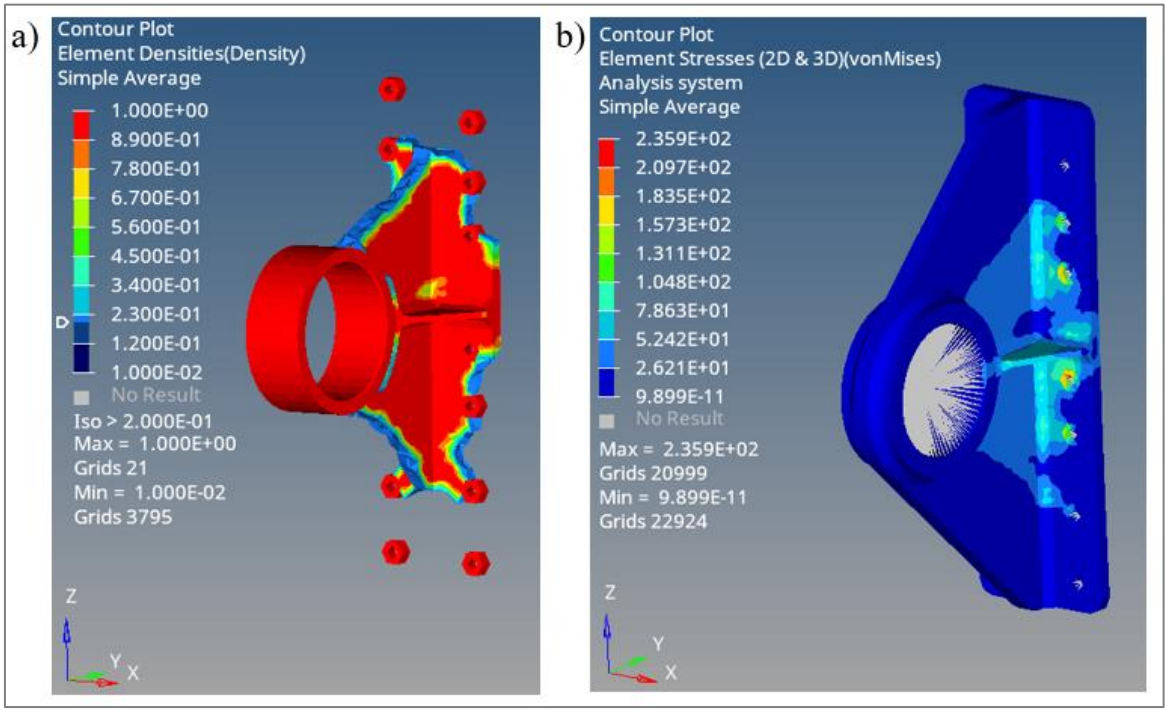
50. İnternet: Aerospace Threaded Fastener Strength in Combined Shear and Tension Loading. (2012). Web: https://ntrs.nasa.gov/citations/20120003667, Son Erişim Tarihi: 24/11/2022.

EKLER

EK-1. Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları

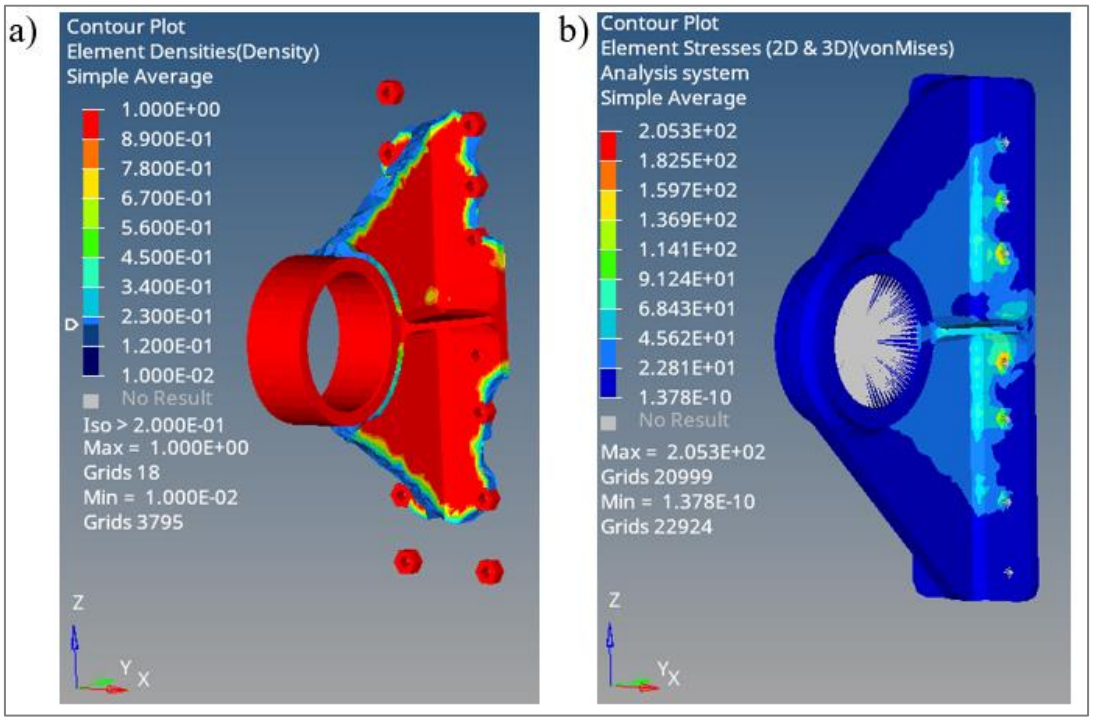


Şekil 1.1. 1 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

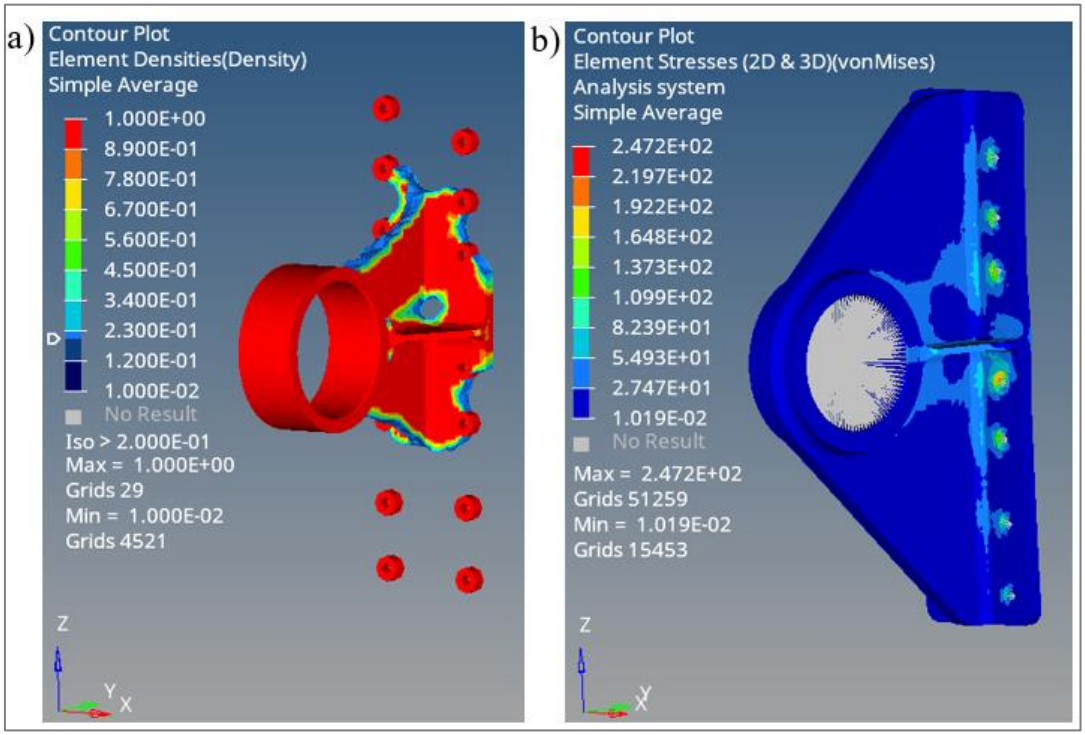


Şekil 1.2. 2 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

EK-1. (devam) Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları

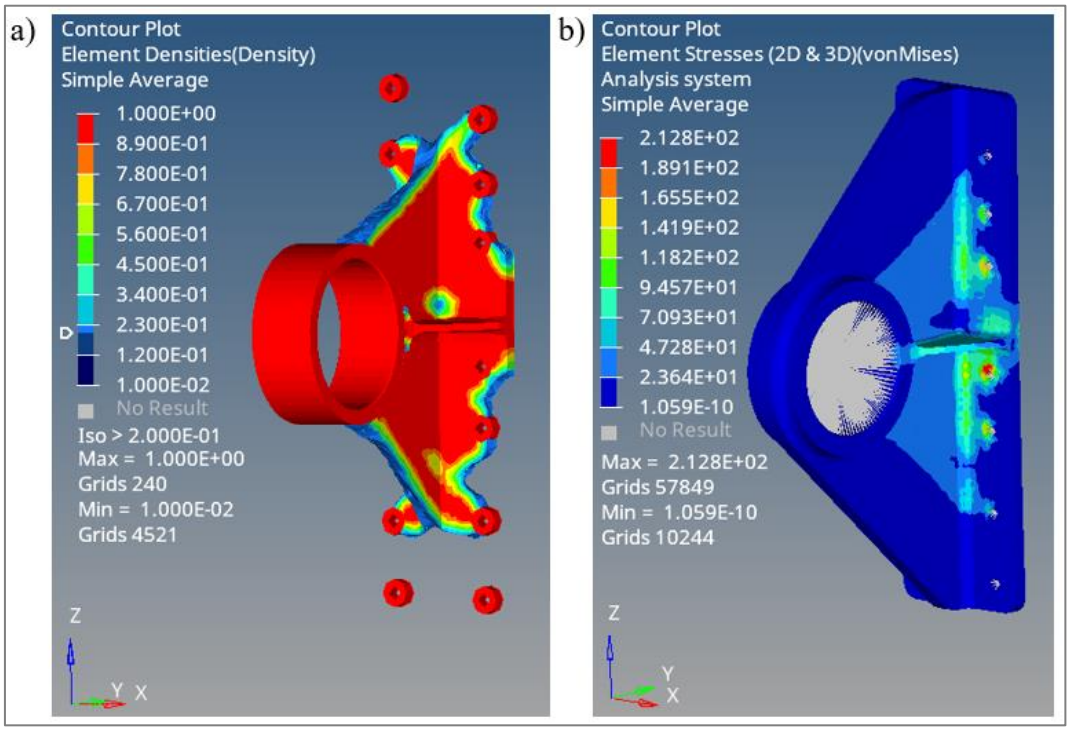


Şekil 1.3. 3 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

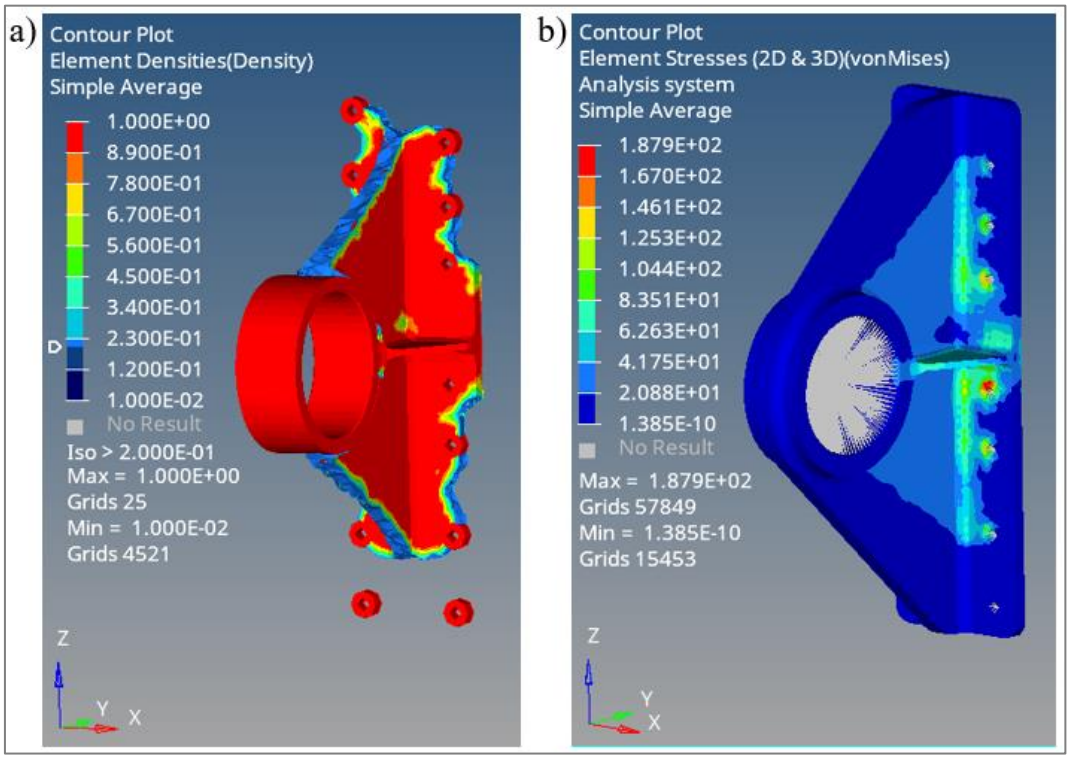


Şekil 1.4. 4 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

EK-1. (devam) Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları

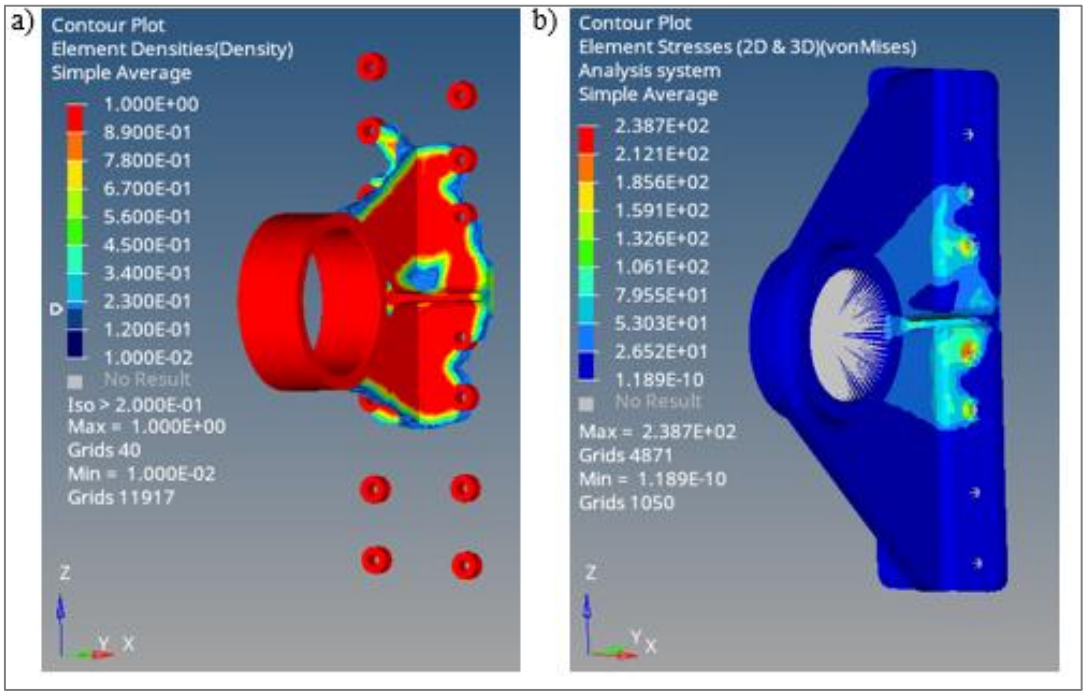


Şekil 1.5. 5 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

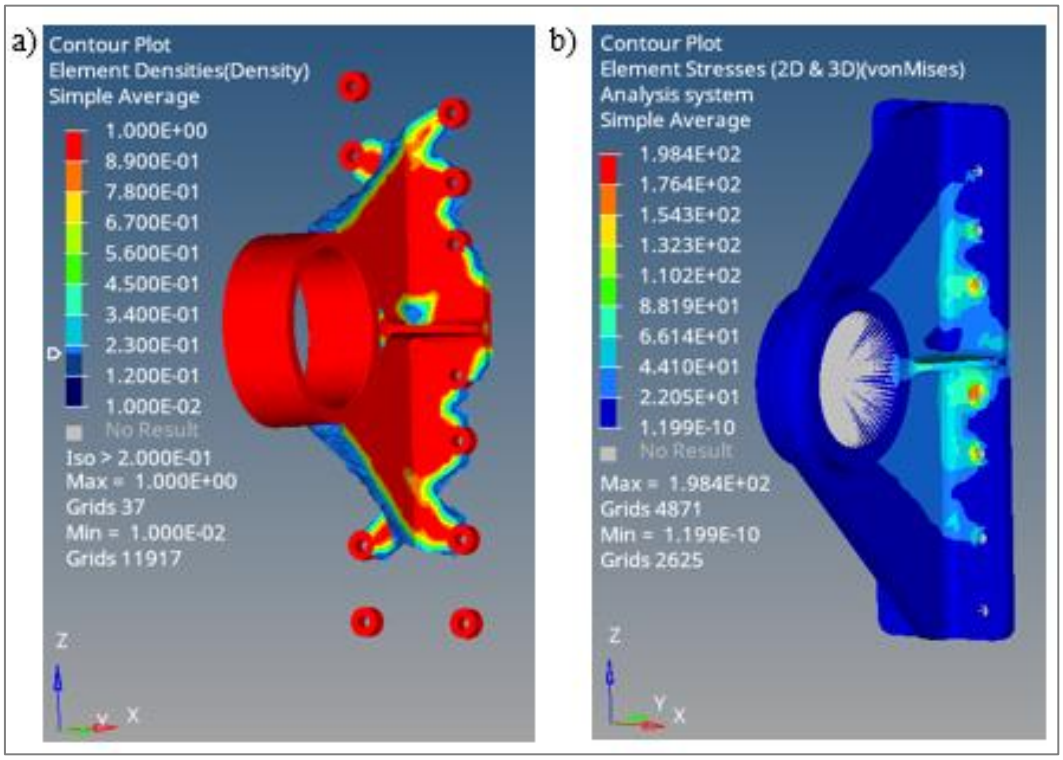


Şekil 1.6. 6 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

EK-1. (devam) Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları

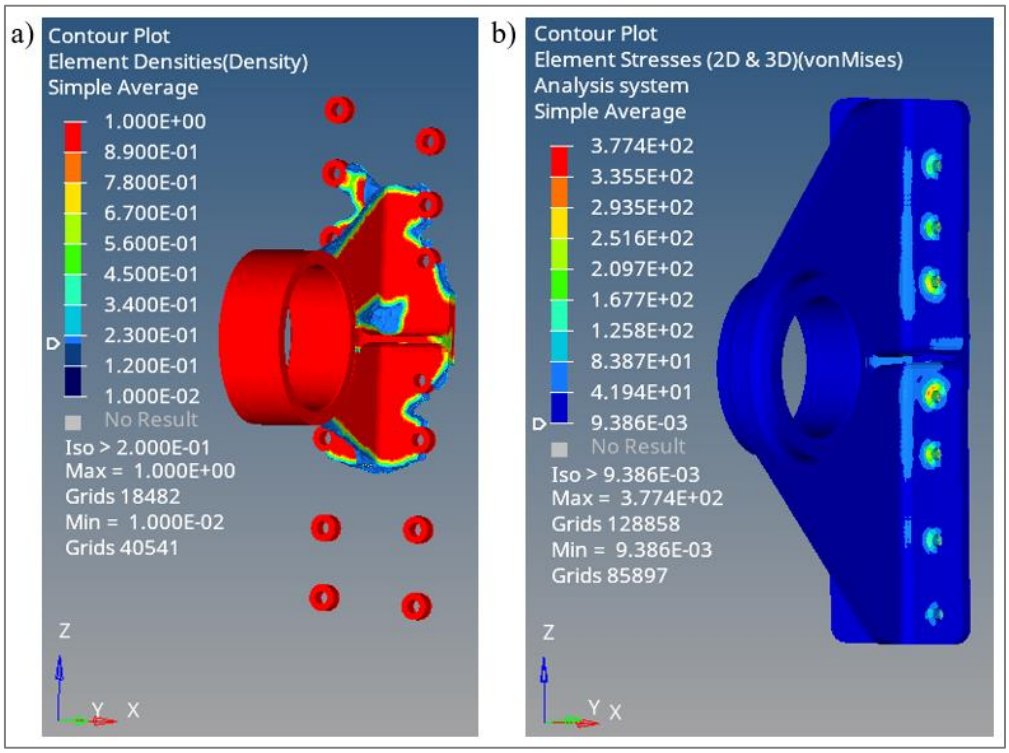


Şekil 1.7. 7 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

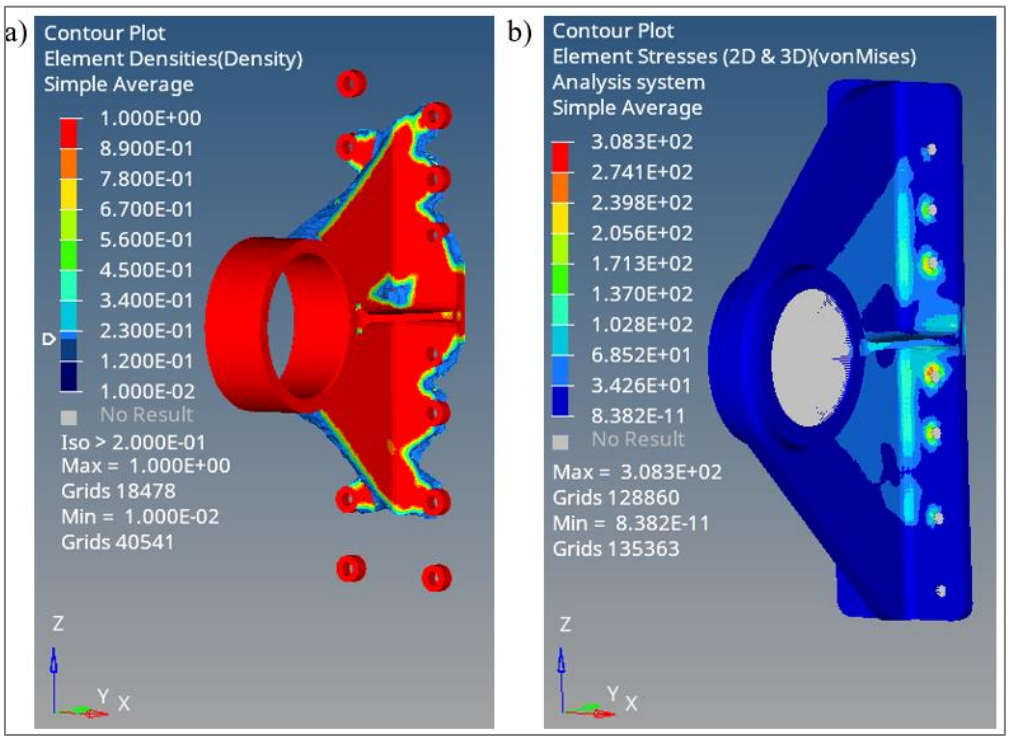


Şekil 1.8. 8 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

EK-1. (devam) Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları

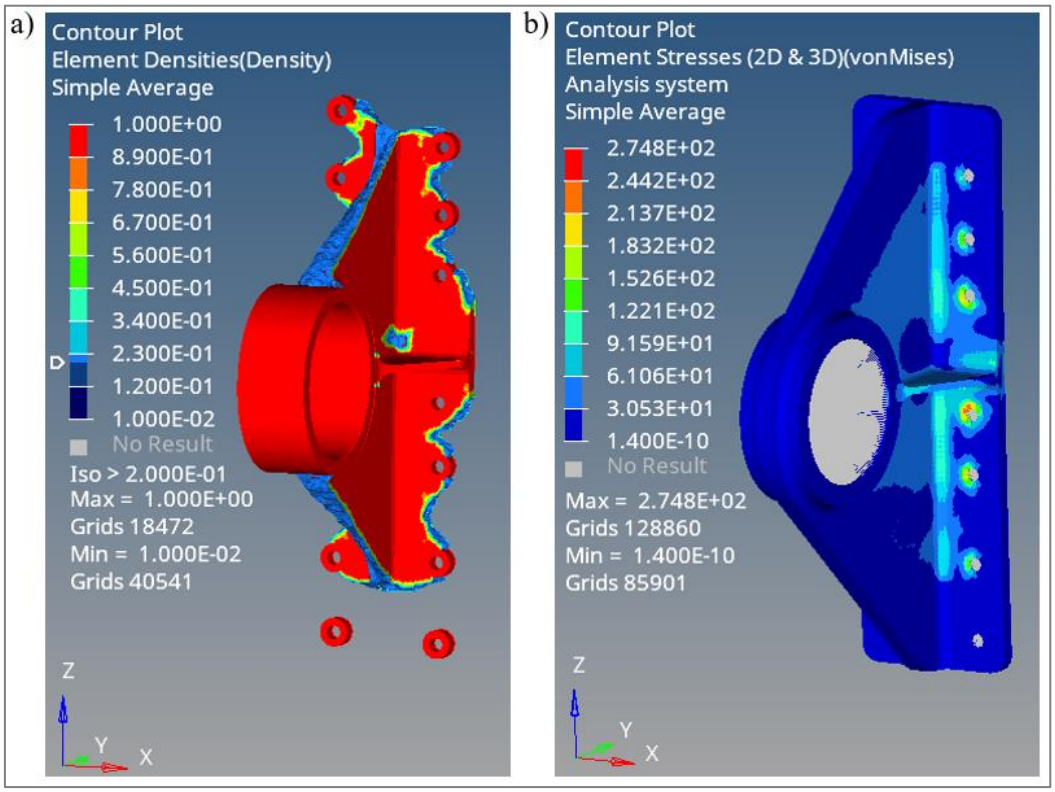


Şekil 1.9. 10 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

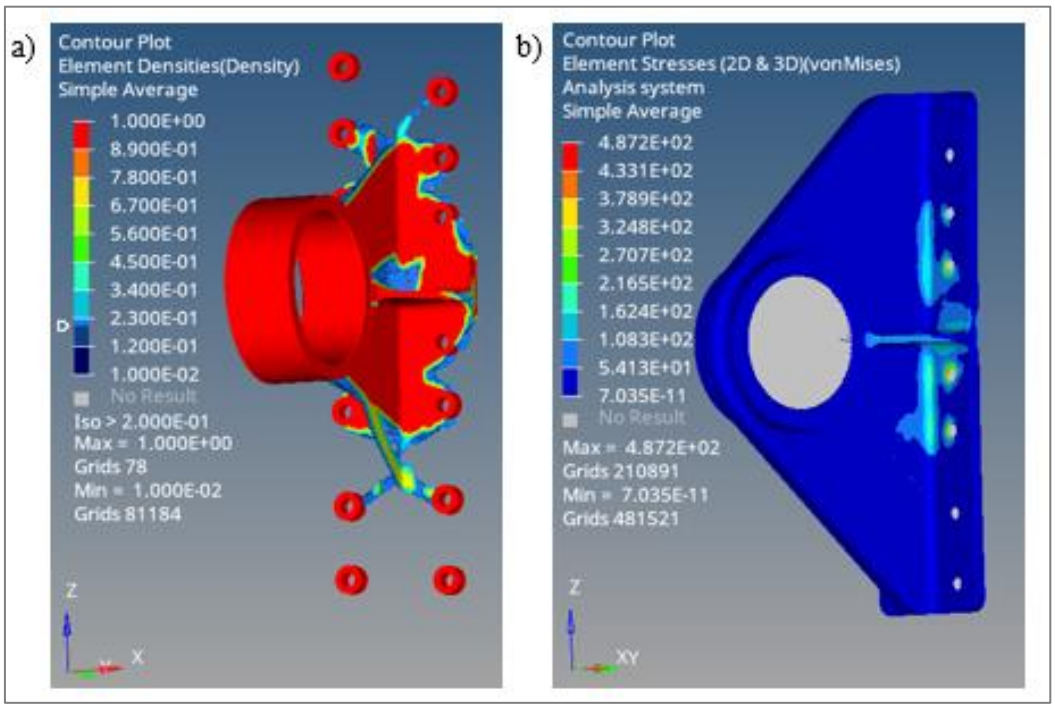


Şekil 1.10. 11 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

EK-1. (devam) Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları

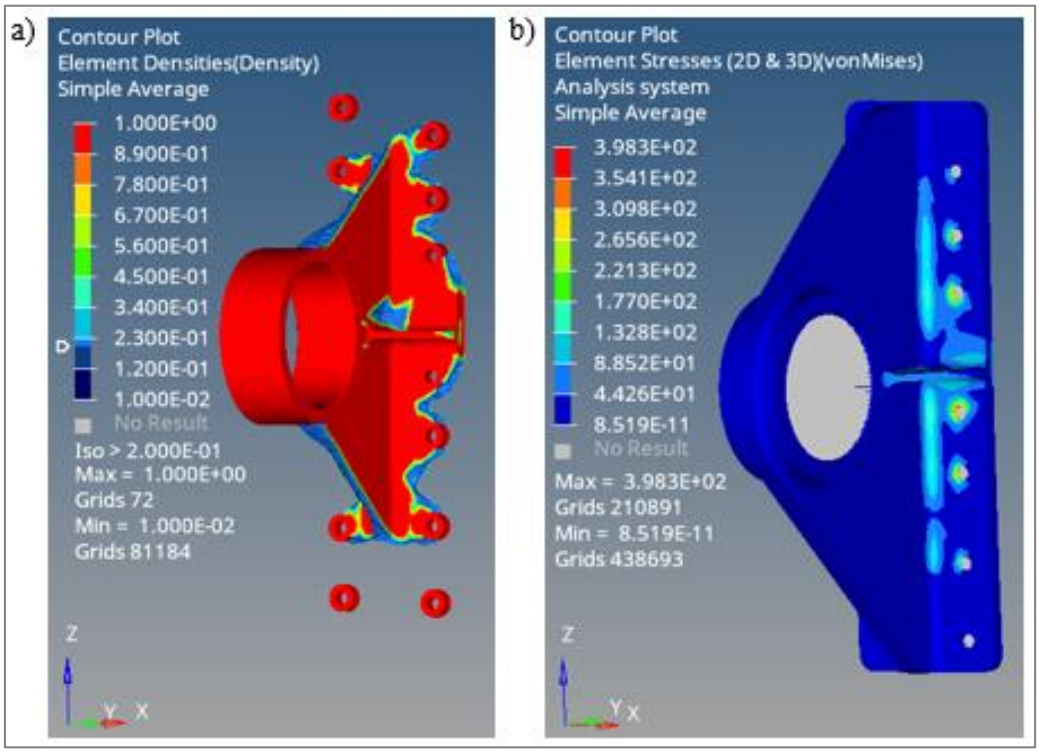


Şekil 1.11. 12 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

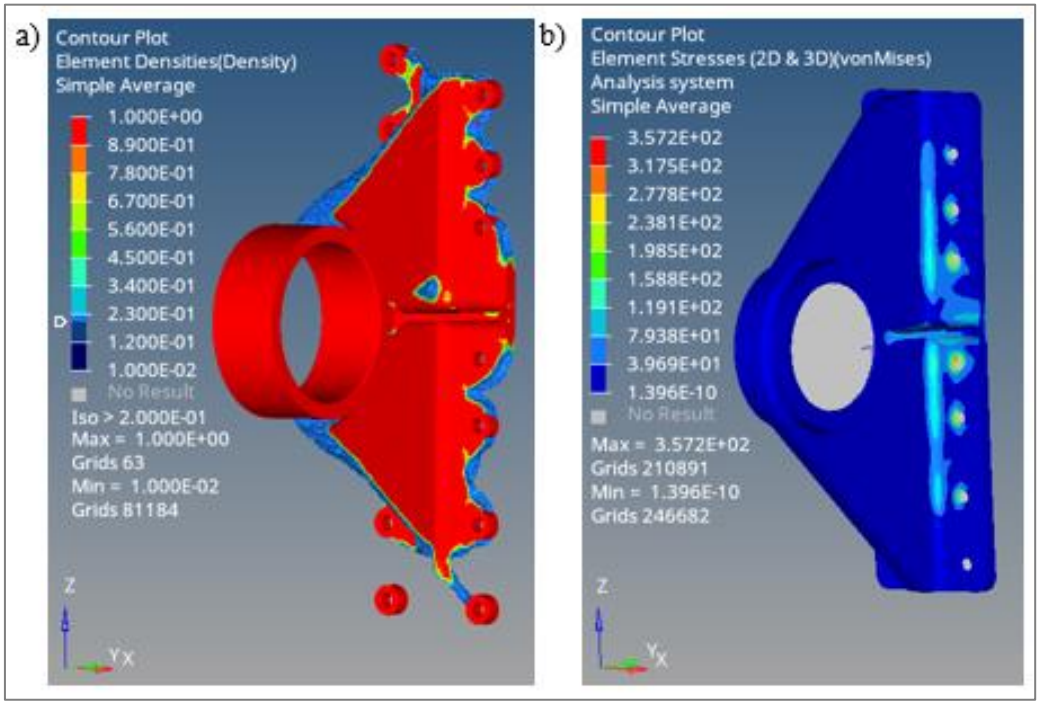


Şekil 1.12. 13 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı

EK-1. (devam) Topoloji Optimizasyonlarının Sonuçları



Şekil 1.13. 14 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı



Şekil 1.14. 15 numaralı optimizasyonun a) 0,2 iso değeri için oluşan optimizasyon modeli, b) Von Mises gerilme dağılımı



Gazili olmak ayrıcalıktır