



**FARKLI TOPOLOJİ OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ
PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

Fuat Sinan ATEŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2020

Fuat Sinan ATEŞ tarafından hazırlanan “FARKLI TOPOLOJİ OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. İsmail ŞAHİN

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan AYTAÇ

Milli Savunma Üniversitesi Kara Harp Okulu

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 01/10/2020

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

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fuat Sinan ATEŞ

01/10/2020

FARKLI TOPOLOJİ OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

(Yüksek Lisans Tezi)

Fuat Sinan ATEŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2020

ÖZET

Üretimin insanlar için öneminin zaman içerisinde daha da kavranmasıyla beraber tarihte yaşanan bilimsel gelişmelerin ışığıyla ihtiyaçları doğrultusunda yeni üretim yöntemleri arayışına girilmiştir. Sanayi devrimi 4.0 ile hayatımıza girmiş olan eklemeli imalat, parça ve model üretimleri hızlandırırken kullanılacak olan malzemeden tasarruf sağlanmıştır. Eklemeli imalatla sağlanan ham madde kullanımındaki verimin artışı parçalar üzerinde bazı optimizasyon çalışmalarına da yol açmıştır. Günümüz imalatlarında önemli bir yere sahip olan, en iyi hedef ve sonuca, var olan durum ya da durumlarla ilgili iyileştirmeler yapılarak ulaşılması fikri topoloji optimizasyonu konusu üzerine birçok çalışma yapılmasına neden olmuştur. ESO/BESO, Homojenizasyon, Seviye Seti Yöntemi ve SIMP gibi bir tasarım alanında en uygun malzeme dağılımını bulmayı amaçlayan çalışmalarla tasarlanan hacmin kısıtlamalarına maruz kalmış ve en aza indirgenmiş bir uyumluluk amaç fonksiyonu elde edilmek istenmektedir. Amaç fonksiyonu olarak gerinim enerjisini veya hacmi minimize etmek hedeflenirken, kısıtlar ise değişkenlik gösterir ve optimizasyonu uygulayacak programlarda gerekli hesaplamaların ya tanımlanarak ya da programa önceden tanıtılmış formüllerinde malzeme bilgileri girilerek istenilen gerekli topoloji optimizasyonlarına ulaşılır. Analiz edilen parçanın uygun dosya formatına getirilmiş modeli ortaya çıkar ve bu modeli eklemeli imalat yöntemleriyle üretmek mümkündür.

Bilim Kodu : 91428

Anahtar Kelimeler : Topoloji Optimizasyonu, Bilgisayar Destekli Mühendislik, SIMP

Sayfa Adedi : 181

Danışman : Doç. Dr. İsmail ŞAHİN

İkinci Danışman : Dr. Harun GÖKÇE

A STUDY ON THE PERFORMANCE EVALUATION OF DIFFERENT TOPOLOGY
OPTIMIZATION ALGORITHMS

(M. Sc. Thesis)

Fuat Sinan ATEŞ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2020

ABSTRACT

With the understanding of the importance of production for people in time, in the light of scientific developments in the history, the search for new production methods has been started. With the industrial revolution 4.0, additive manufacturing, which has entered into our lives, accelerated the production of parts and models while saving the material to be used. Increased efficiency in the use of raw materials provided by additive manufacturing has led to some optimization studies on the parts. The idea of achieving the best goal and result, which has an important place in today's productions, by making improvements related to the existing situation or situations has led to many studies on the subject of topology optimization. In order to find the most appropriate material distribution in a design area such as ESO / BESO, Homogenization, Level Set Methods, SIMP it is desirable to obtain a compatibility objective function that has been subjected to the constraints of the volume and which has been designed. While minimizing strain energy or volume is used as the objective function, the constraints vary and the required topology optimizations are achieved by defining the necessary calculations in the programs that will implement the optimization or by entering the material information in the formulas previously introduced in the program. The model of the analyzed part is converted to the appropriate file format, and it is possible to produce this model by additive manufacturing methods.

Science Code : 91428

Key Words : Topology Optimization, Computer Aided Engineering, SIMP

Page Number : 181

Supervisor : Asst. Dr. İsmail ŞAHİN

Co-Supervisor : Dr. Harun GÖKÇE

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında desteğini eksik etmeyen sayın danışman hocam Doç. Dr. İsmail ŞAHİN'e ve 2. danışmanım Dr. Harun GÖKÇE'ye sabırları, hoşgörüler ve tez yazım aşamamda gösterdikleri yollar için teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her koşulda yanımda olan yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen sevgili anneme, destekleri ve bana olan inancı için babama, ihtiyacım olduğunda her zaman yanımda olan abime ve bütün arkadaşlarıma minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMLAR	3
2.1. Üretim ve Sanayinin Zaman İçinde Gelişimi.....	3
2.2. 3D Yazıcıların Tarihsel Gelişimi ve Eklemeli İmalat.....	4
2.2.1. Stereolitografi	8
2.2.2. Eriyik yığma ile modelleme.....	9
2.2.3. SLS / SLM / DMLS	11
2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	12
2.4. Optimizasyon	16
2.4.1. Yapısal optimizasyon.....	18
3. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU	23
3.1. Topoloji Optimizasyonu Yöntemi	24
3.2. Bulgusal Yöntemler	28
3.2.1. ESO yöntemi.....	28
3.2.2. BESO yöntemi	31
3.3. Matematik Temelli Metodlar	36

	Sayfa
3.3.1. Homojenizasyon yöntemi	36
3.3.2. Seviye seti yöntemi	39
3.3.3. SIMP yöntemi	43
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	57
4.1. ESO Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	59
4.2. BESO Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	64
4.3. Homojenizasyon Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	68
4.4. Seviye Seti Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	71
4.5. SIMP Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	76
5. VAKA ÇALIŞMALARI	89
5.1. Vaka 1 – Ankastre Kiriş Optimizasyon Çalışması.....	89
5.2. Vaka 2 – Braket Optimizasyonu Çalışması	108
5.3. Vaka 3 – Jet Motoru Braketi Optimizasyonu Çalışması.....	131
6. SONUÇ	161
KAYNAKLAR	165
ÖZGEÇMİŞ	181

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Şekil optimizasyonunda izotropik katı veya boş (ISE) ya da izotropik katı (IS) topolojileri için kullanılan SIMP yöntemi	49
Çizelge 4.1. Topoloji optimizasyonu yöntemleri.....	57
Çizelge 4.2. Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin avantajları.....	58
Çizelge 5.1. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış ankastre kirişte SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları	95
Çizelge 5.2. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış ankastre kirişte SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmeleri.....	96
Çizelge 5.3. Farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi.....	98
Çizelge 5.4. Farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi.....	103
Çizelge 5.5. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketten SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının izotmetrik görünüşleri.....	116
Çizelge 5.6. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketten SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin izometrik görünüşleri..	117
Çizelge 5.7. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketten SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının üstten görünüşleri.....	118
Çizelge 5.8. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketten SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin üstten görünüşleri.....	119
Çizelge 5.9. Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi	121
Çizelge 5.10. Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi	126

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.11. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının izotmetrik görünümüleri.....	143
Çizelge 5.12. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin izotmetrik görünümüleri.	144
Çizelge 5.13. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının üstten görünümüleri	145
Çizelge 5.14. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin üstten görünümüleri	146
Çizelge 5.15. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının alttan görünümüleri	147
Çizelge 5.16. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin alttan görünümüleri	148
Çizelge 5.17. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının önden görünümüleri	149
Çizelge 5.18. Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi	150
Çizelge 5.19. Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi	155

Çizelge**Sayfa**

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Endüstri devrimlerinin tarih içerisindeki süreci	4
Şekil 2.2. Endüstri 4.0 yapı şeması	5
Şekil 2.3. STL dosyasındaki üçgenlerin kullanımı	7
Şekil 2.4. SLA makineleri çalışma sistemleri	9
Şekil 2.5. FDM malzeme biriktirme prosesi	10
Şekil 2.6. SLS sürecinin şematik gösterimi	11
Şekil 2.7. Modelin geometrisi ve matematik modellemesi arasındaki fark	15
Şekil 2.8. Optimizasyonda tasarımın hedeflere göre nihai halini alması	17
Şekil 2.9. Kafes modeli illüstrasyonu ve çeşitli yapısal optimizasyon türleri	19
Şekil 2.10. Grafikselsel olarak boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu gösterimi	19
Şekil 2.11. Yapısal tasarım optimizasyon döngüsü	20
Şekil 2.12. Boyut optimizasyonu uygulanmış bir model	21
Şekil 2.13. Şekil optimizasyonu için en eski çözümlerden biri	21
Şekil 2.14. Şekil optimizasyonu uygulamasıyla yapıdaki gerilmenin azaltılması	22
Şekil 2.15. Pinyon dişlisinde şekil optimizasyonu uygulaması	22
Şekil 3.1 Topoloji optimizasyonu yaklaşımını kullanarak önerilen yöntem	24
Şekil 3.2. Sürekli yapıların topoloji optimizasyonu için iki kategoride toplanmış önerilen yaklaşımlar	27
Şekil 3.3. Başlangıç modelinin bazı red oranlarıyla incelenerek iki çubuklu kafes yapıya dönüşüm süreci	30
Şekil 3.4. BESO akış şeması	33
Şekil 3.5. Sertlik üzerine ele alınmış modellerdeki optimal tasarımlar	35
Şekil 3.6. Sonlu elemanlar ağı uygulanmış bir hücre	38
Şekil 3.7. Tasarım alanı içerisinde bulunan bir mikro yapının birim hücresi	39
Şekil 3.8. Seviye seti yönteminin bir illüstrasyonu	41
Şekil 3.9. Seviye seti optimizasyonu prosedürünün akış şeması	43

Şekil	Sayfa
Şekil 3.10. Yoğunluk bazlı topoloji optimizasyon modellerinde ara yoğunluklardaki cezalandırma modellerinin karşılaştırılması.	46
Şekil 3.11. SIMP akış şeması.....	48
Şekil 3.12. Çeşitli mikro yapılarda sertlik (s) / maliyet veya yoğunluk (ρ) ilişkisi.	49
Şekil 3.13. Cezalandırmasız SIMP (SIM) kullanılarak konsol plakası problemi için optimize edilmiş sonuç.	50
Şekil 3.14. Değişken yoğunlukların değişken hacimli kafes birim hücrelerine haritalandırılması.....	50
Şekil 3.15. Yoğunluğu birim hücrelere eşleyerek birleştirilen katı ve kafes yapı	50
Şekil 3.16. Young elastikiyet modülü ile malzeme yoğunluk faktörü arasındaki ilişki .	52
Şekil 3.17. SIMP Topolojileri.....	55
Şekil 3.18. SIMP prosedürünün imalat maliyetleri temelinde doğrulanması	56
Şekil 4.1. Kırık kemikte metal implant modeli.....	59
Şekil 4.2. Evrimsel kemik erozyonu öyküsü	60
Şekil 4.3. Sabit destekli Michell yapısı için hacimsel evrim geçmişi.....	61
Şekil 4.4. Michell yapısına uygulanan çeşitli iterasyonlardaki denge durumunun optimal topolojisi	61
Şekil 4.5. Yapının başlangıç ve optimizasyon sonucu ulaşılan en uygun tasarımları ..	63
Şekil 4.6. Elde edilen optimal göz boşluğu geometrisi ve veriler ışığında modellenmesi.....	63
Şekil 4.7. BESO yöntemiyle iterasyonlar sonucunda malzeme eklenip veya gereken yerde gereksiz unsurlar uzaklaştırılarak tasarlanan bir yapı.....	64
Şekil 4.8. Her iki ucun da sabit olduğu yaya köprüsünün evrimsel süreci	66
Şekil 4.9. Bir ucu sabit diğeri ise iskeleye destekli uç silindirik yaya köprüsü evrimsel süreci.....	67
Şekil 4.10. Bir kompozit çubuğun homojenizasyon yöntemiyle incelenmesi	70
Şekil 4.11. A ve B malzemesinden oluşan sıralı lamine kompozit yapısı	71
Şekil 4.12. Seviye seti optimizasyonu uygulanan üç farklı yapı için 6 iterasyon sonucu elde edilen örnek iki çubuklu yapılar	72

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Homojenizasyon yöntemiyle hesaplanmış bir konsol yapıda kompozit ve cezalandırma tekniğiyle elde edilmiş çözüm.....	73
Şekil 4.14. Seviye seti yöntemiyle elde edilen optimum sonuçlar	73
Şekil 4.15. Farklı frekans aralıkları için ilk tasarım ve optimum tasarım.....	76
Şekil 4.16. Makara destekli kirişte tasarım alanı ve topoloji optimizasyonu yöntemlerinden SINH yöntemi uygulanarak elde edilmiş sonuç	78
Şekil 4.17. Ele alınan örneklerin başlangıç tasarımları.....	80
Şekil 4.18. İngiliz anahtarı üzerine bir topoloji optimizasyonu çalışması.....	81
Şekil 4.19. Jet motoru braketinin topoloji optimizasyonu	83
Şekil 4.20. Salıncak kolu modelinin evrim süreci	85
Şekil 4.21. Seçilen braketin sınır koşulları, topoloji optimizasyonu aşaması, optimizasyon sonucu elde edilen modeli.....	86
Şekil 4.22. Askıya benzer yapı ve ankastre kirişte SIMP yöntemi ile optimizasyon çalışmaları	87

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Topoloji optimizasyonu uygulanıp eklemeli imalat yöntemi kullanılarak elde edilen braket.....	79
Resim 4.2. Sıkıştırma testlerinden sonra numuneler	84
Resim 5.1. Ankastre kirişin tasarım alanı ölçüleri	90
Resim 5.2. Ankastre kirişin mekanik özellikleri	90
Resim 5.3. Ankastre kirişte sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuş çözüm ağı	91
Resim 5.4. Sınır koşulları ve uygulanan yük	92
Resim 5.5. Sonlu elemanlar analizi uygulanmasıyla ankastre kirişte gözlemlenen von Mises gerilmeleri	93
Resim 5.6. Topoloji optimizasyonu uygulanacak ankastre kirişte optimizasyon yönteminin seçimi ve cezalandırma katsayısının belirlenmesi.....	93
Resim 5.7. Vaka 2’de incelenen braketin izometrik görünümü.....	108
Resim 5.8. Vaka 2’de incelenen braketin üstten görünümü	108
Resim 5.9. Çelik malzeme kullanılan braketin girilen mekanik özellik verileri	109
Resim 5.10. Braketin bölüm atamasının uygulanması	110
Resim 5.11. Braketin sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuş çözüm ağı	111
Resim 5.12. Brakete uygulanacak analiz tipinin seçimi	111
Resim 5.13. Braketin sınır koşulları	112
Resim 5.14. Brakete uygulanacak olan yükün tanımlanması	112
Resim 5.15. Sonlu elemanlar analizi uygulanmış brakette gözlemlenen von Mises gerilmelerinin izometrik ve önden görünümü	113
Resim 5.16. Topoloji optimizasyonu uygulanacak brakette optimizasyon algoritmasının seçimi ve cezalandırma katsayısının belirlenmesi.....	114
Resim 5.17. Brakette hedef fonksiyonu ve uygulanacak kısıtlamanın tanımlanması ...	115
Resim 5.18. İncelenecek olan jet motoru braketinin izometrik görünümü.....	131
Resim 5.19. İncelenecek olan jet motoru braketinin üstten görünümü	131

Resim	Sayfa
Resim 5.20. Titanyum alaşıımı malzemenin yoğunluk verilerinin girilmesi	132
Resim 5.21. Titanyum alaşıımı malzemenin mekanik özelliklerinin tanımlanması	133
Resim 5.22. Jet motoru braketine kısım atamasının uygulanması	134
Resim 5.23. Jet motoru braketi için ağ elemanı büyüklüğü seçimi	135
Resim 5.24. Jet motoru braketinin sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuş çözüm ağı	135
Resim 5.25. Jet motoru braketi için seçilen analiz tipi	136
Resim 5.26. Uygulanacak moment için deliklerin ortasında referans noktası oluşturulması	136
Resim 5.27. Yük uygulanacak deliklerle referans noktasının ilişkilendirilmesi	137
Resim 5.28. Jet motoru braketinin sınır koşulları	137
Resim 5.29. Yükün moment olarak jet motoru braketine uygulanması	138
Resim 5.30. Sonlu elemanlar analizi uygulanmış jet motoru braketinde gözlemlenen von Mises gerilmelerinin izometrik ve üstten görünümü	138
Resim 5.31. Topoloji optimizasyonu uygulanacak jet motoru braketinde optimizasyon algoritmasının seçimi ve cezalandırma katsayısının belirlenmesi	139
Resim 5.32. Jet motoru braketinin tasarım değişkenleri	140
Resim 5.33. Jet motoru braketinin hedef fonksiyonu ve uygulanacak kısıtlamanın tanımlanması	141
Resim 5.34. Jet motoru braketinde optimizasyon işlemi sırasında hacim boşaltılması istenilmeyen alanlarının tanımlanması	142

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
ρ	Eleman yoğunluğu
ρ_e	Her sonlu e elemanı için malzeme yoğunluğu
P_i	Bölünen parçadaki i'nci yerel elemanın yoğunluğunu
ρ_{min}	Elemanların gerekli minimum yoğunluk değeri
C	Uyumluluk (Komplians)
cm	Santimetre
E_0	Young elastikiyet modülü
f	Hedef fonksiyonu
F	Kuvvet vektörü
g_i	i'nci yerel elemanın sınırlamaları
K	Küresel sertlik matrisi
K_p	Yoğunluklara göre hesaplanan küresel sertlik matrisi
K_e	E elemanının küresel sertlik matrisi
K_{SIMP}	SIMP yöntemi için küresel sertlik matrisi
M_{hedef}	Optimizasyonda hedeflenen kütle
mm	Milimetre
N	Tasarım alanındaki tüm elemanların sayısı
Nmm	Newtonmilimetre
p	Cezalandırma faktörü
s	Düzlem gerilmede normalize edilmiş levha sertliği
u	Küresel yer değiştirme vektörü
u_e	E elemanının küresel yer değiştirme vektörü
u^T	Küresel yer değiştirme vektörü transpozisi
V	Yerel elemanların toplam dağılımına sahip malzeme hacmi
V_e	E elemanının hacmi
V_0	Tasarım alanının hacmi

Simgeler **V_f**

İzin verilen hacim kesri

 V_i

İ'nci yerel elemanın kendine ait hacmi

Kısaltmalar**Açıklamalar****AESO**Additive Evolutionary Structural Optimization
(Eklemeli Evrimsel Yapı Optimizasyonu)**AM**

Additive Manufacturing (Eklemeli İmalat)

 AR_{max}

Maximum Addition Ratio (Maksimum Ekleme Oranı)

BESOBidirectional Evolutionary Structural Optimization
(Çift Yönlü Evrimsel Yapı Optimizasyonu)**BT**

Bilgi Teknolojileri

CADComputer Aided Design (Bilgisayar Destekli
Tasarım)**CAM**Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli
İmalat)**CCO**Continuous Compliance Optimization (Sürekli
Uyumluluk Optimizasyonu) **C_{IR}** Inclusion Ratio of Optimization Parameter
(Optimizasyon Parametresindeki Dahil Etme Oranı) **C_{RR}** Rejection Ratio of Optimization Parameter
(Optimizasyon Parametresindeki Red Oranı)**DCO**Discrete Compliance Optimization (Ayrık Uyumluluk
Optimizasyonu)**DMLS**Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer
Sinterleme)**ECC**

Edge Centre Cube (Kenar Merkezli Küp)

ER

Evolutionary Volume Ratio (Evrimsel Hacim Oranı)

ESOEvolutionary Structural Optimization (Evrimsel Yapı
Optimizasyonu)**FCC**

Face Centre Cube (Yüz Merkezli Küp)

FE

Finite Elements (Sonlu Elemanlar)

FEA

Finite Elements Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)

FR

Filter Radius (Filtre Yarıçapı)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

IGS/IGES	Initial Graphics Exchange Specifications (İlk Grafik Değişimi Belirtimi)
ISE	Isotropic Solid or Empty (İzotropik Katı veya Boş)
MP	Mathematical Programming (Matematiksel Programlama)
OC	Optimality Criteria (Optimallik Kriteri)
OMD	Optimal Material Distribution (Optimum Malzeme Dağılımı)
PLC	Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantık Denetleyiciler)
RAMP	Rational Approximation of Material Properties (Malzeme Özelliklerinin Rasyonel Yaklaşıklığı)
RC	Rejection Criteria (Red Kriteri)
RR	Rejection Ratio (Red Oranı)
SCO	Stress-Constrained Optimization (Gerilim Kısıtlı Optimizasyon)
SE	Strain Energy (Gerinim Enerjisi)
SERA	Sequential Element Rejection and Admission (Sıralı Eleman Reddi ve Kabulü)
SIM	Solid Isotropic Material without Penalization (İzotropik Malzemelerin Cezasız Kombinasyonu)
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization (İzotropik Malzemelerin Ceza Kombinasyonu)
SLS	Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
SLM	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
SRV	Sum of Reciprocal Variables (Karşılıklı Değerlerin Toplamı)
TO	Topology Optimization (Topoloji Optimizasyonu)
VC	Vertex Cube (Köşe Merkezli Küp)
X-FEM	Extended Finite Element Method (Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi)

1. GİRİŞ

Günümüzde bulunan yeni bilimsel yöntemler sayesinde hem eğitimde hem de tasarım ve üretimde inovasyon sağlanmış olup eski yöntemlerin de geliştirilip çağa ayak uydurmasına çalışılmış, böylece en önemli sayılabilecek maddelerden olan zaman ve ekonomik anlamda tasarruf sağlanmıştır. Yeni ve güncellenmiş teknolojiler, amaçlanan hedefler doğrultusunda ilerleyebilmek için önemli katkılar sunmaktadır. Bunlardan 3 boyutlu yazıcılar hayatımıza eklenen önemli teknolojik gelişmelerden biri sayılırken, karmaşık parçaların incelenmesinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. 3 boyutlu yazıcılarda üretimi sağlayabilmek için öncesinde bilgisayar programlarında bazı modellemeler yapılmaktadır. Oluşturulan bu modeller bilgisayar ortamında .stl gibi bazı formatlara dönüştürülmektedirler. Uygun hale getirilen modellemeler ile geleneksel imalat yöntemleriyle 3 boyutlu yazıcılarda çok daha kısa sürelerde somut nesneler elde edilebilmektedir [1,2].

Nesnelerin elde edilmesi için 3 boyutlu yazıcılarda üretilecek parçalarda göz önünde bulundurulması gereken koşullardan olan malzeme kullanımının hem daha az olması istenirken hem de az kullanılan bu malzemenin daha verimli sonuçlar verebilmesi için ise bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunun yanında malzemenin özelliklerinin kaybolmaması da mühendislik çalışmalarında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biridir. Elde edilecek parçalar bilgisayar destekli programlar yardımıyla analiz edilip, daha uygun üretim şartları aranmaktadır. Giderek yaygınlaşan ve kullanılan en önemli yöntemlerden sayılan çeşitli optimizasyon çalışmalarıyla son ürünün iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Günümüz pazarında mühendislik çalışmalarının giderek daha rekabetçi bir hal almasıyla parça üretimlerinde kaynakların olabilecek en optimum biçimde kullanılması olarak da bilinen optimizasyon uygulamaları, ciddi bir şekilde dikkate alınmaya başlamıştır. Son ürünlerin mekanik özelliklerinin korunmasının istendiği ve bu beklentinin karşılanırken aynı zamanda ürünlerin daha hafif olmalarının gerekmesiyle, sonuca ulaşılabilmesi adına optimizasyon çalışmaları uygulamaları gereklilik haline gelmiştir. Uygun yazılımların tercih edilmesiyle kullanılacak olan optimizasyon algoritmaları sayesinde geleneksel imalat yöntemlerine göre hem daha kolay hem de daha işlevli parçalar elde edilmiştir.

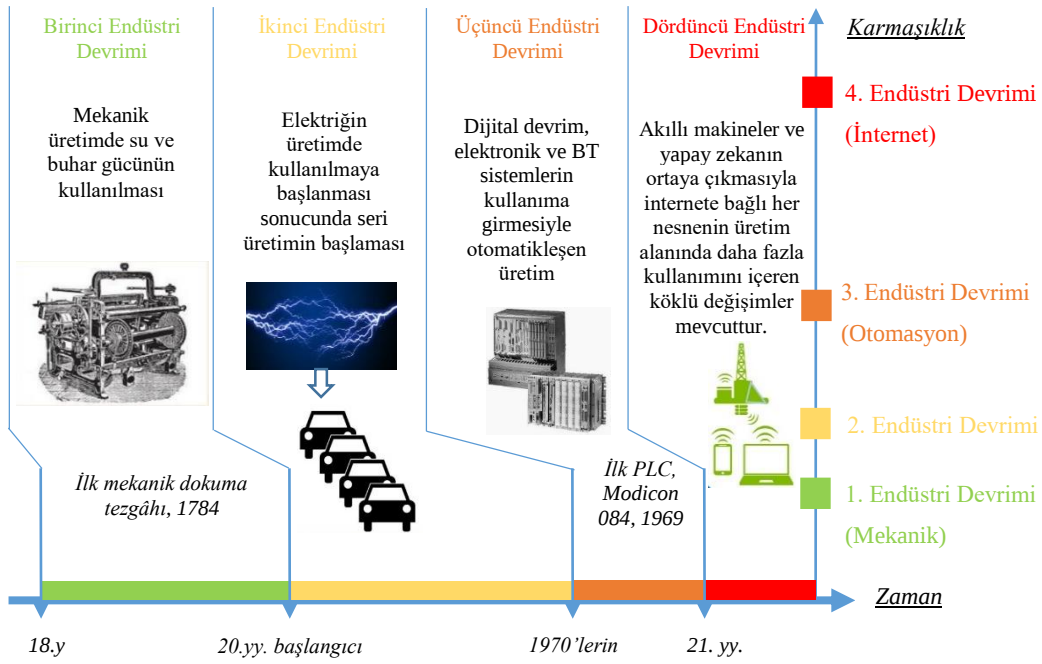
Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilecek olan parçaların mekanik özellikleri korunurken, malzeme kullanımı da azaltılarak elde edilmesi için uygulanacak optimizasyon çalışmalarında tercih edilen algoritmaların, tasarım alanı belirtilmiş ilk parçaya bilgisayar destekli programlarla sonlu elemanlar analizi uygulanması sonucundaki verilere farklı topoloji optimizasyonu algoritmaları çalıştırılarak karşılaştırılması incelenmektedir. Bu algoritmalar konu bazında bulgusal ve matematiksel temelli yöntemler olmak üzere incelenmiş, bunlardan bulgusal olanlar ESO, BESO başlıkları altında ele alınmış olup; homojenizasyon yöntemi, seviye seti yöntemi ve de SIMP yöntemine ise matematiksel temelli yöntemler olarak değinilmiştir. Topoloji optimizasyonu algoritmaları için ayrıca literatür incelemeleri gerçekleştirilmiş, algoritmaların tarihsel gelişimleri ve çeşitli kullanımları farklı çalışmalarda da gözlemlenmiş ve tezin içinde örneklendirilmiştir. Literatür araştırmalarının sonrasında ele alınan vakalarda ise SIMP yöntemi ve geliştirilmiş SIMP yöntemi olarak bilinen RAMP yöntemi tercih edilerek karşılaştırılmış olup ilk önce ankastre giriş üzerinde ele alınan bu algoritmalar, daha sonra iki farklı braket için aynı hedef fonksiyonlarında farklı hacim kısıtlamalarında hem grafiksel hem de görsel olarak incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda algoritma değişiminin parça optimizasyonunda farklı sonuçlara yol açtığını ve sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen von Mises gerilmelerinin farklı değerlerde elde edildiğini gözler önüne sermiştir.

2. KAVRAMLAR

Bu tezin amacı, üretilecek bir parçanın önce bilgisayar ortamında CAD programlarıyla modellenerek tasarımının yapılması, tasarlanmış parçanın maruz kalacağı yükler ve mukavemet analizlerinin yapılması sonucunda gereksiz malzeme ve zaman kaybının önüne geçerek aynı mekanik özelliklerinin korunması sağlanıp istenilen standartların hem daha ekonomik bir şekilde elde edilmesine hem de ağır parçaların daha da hafifletilmesine yardımcı olacak yöntemlerin incelenmesidir.

2.1. Üretim ve Sanayinin Zaman İçinde Gelişimi

Üretimin tarihçesi insanın varoluşuna kadar uzanmaktadır. Eski çağlarda yapılan insan gücüyle üretim çok uzun yıllar sürmüştür. Ancak sanayinin devrimleri olarak kabul edilen ve 4 aşamada incelenen endüstriyel gelişmeler bu süreci etkilemiştir. İlk sanayi devrimi 1712 yılında İngiltere’de buhar makinesinin bulunmasıyla beraber bu gücün elle yapılan üretimin yerine geçerek makineleşmeye ve makineleşmenin artmasının sonucu olarak da üretimin hızlanmasına neden olmuştur. İkinci sanayi devriminin temelleri ise 1840’larda fizik ve kimya alanındaki buluşların teknolojik gelişmeleri etkilemesiyle atılmıştır. Telgraf ve telefonun bulunması dönemde önemli roller oynarken, 1882 yılında Edison’un elektriği kentte kullanmasıyla, şehir ve sanayi alanında elektrik etkin rol almıştır. Böylece fabrikalarda seri üretime geçilmiş bunun sonucunda ise üretim hızı katlanarak artmıştır. Üçüncü sanayi devrimiyle beraber elektroniklerin kullanımı yaygınlaşırken bilgi teknolojilerinin de gelişmesiyle dijital devrim olarak kabul edilmiş ve de böylece üretim süreçlerinin otomasyonu sağlanmıştır. Otomasyonların artmasıyla da yeni nesil robotlar elde edilip üretimin ucuz ve de daha verimli hale gelmiştir. 1971 yılındaki ilk mikro bilgisayar da bu gelişmeleri daha da hızlandıracak bir gelişme olarak tarihte yerini almıştır. Dördüncü ve son sanayi devrimi ise günümüze etki etmekte olup yüksek teknolojinin üretimi tamamen etki altına almasıyla mavi yakanın giderek azalmasına, robotların tamamen aktif hale gelmesine, yapay zekanın gelişmesine, üç boyutlu yazıcılarla üretimin fabrikalarla sınırlı kalmayıp her yere yayılmasına, bilginin kolayca aktarılabilmesine ve yararlı bilginin bunların içinden analiz edilip değerlendirilerek seçilmesine olanak sağlamıştır [3, 4].



Şekil 2.1. Endüstri devrimlerinin tarih içerisindeki süreci

2.2. 3B Yazıcıların Tarihsel Gelişimi ve Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat kavramı ise ilk kez 1970'li yıllarda karşımıza çıkmaktadır. Tasarımların inceleme amaçlı ürün örneklerinin imal edilmesi amaçlanılarak prototipleri oluşturulmak istenmiştir [1, 2].

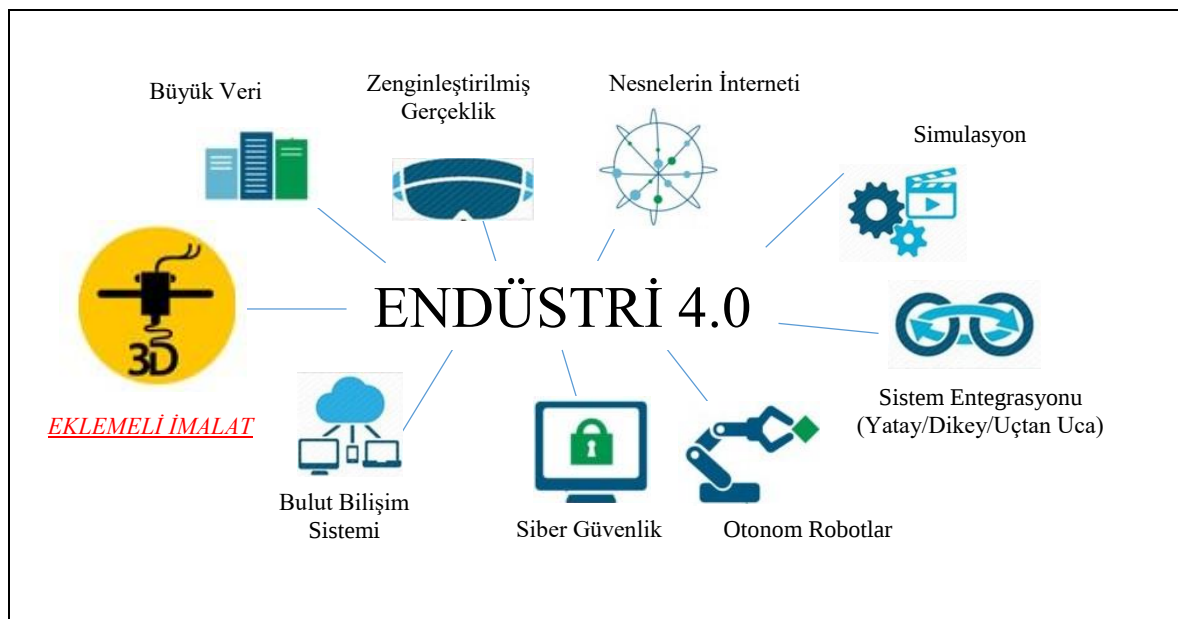
1980'li yıllarda gelişimi hızlanan eklemeli imalat teknolojisi, birçok alanda oluşturduğu yararlarla beraber endüstride bir devrim olarak adlandırılmaya başlanmıştır. Bu yıllarda numune yerine gerçek parça imalatı gündeme gelmiştir. Bunun sonucunda oluşan yararların bir kısmı aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- İhtiyaçlara göre düzenlenebilen sağlık ürünleri sayesinde insanların refah seviyelerinin daha da artacağı fikri gelişmiştir.
- Çevre sürekliliğine, hem ham madde kullanımını azaltması hem de parça üzerinden işlenerek gereksiz ham madde kaldırılması işlemini ortadan kaldırırken ayrıca üretim adımlarının kısılması ve üretimin daha az sürelerle ihtiyaç duymasıyla da enerji tüketimini düşürerek katkı sağlanmıştır.

- Daha az ham madde kullanılarak sonuçlanan üretim sayesinde tüketicilerin daha hızlı ve eski üretime oranla daha az maliyetli böylece daha ucuz ürünlerin ulaşmasını sağlayarak, tedarikte rol oynayan etmenlerin yeniden şekillenmesine neden olmuştur [5].

1990'lı yıllara gelindiğinde metal ve seramik gibi malzemelerin kullanımıyla işlevsel parçaların elde edilmesi sonucunda eklemeli imalat ortaya çıkmıştır [1, 2]. Bu kavram üretilecek parçanın üç boyutlu ölçüleri doğrultusunda belirlenecek yöntemle malzemenin katman katman eklenerek karmaşık parçaların hızlı imalatını gerçekleştirme olarak tanımlanmaktadır ve parça imalatında sağladığı kolaylık açısından devrim niteliğinde görülmektedir. Böylece dördüncü sanayi devriminin temelleri de eklemeli imalatın yaygınlaşmasıyla atılmış olarak sayılmaktadır [6].

Günümüzde üç boyutlu yazıcılar ile üretilen yapay uzuvlar, bebeklerde soluk borusu implantı, CAT bilgilerinden yararlanılarak üretilenler organlar, uzayda yiyecek, silah ve araba gibi alanları da kapsamaktadır. Bu gelişmeler sonucunda da son dönemlerde 3 boyutlu yazıcılar hakkında araştıran insanların sayısında büyük bir artış olmuştur. Geleneksel yöntemle üretim gösteren yerler adına üç boyutlu yazıcılar ciddi bir tehdit oluşturduğundan bu yöntemi yıkıcı teknoloji olarak adlandırılmışlardır. Araştırmaların nedeni ise insanların üretimine ihtiyaç duydukları parçaları özel olarak yaptırıp yüksek fiyatlara almak yerine daha az maliyetle evlerinde ve iş yerlerinde imal edebilecek olmaları söylenebilmektedir [7].



Şekil 2.2. Endüstri 4.0 yapı şeması

3 boyutlu yazıcı ya da hızlı prototipleme olarak da bilinen eklemeli imalat, 3 boyutlu CAD dosyaları kullanılarak her yüzeyde geometrik bilgiler doğrultusunda bir katmanı biriktirerek üretimi düzenlemektedir. Biriktirme son katman konulana dek katman katman devam ederek 3 boyutlu parça üretimi tamamlanmaktadır. Geleneksel yöntemlerde yer alan presleme ve makinada işlem görme adımlarında sabitleme, kesici bir araç kullanımı ve son ürün elde edilmesi için son ürüne göre daha büyük olan parçadan çıkarılan malzemenin kaybı gibi adımlar yerine yerine bu malzemenin adım adım eklenmesi ile son üründen parça kaldırılmasına gerek kalmayan verim açısından daha etkili bir yöntem elde edilmiştir. Katmanlarda CAD geometrik verileriyle son ürün daha karmaşık geometrilerde tekrar işlem görmeden tek seferde elde edilebilmektedir [5].

Çevre dostu ürün tasarım yöntemi olarak da görülen eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerinin tersine, esnekliği sayesinde üreticilerin isteyeceği doğrultuda yalın bir üretim ortaya çıkarırken böylece ham madde israfının da ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Bu yalın üretime ek olarak karmaşık geometriye sahip parçaların geleneksel imalat yöntemlerinde çoklu işlem adımlarıyla üretilmesinin yerine, eklemeli imalat ile tasarlanan ürünün bütün parçaları bir bütün olarak çıkarılabilmektedir. Ayrıca bu parçalar üretilirken *topoloji optimizasyonu* uygulanarak parça fonksiyonu artırılıp, üretim için gerekli olan enerji miktarı azaltılmaktadır, böylece hem daha az enerji hem de daha az doğal kaynak kullanımıyla parça imal edilebilmektedir [5].

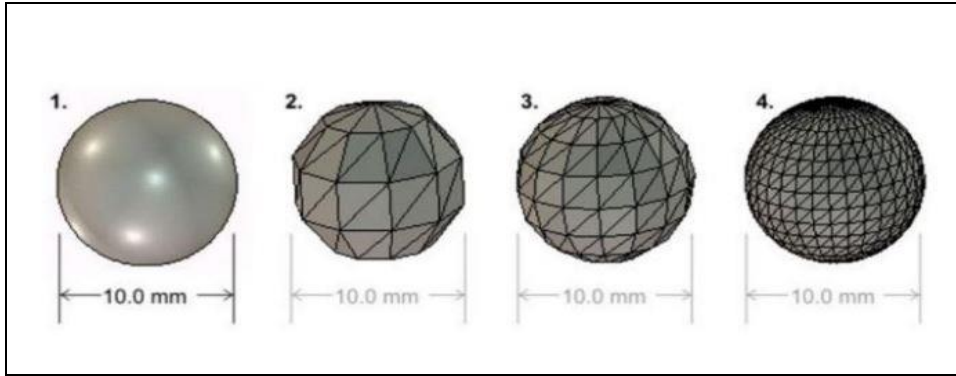
Üç temel adımda eklemeli imalatı incelenecek olursa:

1. CAD/CAM ortamında modellenen parça, model olarak kapalı yüzeylerle temsil edilirken hacmi de olması gerekmektedir. Model geometrik verilerinde iç, dış ve sınır çizgilerini ortaya koyacak bilgileri içermelidir. Katı modellemelerde ise bu özelliğe gerek duyulmaz, kullanılan modelleme programı da katı modelle karşılaştığında yazılım gereği kapalı hacimle modeli uygun hale getirmektedir. Kapalı hacim istenmesinin nedeni ise hızlı prototipleme ile katı bir parçanın imalini sağlayabilmektir.

2. CAD/CAM ile modelin oluşturulmasından sonra, bu dosya STL (Stereolithography) formatında kaydedilmektedir. STL 3B tasarlanmış modelin yüzeylerinin matematiksel bir dizi içerisinde çok sayıda üçgene bölünmesiyle yaratılan bu üçgenlerin kendi normali ve üç adet noktasıyla 3B modeli temsil ettiği bir format olarak çalışmaktadır. Kıvrım arttıkça

STL'deki üçgen sayısı artar, bu da 3B modelin daha detaylı işlenmesini sağlamaktadır. Ancak bazı hızlı prototipleme yöntemleri IGS/IGES formatını da kabul etmektedir.

3. STL formatındaki dosya kullanılacak olan bir bilgisayar programı yardımıyla analiz edilip, bu analiz sonucunda üretime uygun halde kesitler oluşturulmaktadır. Kesitlere, sistemli bir şekilde sıvı veya toz halinde malzeme eklenerek fiziksel olarak üç boyutlu model ortaya çıkarılmaktadır [8].



Şekil 2.3. STL dosyasındaki üçgenlerin kullanımı [9]

Eklemeli imalat literatürde Serbest Şekli Fabrikasyon (Solid Freeform Fabrication, SFF) ve Katmanlı Üretim (Layered Manufacturing, LM) teknolojileri olarak da adlandırılmaktadır [10, 11].

Çalışma prensibine göre çeşitli eklemeli imalat yöntemleri vardır. Yine de parça üretiminde bu yöntemler termal, kimyasal ve mekanik yönlerden benzerlikler taşımaktadır. En yaygın yöntemler:

- Stereolitografi (Stereolithography Apparatus – SLA)
- Eriyik Yığılma ile Modelleme (Fused Deposition Modelling – FDM)
- Seçici Lazer Sinterleme / Seçici Lazer Eritme / Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS / Selective Laser Melting – SLM / Direct Metal Laser Sintering - DMLS)
- Sıvı Polimerizasyonu (Liquid Polymerization – LP)
- Balistik Parçacık Modelleme (Ballistic Particle Modelling – BPM)
- Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition – DED / Direct Metal Deposition – DMD - Laser Engineered Net Shaping - LENS)

- Toz Ergitme (Powder Bed Fusion - PBF)
- Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jet Printing - BJP)
- Malzeme Püskürtme (Material Jet Printing – MJP)
- Tabakalı Yapıştırma Parça İmalatı (Laminated Object Manufacturing – LOM)

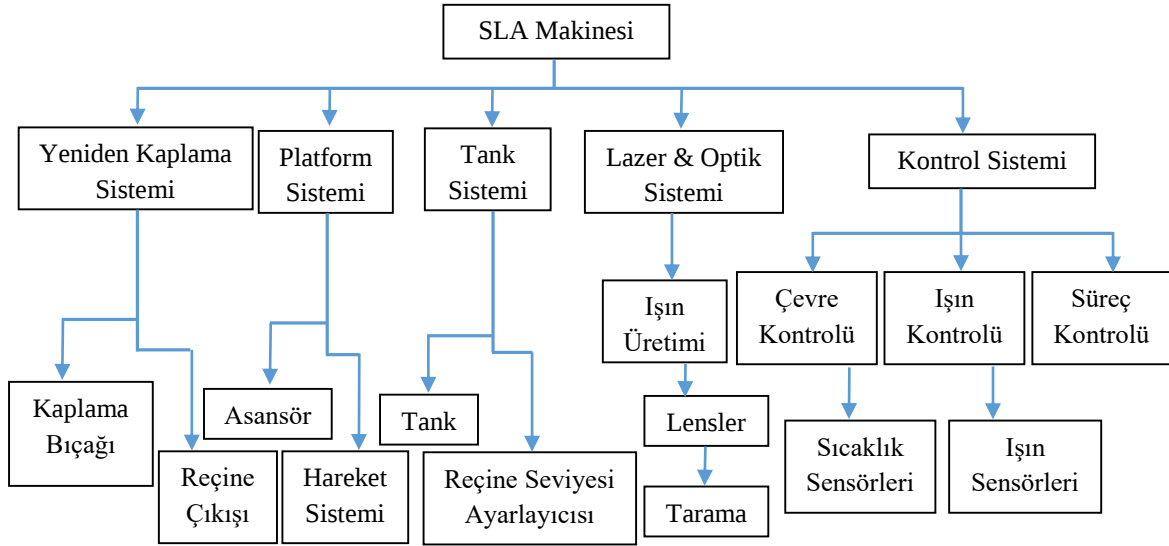
Özellikle ilk üç yöntem topoloji optimizasyonu yapılacak parçaların üretimlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır.

2.2.1. Stereolitografi

1983 yılında Charles W. Hull, araştırmaları sonucunda bilgisayar destekli tasarım dosyalarından faydalanarak doğrudan üç boyutlu katı parçalar elde ettiği ve ‘Stereolithography’ (SLA - Stereolithography Apparatus) adını verdiği yeni yöntemi bulmuştur. Stereolitografide işlem, tankta bulunan sıvı fotopolimerik reçinenin üretilen parçanın geometrik verilerine göre ultraviyole bir lazer kaynağıyla katman katman kürleyerek katılaştırma işlemine denilmektedir. Tankın içine fotopolimer sıvı reçinenin doldurulması ve hareket sistemi olan platformun da tanktaki sıvı reçine yüzeyinin hemen altında bulunmasıyla başlamaktadır. Ultraviyole lazer bilgisayar kontrollü tarama sistemiyle reçinenin yüzeyinde oluşturulmak istenen parçanın geometrik konumlarını katman halinde katılaştırmaktadır. Her katmanda bu işlemin tamamlanmasıyla platform oluşturulan katman kadar aşağıya inerek bir sonraki adıma hazır hale gelmektedir. Platformun aşağı inmesiyle oluşan boş hacimde bıçak yeni bir kat sıvı fotopolimerin kaplanmasını sağlamaktadır. Bu işlem bir önceki katmanın üzerine oluşturulmaktadır ve katmanlardaki malzemenin yapışması sonucunda parça bütünlüğü elde edilmektedir. Parçanın şekline bağlı olarak boşta kalan kısımlar için ise destek yüzeyler inşa edilip, işlemin sonunda bu destekler parçadan uzaklaştırılmaktadırlar [12, 13].

SLA, ile yüksek doğrulukta düzgün yüzeylere sahip ayrıntılı polimer parçaların üretimi yapılabilmektedir. Polipropilen, akrilik ve epoksi kullanabilinen reçine esaslı malzemeler bulunmaktadır. Üretimin sonlanmasıyla parçalardan destekler uzaklaştırılıp fırınlanma işlemi görmektedir. Stereolitografi ile farklı tipte ham maddelerden üretim yapılabilmektedir [14]. SLA’da fotopolimerler çapraz bağlıdır, bunlar erimezken ve sünme az oluşmaktadır. Akrilik esaslı SLA reçinelerinde büzülme, eğilme, kıvrılma hasarları meydana gelebilirken hızlı kürlenmektedirler. Esnek yapılara sahiptirler. Epoksi SLA reçineleri ise daha sert ve

dayanıklı parçaların oluşturulmasında kullanılmaktadırlar. Ayrıca daha az büzülme ve yüksek parça doğruluğu sağlarlarken, iyi yapıştıkları için daha az bükülme hasarıyla karşı karşıya kalmaktadırlar. Kürleme hızları ise daha düşük olmaktadır. Günümüzde SLA reçinelerinin çoğu Epoxy/Akrilik karışımı hibrid reçineler olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. SLA makineleri çalışma sistemleri

2.2.2. Eriyik yığma ile modelleme

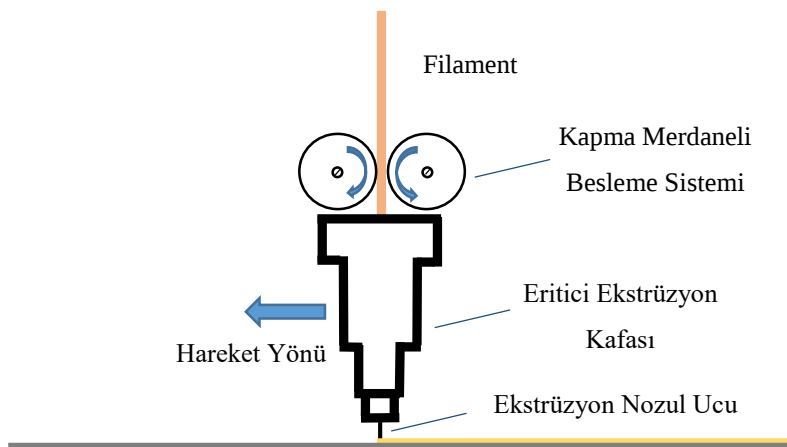
İlk olarak Stratasys firmasının kurucusu Scott Crump'ın 1980 yılında icat ettiği ve üretim teknolojisi olarak katmanlı imalatı baz aldığı FDM (Fused Deposition Modelling) teknolojisi, üretimde sağladığı kolaylık ve zamanda sağladığı ciddi tasarrufla, 3B yazıcıların %70'ine yakınında kullanıldığı düşünülen baskı tekniklerinden biri sayılmaktadır. Ayrıca masaüstü yazıcıların genelinde de bu yöntem tercih edilmektedir. İlk kullanıldığı alanlardan biri olan havacılık sektöründen zamanla savunma sanayisinde de tercih edilmeye başlamış olup, günümüzde tüm sanayi kollarında yaygınlaşmaktadır [15].

Eklemeli imalat yöntemlerinin en yaygınlarından olan eriyik yığma ile modelleme (FDM) yönteminde parça imalatında kullanılan polimerler lazer yardımıyla kürlenmemektedir. Sistem bilgisayar kontrolündeki nozul kafasından çıkan yarı katı malzemelerin yüzey üzerinde katman olarak biriktirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu işlem genellikle sert polimerlerin yarı katı forma getirilerek eriyik olarak yığma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

FDM teknolojisi ile çalışan yazıcılarda termoplastikler kullanılmaktadır. Yığılacak olan malzeme nozulun kafasından eriyik filament halinde nozulun çapı ve geometrisini alarak çıkmaktadır. Üretim katman katman çizgisel yollar şeklinde sürekli biriktirilerek devam etmektedir [17].

Katı haldeki filamentin biriktirilebilmesi FDM yönteminde polimerik malzemelerin sıcaklığı kontrol eden püskürtücü bir başlık aracılığı ile erime noktasına yakın bir sıcaklığa çıkarılmasıyla gerçekleşmektedir. Ayrıca kompozit bir parça elde etmek için sisteme nozul eklenerek ikinci bir malzeme birikimi bu nozuldan sağlanarak, üretilecek parçanın malzeme özellikleri ayarlanabilmektedir. Model bittikten sonra destekler sökülmemektedir [18].

FDM tekonolojisinin kullanılmasının bir başka faydası da üretim sonrası elde edilen parça için başka sonlama adımı gerekmemektedir. Ayrıca üretilecek parçaların özelliklerini iyileştirmek için ham madde özelliklerinde bazı değişiklikler yapılabilmektedir. Bu teknoloji ile üretilen parçaların üzerine boyama, parlatma ve kaplama gibi çeşitli işlemler kolayca uygulanabilmektedir. Bazı küçük ve basit parçaların üretiminde ise diğer eklemeli imalat işlemlerinde olduğu gibi destek yapılar ihtiyaç duyulmamaktadır ancak karmaşık parçalarda yine destek yapılar kullanılmaktadır. FDM bizlere üretim kolaylığı ve birçok işlem adımlarında faydalar sunmasına rağmen yüksek yüzey kalitesi ve de yüksek geometrik doğruluk isteyen parça imalatlarında ise beklentiyi karşılayamamaktadır. [19]

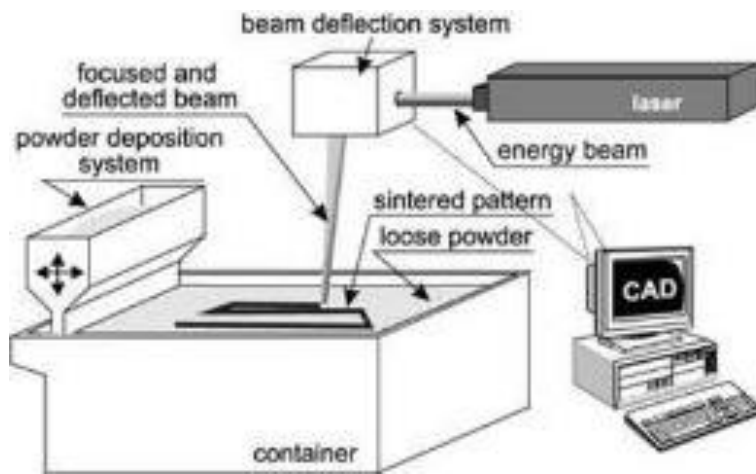


Şekil 2.5. FDM malzeme biriktirme prosesi

2.2.3. SLS / SLM / DMLS

Eklemeli imalat yöntemlerinden olan SLS (Selective Laser Sintering), Carl Deckard ve Joseph Beaman tarafından 1980'lerde Texas Üniversitesi'nde geliştirilmiş olup bu teknolojinin kullanımı günümüze kadar yaygınlaşarak artış göstermiştir [20].

SLS teknolojisinde karbondioksit lazer ışını sayesinde modeller zemin üzerindeki toz üzerinden seçilerek üretilmektedir. İlk olarak üretilcek parçanın iki boyutlu verisi, lazerin işleyecek yolunu yönlendiren SLS makinesine yüklenmektedir [21]. Karbondioksit içeren lazer ışını toz yüzeyindeki tanımlanmış yolu izlemektedir ve tozu taranan yola yapıştırmak için sinterleme sıcaklığına kadar ısıtmaktadır. İşlem ilk tabakaya uygulandıktan sonra tozun bulunduğu yüzey işlenecek katman kadar aşağıya hareket ettirilerek yeni bir toz tabakası üretim tablasına hareketli silindir veya silecek benzeri bir mekanizmanın hareketiyle serilip yüzeyde biriktirilmektedir ve de üretilcek parça tamamlanana kadar işlem devam etmektedir. Katmanlarda işlenmemiş halde bulunan toz ise destek yapı görevi görmektedir. Üretimi tamamlanan model üretim tablası içinde sinterlenmemiş tozların arasında bulunmaktadır. Sıcaklıkla sinterlenen parçada oluşacak büzülme ve çarpılma ise üretim esnasında karşılaşılabilecek zorluklar arasında görülmektedir. Modelde meydana gelebilecek genişlemeleri engellemek amacıyla tabla kontrollü bir şekilde soğumaya bırakılmaktadır. Ayrıca SLS ile üretimi tamamlanmış parçalar ezilerek toz haline getirilip tekrar kullanılabilir [22, 23].



Şekil 2.6. SLS sürecinin şematik gösterimi [24]

SLS teknolojisinin avantajları diğer eklemeli imalat yöntemlerine benzemektedir. Kompleks parçaların tek seferde üretilmesine imkan sunan yöntem ayrıca diğer yöntemlerden farklı olarak model etrafında biriken tozlar sayesinde destek yapı gerektirmemektedir. Son kullanıcı ürünleri elde edilmesini sağlamaktadır [23].

SLS'ye çok benzeyen bir yöntem olan DMLS (Direct Metal Laser Sintering) de eklemeli imalat yöntemlerindendir. Her ikisi yöntemde de tam erime yerine sinterleme ile parça imalatı hedeflenmektedir. Aralarındaki tek fark ise, SLS'nin plastik, naylon ve seramik gibi malzemelerin üretim yöntemi olarak kullanılırken, SLM/DMLS (Selective Laser Melting / Direct Metal Laser Sintering) ise sadece metal malzeme kullanılmaktadır [25].

SLM/DMLS yöntemi de kompleks parçaların üretiminde yüksek kalite, düşük maliyet ve tekrarlanabilirlik ve bunun gibi büyük avantajlar sağlamaktadır [26]. Lazer eritme işlemiyle metallere herhangi bir bağlayıcı veya ilave işleme ihtiyaç duymadan direkt olarak işlevsel parçalar üretmeyi mümkün kılmaktadır [27].

SLM/DMLS imalatı sonucunda kusurlar üç türde yaygın olarak ortaya çıkmaktadır. Küresel gözeneklilik, tamamlanmamış düzensiz füzyon delikleri ve de çatlaklar sayılabilmektedir. Küresel gözeneklilikler rastgele dağılmaktayken, füzyon delikleri ise genellikle lazerin geçtiği yollarda ve katmanlar arasında bulunmaktadır. [28]

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Çeşitli mühendislik alanlarında kullanılan sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method), karmaşık sınır ve başlangıç değer problemlerini çözmek için sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde giderek gelişmekte olan teknolojinin de etkisiyle birlikte bilgisayarların problem çözümü üzerindeki etkinlikleri artmaktadır. Bunun sonucunda mühendislik problemleri için bilgisayar destekli yöntemler geliştirilmeye devam etmektedir [29].

Bu yöntem ilk olarak 1956'da uçaklardaki yapısal problem analizi için kullanılmıştır. Daha sonraki on yıl içinde, çeşitli mühendislik ve uygulamalı bilim problemlerinin çözümü için de yöntemin sahip olduğu potansiyelleri kabul edilmiş ve uygulanmıştır.

Sonlu elemanlar tekniği o kadar iyi bir şekilde kurulmuştur ki, bugün çok çeşitli pratik problemlerin etkinliğini analiz etmek için kullanılan en iyi yöntemlerden biri gibi görünmektedir. Ayrıca yöntem uygulamalı matematikçiler için araştırma alanlarından biri haline gelmiştir [30].

Sonlu elemanlar yöntemindeki temel fikir, karmaşık bir problemin çözümünü daha basit bir yöntemle değiştirerek bulmaktır [31].

Son zamanlarda, sonlu elemanlar yöntemi, üçgen bölgeler üzerinde tanımlanmış parçalı sürekli fonksiyonların kullanılmasını içermektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ilk kez 1943 yılında uygulamalı matematik literatüründe Courant tarafından önerilmiştir [32]. Ancak Courant'ın çalışması, mühendisler geliştirene kadar göz ardı edilmiştir. 1906'nın başlarında, araştırmacılar stres analizi için kafes analojisini kullanmışlardır. Ancak normal desende bu benzetim yerine elastik çubuklar kullanılmıştır. Çubuğun özellikleri, süreklilikteki noktaların yaklaşık yer değiştirmelerine neden olacak şekilde seçilmiştir. Metot, iyi bilinen yapısal analiz metotlarına göre daha çok rağbet görmüştür [33].

Başlarda bu çalışmaların hiçbiri pratik bir değere sahip değildi, çünkü büyük eşzamanlı cebirsel denklemler setini üretmek ve çözmek için bilgisayarlar henüz icat edilmemişti. Sonlu elemanların gelişimi, aslında dijital bilgisayarlardaki ve programlama dillerindeki büyük ilerlemeler ile eş zamanlı sayılmaktadır [34].

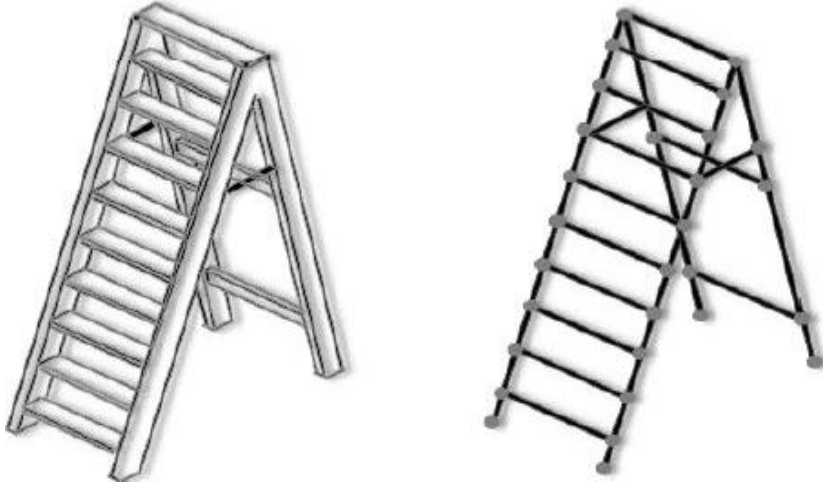
Süreklilik mekaniği problemlerini ayrıştırmak için başka yöntemler arayışı, genellikle matematikçiler ve mühendisler tarafından çeşitli yaklaşımlarla ele alınmıştır. Matematikçiler, geçerli diferansiyel denklem kümesini çözmek için doğrudan uygulanabilir genel yöntemler geliştirmişlerdir. Sonlu farklar yöntemi (FDM), artık prosedürler, doğrudan yaklaşımın örnekleri ve bazı fonksiyoneller için aşırı değeri belirleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Öte yanda mühendisler birkaç analogi türü kullanarak sorunu fiziksel bir bakış açısıyla çözmeye girişiminde bulunmuşlardır. McHenry (1943) [35] ve Newmark (1949) [36], bu dolaylı yöntemin örneklerinden sayılmaktadır. 1940'lı yılların başlarında, vücudun bir parçasını bir destek düzenleme ile kaldırarak sürekliliği analiz etmenin iyi ve kabul edilebilir bir doğrulukla mümkün olabildiğini göstermişlerdir. 1954 ve 1956 arasında, Argyris (1950 ve 1954) [37] ve de Turner ve arkadaşları (1956) [38] daha doğrudan bir özellik değişiminin elde edilebileceğini çalışmalarında göstermişlerdir. Bu araştırmalar

elementlerin davranışlarının temel varsayımlarına dayandırılmıştır. “Sonlu elemanlar” terimi, ilk kez Clough (1960) [39] tarafından yapılan sunumda, yöntemin özel bir basit stres durumu için sunulduğu sunumda kullanılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar analizi 1960’ların başında havacılık ve uzay endüstrisindeki yapısal problemleri çözmek için de tercih edilmiş, daha sonralarında ise ısı transferi, sıvı akışı, kütle taşınımı ve elektromanyetik içeren problemlerin de çözümlerinde de kullanılmıştır [40]. Bu öncülerin çalışmalarından sonra matematikçiler ve mühendisler aynı temel problem üzerinde çalışmış ancak farklı yaklaşımlarla konuyu ele almışlardır. Bu anlayış, “analog” temelli yaklaşım ile sonlu elemanlar yönteminin daha da geliştirilmesi için bir temel olan matematiksel yaklaşım arasında yakınlaşmaya neden olmuştur. Uzun yıllardır, sonlu elemanlar yönteminin çok çeşitli sınır değer problemlerini simüle ve analiz etmek için sayısal ve matematiksel olarak iyi tanımlanmış bir ayırıklaştırma yöntemi olduğu düşünülmüştür. [34]

Sonlu elemanlar analizi yapılan parça veya modelin etkisini analiz etmek için kullanılan bir bilgisayar simülasyon tekniği olarak tanımlanmaktadır. Tasarım sürecinde oluşturulan geçerli sonlu eleman modelinin güvenilir bir model olduğunu ve orijinal yapı imalat alanında seri üretimi deneyimlemeden önce yapısal davranış ve performansın doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağladığından hayati bir önem taşımaktadır [41].

FEM ile modellenen parçada, düğüm noktaları ve bu düğümlerin oluşturduğu farklı tiplerdeki elemanlar vasıtasıyla incelenecek olan bölge küçük ve eşit kısımlara bölünmüştür. Ayrıca bu işlemten sonra sınır koşulları ve yükleme durumları da ele alındığında, modelde düğüm noktalarında yer değiştirme ve direngenlik matris denklemleri oluşturulur. Bu denklemlerin çözülmesiyle, elemanların üzerinde gerilim, gerinim gibi dağılımlar (contour) elde edilmektedir [42].

FEM’de matematiksel modelin oluşturulmasında ilk rolü geometri oynamaktadır. Analizlerle elde edilecek olan sonuçların doğru olabilmesi için CAD ile oluşturulan geometrinin fiziksel parçadaki gibi modellenmesi gerekmektedir. Sonlu elemanlar analizine ve sonuçlarına göre oluşturulacak model kısa süre içerisinde doğru sonuca ulaştırmalıdır. Bunun için de model geometrisinde uygulanacak sadeleştirmeler ve metoddaki eleman seçimi de uygun bir şekilde yapılmalıdır. Şekil 2.7’de geometri ve sonlu elemanlar yöntemi ile kurulmuş matematik model arasındaki farka ait bir örnek verilmiştir [29].



Şekil 2.7. Modelin geometrisi ve matematik modellemesi arasındaki fark [43]

Sonlu Elemanlar Metodu kullanmanın diğer sayısal metotlara göre avantajlarından bazıları aşağıda belirtilmiştir:

- Analiz edilen gövde isteğe bağlı şekil, yük ve destek koşullarına sahip olabilmektedir.
- Çok yönlü bir yöntemdir.
- Matris örgüsü farklı tipteki elemanları karıştırabilmektedir.
- Çok yönlülüğü tek bir programda bulunabilir.
- Gerçek yapı ve sonlu elemanlar modeli birbirlerine çok benzemektedir. [34]

Tasarımcının ihtiyacına göre analizlerde kullanılacak modelin geometrisine uygun eleman tipi seçimi yapılması gerekmektedir. Seçimin doğru olabilmesi için 4 farklı eleman tipleri bulunmaktadır:

- Sıfır Boyutlu Elementler (0B)
- Bir Boyutlu Elementler (1B)
- İki Boyutlu Elementler (2B)
- Üç Boyutlu Elementler (3B) [44]

Son olarak, sonlu elemanlar yöntemi çok yönlü bir yöntemdir ve birçok mühendislik probleminde uygulama bulmuştur. Bugün, sonlu elemanlar metodunu kullanan 100.000'den fazla mühendis bulunmaktadır [45].

2.4. Optimizasyon

Optimizasyon kavramı en yalın bir şekilde anlatılacak olursa, kaynakların olabilecek en optimum biçimde kullanılması olarak tanımlanabilmektedir. [46]. Matematiksel olarak ise optimizasyon, bir fonksiyonun kullanıcı tanımlı belirli kriterler göz önüne alınarak minimize veya maksimize edilmesi olarak bilinmektedir. [47]. Başka şekilde ifade edilecek olursa optimizasyon en iyi amaç ölçütünün en iyi değerini veren sınırlardaki parametrelerin değerini bulmak olarak ifade edilebilmektedir [48]. Ayrıca optimizasyondan belirlenen bazı hedefleri gerçekleştirmek için en iyi kararları verme sanatı veya belirli koşullar altında herhangi bir şeyi en iyi yapma olarak da bahsedilmiştir [49]. En kısa haliyle optimizasyon hakkında en iyi sonuçları içeren işlemler topluluğu da denilebilmektedir. [50].

Uygulanan optimizasyonun hedefi, tanımlamalarından da anlaşıldığı gibi, en iyi sonuca, en iyi hedefe ulaşmaktır. Bunun için de var olan durum ya da durumlarla ilgili iyileştirmeler gerçekleştirmektir. Mühendislik bu aşamada devreye girerek optimizasyonun istenilen koşullarda gerçekleşmesi için önemli rol oynamaktadır [51].

Optimizasyon, bilgisayar ortamında incelenen simülasyonların verilerine dayanmaktadır. Optimizasyonda ele alınacak olan problem hem sürekli değişkenlerin mevcudiyetiyle hem de bileşenlerin seçimiyle tanımlanmaktadır. Optimizasyonu iki taraflıya inceleyecek olursak bir tarafta tasarım taslakları değerlendirilirken, diğer tarafta ise yeni ve umut vadeden tasarımlar meydana getirilmektedir. Bu da optimizasyonun analiz ve sentezi beraber içerdiğini göstermektedir. Tercih edilecek optimizasyon stratejisine bağlı olarak farklı veya yeni çözümler de elde edilebilmektedir [52].

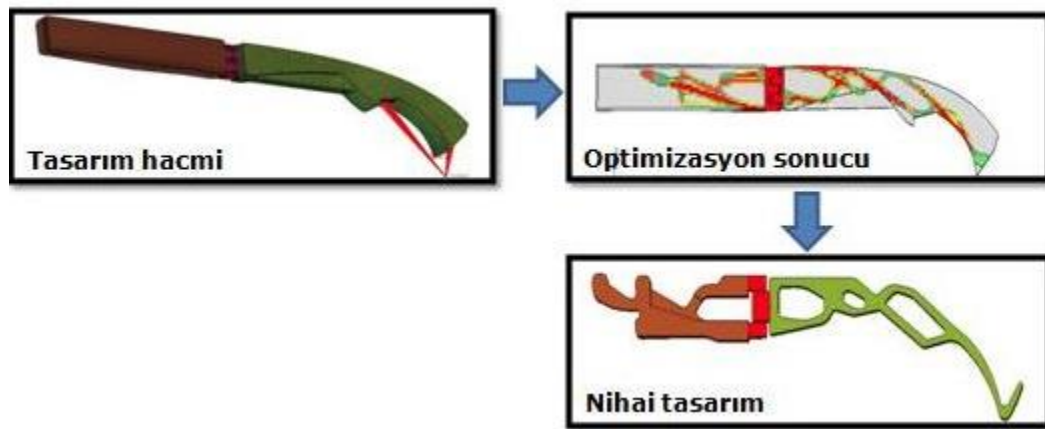
Ayrıca optimizasyonla, karar verme prosesleri hızlanmakta olup gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin etkin ve doğru çözümü için alınacak kararların kalitesini de arttırmaktadır. Bunların yanında sağladığı ekonomik faydalarla da tercih edilen optimizasyon, müşteri, işveren ve çalışanların seçim ve sınırlarının karar sürecinde yer almasında ve kullanılan kaynakların kalitesinin yükseltilmesinde de aktif bir şekilde tercih edilen bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Mühendislik tarafından bakıldığında ise optimizasyonda ihtiyaç duyulan ve var olan konuların, işlerin optimize edilmesi için çeşitli parametrelerin ele alınmasında, ihtiyaç

duyulan bilgi gereksiniminde ve analitik düşünme kabiliyetinde mühendislik bilim dalları önemli bir rol üstlenmiştir. Bu rolü üstlenmede mühendislerin iş alanları her ne olursa olsun ilgili oldukları konuları hep daha iyiye, en iyiye ulaştırmayı amaçlamaktadırlar. Problemlerde farklı optimizasyon teknikleri denemektedirler ve optimumu elde edene dek araştırıp geliştirmeye devam etmektedirler.

Optimizasyonun aşamaları ise tasarım sürecinde başlamaktadır. İlk olarak sorun gözlemlenip ihtiyaçlar çıkarılmaktadır. İhtiyaçlar çıkarıldıktan sonra bu doğrultuda sistem tasarımı yapılarak denemelerle iyileştirme amaçlanmaktadır. Bu iyileştirmeler ise tüm aşamalarda optimizasyon ile sağlanmaktadır. Sistemin varlığıyla beraber eş zamanlı olarak optimizasyon da her zaman o sistem için tekrar tekrar uygulanabilmektedir. Beş maddede optimizasyon aşamaları incelenecek olursa:

- Sistem temelini ortaya çıkarılması
- Tasarımdaki kullanıcı tarafından belirlenecek olan değişkenlerinin tanımlanması
- Hedeflenen fonksiyonun tanımlanması
- Sınırların belirlenmesi
- Sisteme uygulanabilecek optimizasyon metodunun tercihi ve sisteme uygulanması [51]



Şekil 2.8. Optimizasyonda tasarımın hedeflere göre nihai halini alması [53]

Değişkenlerin, kısıtların ve amaç fonksiyonlarının belirlenmesi optimizasyonda modelleme olarak tanımlanmaktadır. Optimizasyon problemlerinin çözümü için hepsine uygulanabilecek ortak bir optimizasyon algoritması henüz yer almamaktadır. Karşılaşılan probleme bağlı olarak tercih edilebilecek birçok optimizasyon algoritmaları bulunmaktadır.

Seçimi kullanıcı tarafından yapılan algoritma problemin çözülmesi konusunda önemli bir rol oynamaktadır [54].

Bu algoritmaların genellikle tekrarlamaları gerekmektedir. Gelişigüzel ya da belirli bir değer ile başlayan iterasyonlar program süresince denenerek elde edilebilecek en iyi sonuca ulaşmayı hedeflemektedir. İki iterasyon arası geçişler bütün optimizasyon algoritmalarında değişiklik göstermektedir. Bazı algoritmalarda bir önceki iterasyonda bulunan sonuç direkt olarak kullanırken, bazılarında ise her iterasyonla bir diğerinden bağımsız çözümler ortaya çıkmaktadır. Etkin bir optimizasyon algoritmasının sahip olması gereken özellikler aşağıda verilmiştir:

- Uygulama alanları geniş olmalı
- Kısa sürede hesaplama yapabilmeli,
- Oluşabilecek veri hatalarından veya yuvarlamalardan etkilenmeden ayrıntılı sonuçlar bulabilmelidirler [50].

En son kısım olan optimizasyon değerlendirme ise tasarım taslağının ne kadar iyi olduğunu belirleyen ve değer biçimini kapsayan hedef fonksiyon aracılığıyla yapılmaktadır. Bütün optimizasyon problemlerinde olduğu gibi hedef fonksiyonun şekillendirilmesi optimizasyonun sonuçları kısmında çarpıcı bir görev üstlenmektedir [52].

2.4.1. Yapısal optimizasyon

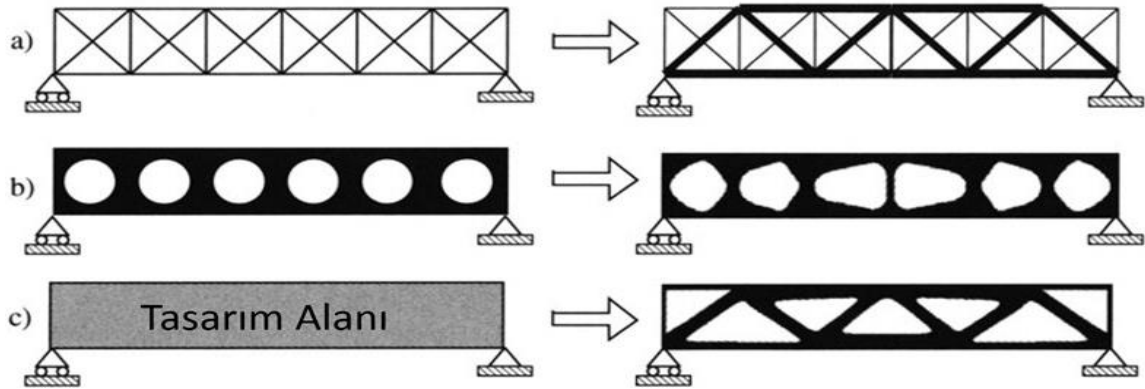
Mekanikteki bir yapı, yükleri taşıması amaçlanan herhangi bir malzeme topluluğu olarak tanımlanmaktadır [55]. Optimizasyon ise işleri olabilecek en iyi hale getirmek anlamına gelmektedir. Bu nedenle yapısal optimizasyon, yükleri en iyi şekilde taşıyan malzeme topluluğuna denilmektedir.

Yapısal optimizasyondaki amaç verilen tasarım alanına veya alanına göre en uygun malzeme dağılımını bulmaktır. Kütle ve yer değiştirmeyi en aza indirmek veya özdeğerleri en üst düzeye çıkarmak gibi yaygın işlevleri bulunmaktadır. Yapısal optimizasyon ile yeni delikler, boşluklar yapıya eklenebilmektedir [56].

Genel olarak yapısal optimizasyon problemi üç kısma ayrılmaktadır:

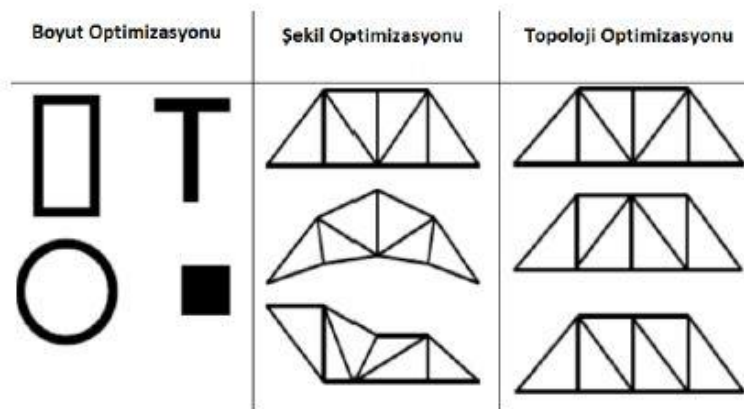
- Boyut optimizasyonu
- Şekil optimizasyonu
- Topoloji optimizasyonu

Bu optimizasyonlar, yapısal optimizasyonun asıl bileşenlerinden sayılmaktadır [57].



Şekil 2.9. Kafes modeli illüstrasyonu ve çeşitli yapısal optimizasyon türleri; a) boyut optimizasyonu b) şekil optimizasyonu c) topoloji optimizasyonu [58]

Yapılan araştırmalar sonucunda topoloji optimizasyonu ile beraber yapı performansının önemli ölçüde arttığı görülmektedir [59]. Literatürde bilinen ilk yapısal optimizasyon metodu olarak boyut optimizasyonu kabul edilmektedir. Ardından şekil optimizasyonu ve de en yeni olan topoloji optimizasyonu gelmektedir. [60].

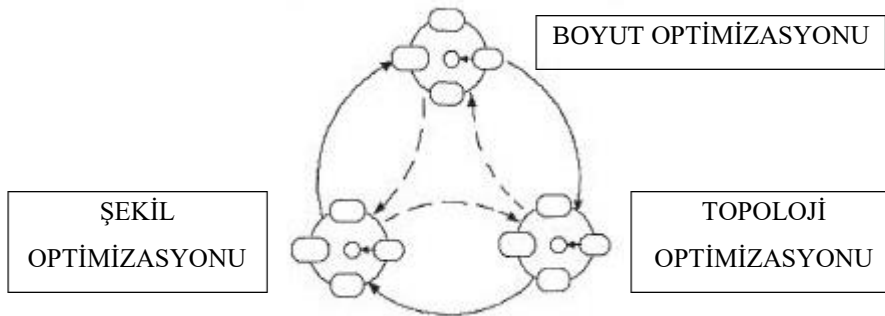


Şekil 2.10. Grafiksel olarak boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu gösterimi [61]

Yapısal optimizasyonda prosedür; önceden tanımlanmış sınır koşullar ve çeşitli kısıtlarla, verilen bir tasarım topolojisi ile başlamaktadır. Yapılacak değişikliklerle elde edilecek olan

yeni malzeme dağılımı veya sınırların şeklinin değişimini optimum tasarıma ulaştırabilmek olarak tanımlanmaktadır. Tasarım prosesi ise üç aşamada gerçekleşmektedir:

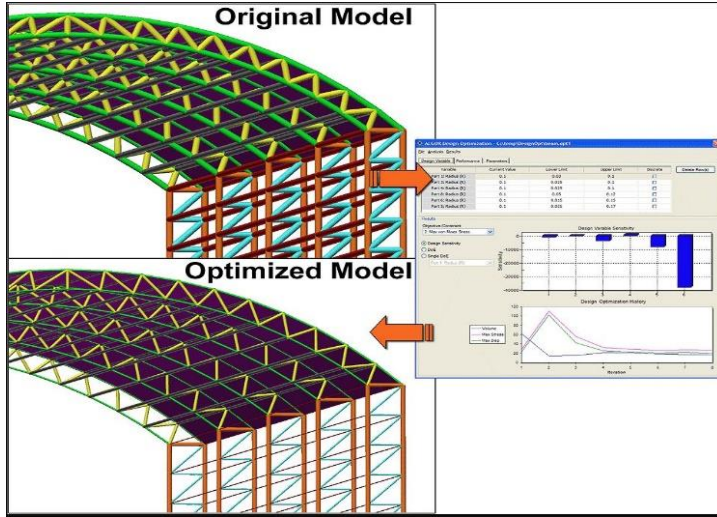
- Sahip olunan yöntemlerle optimum başlangıç topolojisi oluşturulmaktadır.
- Elde edilen topoloji bilgisayar görüntüleme teknikleriyle işlenip, tasarımlara dönüştürülmektedir.
- Bu adımlardan sonra uygulanacak şekil optimizasyonu ile yapının dış hatlarına ve deliklerine şekil verilmektedir. Gerekli olduğunda boyut optimizasyonu ile son boyutları belirlenebilmektedir. [60]



Şekil 2.11. Yapısal tasarım optimizasyon döngüsü [62]

Boyut optimizasyonu (Parametrik optimizasyon)

Yapıdaki elemanların kesitleri tasarım değişkeni olarak kullanılan optimizasyon yöntemine boyut optimizasyonu denilmektedir. Optimize edilecek yapının konfigürasyonu önceden tanımlanmış olmalıdır. Sınırlar göz önüne alınarak bir metodoloji seçilip en kesitlerin değerleri değiştirilmektedir. Yapının sınırlarında veya yapıdaki deliklerin geometrisinde değişiklik yapılmasına izin vermemektedir, böylece yapının eleman sayısı ve eleman koordinatları değişmemektedir. Boyut optimizasyonu önceden tanımlanmış olan geometriden en iyi tasarımı çıkarmaya çalışmaktadır. [60, 63]

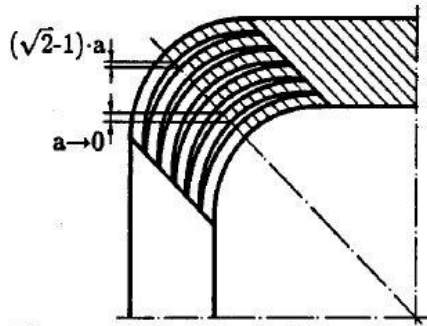


Şekil 2.12. Boyut optimizasyonu uygulanmış bir model [62]

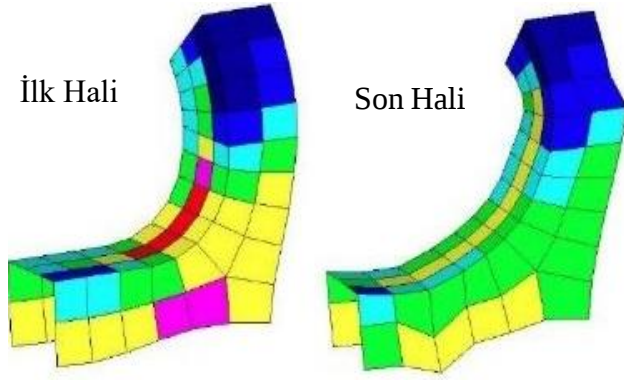
Şekil optimizasyonu

Yapının yüzey hatlarını ve bu yüzeydeki sınırları, ayrıca bulunan deliklerin geometrilerini değiştirmeye şekil optimizasyonu denilmektedir. Tasarımdaki değişkenler yapının temel taşları olan elemanlarda herhangi bir değişiklik yapmazken düğüm noktalarının koordinatlarında yapılan değişikliklerle optimizasyonu sağlamaktadır.

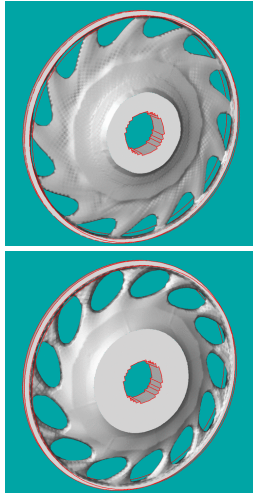
Yüzeyler üzerinde ve eğri hatlar üzerinde tanımlanabildiğinden boyut optimizasyonunun kapasitesinin genişletilmiş halidir. Bu tür optimizasyonda tasarım değişkeni olarak düğüm noktaları koordinatları ve eleman en kesitleri kullanılır. Bununla birlikte, boyut optimizasyonu gibi konfigürasyonu önceden belirlenmiş yapıları esas almaktadır [60, 63].



Şekil 2.13. Şekil optimizasyonu için en eski çözümlerden biri [64]



Şekil 2.14. Şekil optimizasyonu uygulamasıyla yapıdaki gerilmenin azaltılması [65]



Şekil 2.15. Pinyon dişlisinde şekil optimizasyonu uygulaması [66]

3. TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Bilim ve mühendislik alanı olarak optimizasyon, iyi bilinen ve yaygın olarak gelişmiş durumda olmasına rağmen hala gelişmeye devam etmektedir. Büyük hesaplamaların yapılabilmesiyle tasarımcılar yapısal optimizasyonu daha fazla kullanmaya başlamışlardır. Ortaya çıkan inovatif optimizasyon yöntemlerinin çeşitliliği ile süreç olumlu yönde etkilenmektedir. Geleneksel gradyan temelli matematiksel programlama algoritmaları çoğu durumda yerini biyolojik, kimyasal ve fiziksel olaylardan esinlenerek geliştirilmiş olan alışılmışın dışı ve deneysel metodlara bırakmaktadır. Bu metodlar yapısal optimizasyon için çok yönlülükleri ve kolay sayısal uygulamaları nedeniyle yararlı araçlar haline gelmektedir. [67].

Topoloji kelimesi geometrik cisimlerin nitel özelliklerini ve bağıl konumlarını, biçimlerinden ve büyüklüklerinden ayrı olarak ele alıp inceleyen geometri dalı olarak bilinmektedir [68]. Topoloji optimizasyonu ile ilgili ilk makale Avusturalyalı mucit Mitchell'in 1904 yılında kirişlerin en az ağırlık düzeni için optimallik ölçütlerini türetmesiyle ilgili çalışması olarak bilinmektedir [69]. Yaklaşık 70 yıl sonrasında ise G.I.N. Rozvany ve araştırma grubu Michell'in kafes teorisini bir dizi makalede genişletmiştir [70, 71]. Bu uygulamalara dayanarak, Prager ve Rozvany (1976'da Gainesville'de sunulmuştur, 1977), "optimal yerleşim teorisi" olarak adlandırılan ilk topoloji optimizasyonu teorisini oluşturmuştur [72, 73]. Optimal yerleşim teorisini öncelikle ızgara tipi yapıların tam analitik optimizasyonuna uygulamayı denemişlerdir, bunun yanında sayısal yöntemlerde de ve sürekli tip yapılar için de önemli etkileri bulunmaktadır. Bu teorisin uzantılarıyla ilgili çıkardıkları üç makalelerinde kıyaslama problemlerinin tam çözümleri tartışılmaktadır [74, 75, 76].

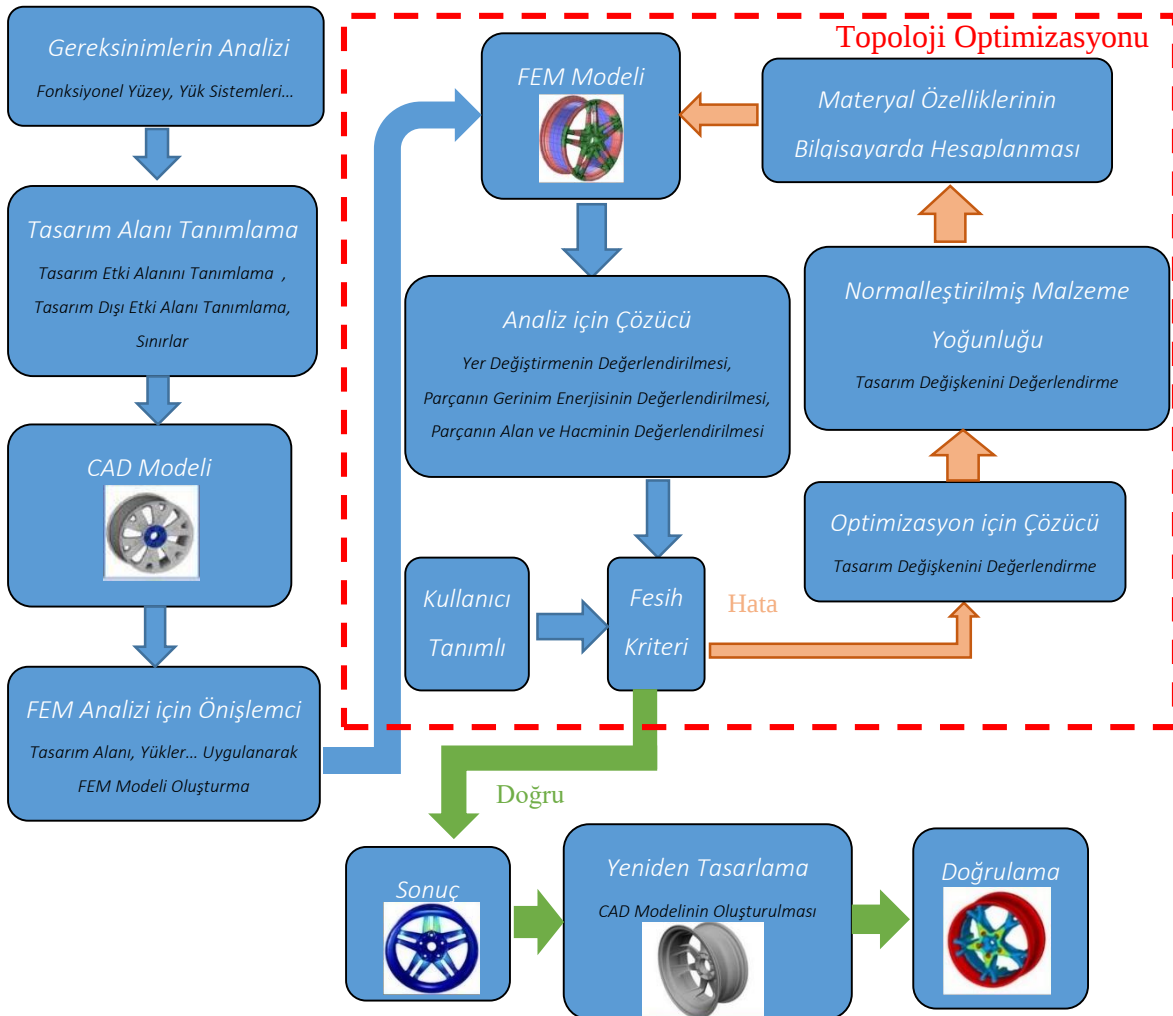
1980'lerin sonlarından bu yana topoloji optimizasyonu için sayısal yöntemler yoğun olarak araştırılmıştır [77]. Rozvany'nin bir inceleme makalesinde açıkladığı gibi, sonlu elemanlar (FE) tabanlı optimizasyonda, birkaç malzemenin izotropik, anizotropik ve / veya gözenekli olabileceği çeşitli topolojilerle karşılaşılabilmektedir [78]. Basitçe, odağımızı belirlenmiş sınırlar içerisindeki ISE topolojisine yani izotropik katı veya boş zemin elemanlarına çevirmemiz gerekmektedir. Başka bir deyişle, bir ISE topolojisinin herhangi bir "temel elemanı" ya verilen izotropik bir malzeme tarafından tamamen doldurulmaktadır ya da

madde içermemektedir. Her bir zemin elemanı bir veya birkaç sonlu elemandan oluşabilmektedir. [69]

3.1. Topoloji Optimizasyonu Yöntemi

Topoloji optimizasyonu, bir tasarım alanında en uygun malzeme dağılımını bulmayı amaçlamaktadır. Başka bir deyişle, tasarlanan hacmin kısıtlamalarına maruz kalmış en aza indirgenmiş bir uyumluluk amaç fonksiyonunu optimize etmektedir. Malzemelerin dağılımı, katı veya boş olduğu öngörülen tasarım alanı ile sınırlandırılmaktadır [79].

Topoloji optimizasyonu yaklaşımının kullanılacağı bir metodun adımları aşağıdaki gibi gösterilebilmektedir:



Şekil 3.1 Topoloji optimizasyonu yaklaşımını kullanarak önerilen yöntem [80]

Adım 1: Gereksinimlerin analizi

Ürün tasarımcısı, kullanıcıların gereksinimleri göz önünde bulundurularak, parçadaki fonksiyonel yüzeyler ve parçaya uygulanacak olan yük sistemlerini belirlemektedir.

Adım 2: Tasarım alanı tanımlama

Tasarım alanında, malzemenin dağılımı en aza indirilmeye çalışılmaktadır, ancak tasarlanan ürünün mekanik özellikleri yani sertliği de dikkate alınarak işlem yapılması gerekmektedir.

Adım 3: FEM analizi için önilemci

Tasarımcı tarafından belirlenen tasarım alanı ve tasarım dışı alanından, optimizasyon için tanımlanan tasarım alanını ayrıştırmak için bir tür eleman seçilmektedir.

Adım 4: Topoloji optimizasyonu

Tasarım alanındaki malzemenin optimal dağılımını bulmak için bir topoloji optimizasyonu algoritması kullanılmaktadır.

Adım 5: Yeniden tasarlama

Bilgisayar destekli tasarımda dışa aktarılan topoloji optimizasyon sonucu, sonlu elemanlar metodundaki ayrıklaştırma işlemi nedeniyle kullanılamamaktadır. CAD yazılımında yeni ürün modelini yeniden tasarlamak veya yeniden çizmek gerekmektedir.

Adım 6: Doğrulama

CAD'de oluşturulan yeni ürün modelinin ihtiyaçları karşılayıp karşılamadığı yeniden hesaplanmaktadır [80].

Topoloji optimizasyon yöntemi, rijitliği maksimum yapan tasarım uzayındaki katı ve boşluk bölgelerin konfigürasyonunu araştırmaktadır. Yoğunluk bazlı topoloji optimizasyonu yönteminde şekil değiştirme enerjisiyle (gerilme) orantılı olan parçanın genel uyumluluk denklemi (2.1.) aşağıda eşitsizlikte ifade edilmektedir:

$$C = u^T K u \text{ (Komplians)} \quad (2.1)$$

Eşitsizlikte C ; parçanın genel uyumu olarak tanımlanırken, u ; küresel yer değiştirme vektörünü temsil etmektedir. K ; küresel sertlik matrisi olup, u^T ; ise küresel yer değiştirme vektörünün transpozesi olarak ifade edilmektedir.

Mekanikte, komplians yani uyumluluk (compliance), sertlik ifadesinin tersi olarak kabul edilmektedir. Yapısal bütünlüğü geliştirmek adına, yapıdaki gerilmeleri en aza indirmek için, uyumluluğun en aza indirilmesi veya sertliğin en üst düzeye çıkarılması gerekmektedir. Uyumluluğu en aza indirmek, optimize edilmiş modeli genel olarak mümkün olduğunca sert hale getirmek veya bir başka deyişle toplam gerilim enerjisini minimumda tutmak olarak ifade edilebilmektedir. Minimum uyumluluk ya da maksimum sertlik için topoloji optimizasyon modelindeki doğrusal elastikiyet 2. eşitsizliklerde formüle edilmektedir [80, 81] :

$$\text{Minimize:} \quad u^T K u$$

$$\text{Kısıtlar :} \quad f = K u \text{ (Doğrusal Elastikiyet)} \quad (2.2)$$

Bu eşitsizliklerdeki K ; küresel sertlik matrisi olup f ; ise hedef fonksiyonunu temsil etmektedir [65,82].

Topoloji optimizasyonunun formülün tanımı ise 3. adımda gösterilmektedir:

$$\underbrace{\text{Minimize:}}_{\rho} \quad f^T u$$

$$\text{Kısıtlar :} \quad K(\rho)u = f$$

$$\sum \rho_i V_i \leq m_{max} \quad (2.3)$$

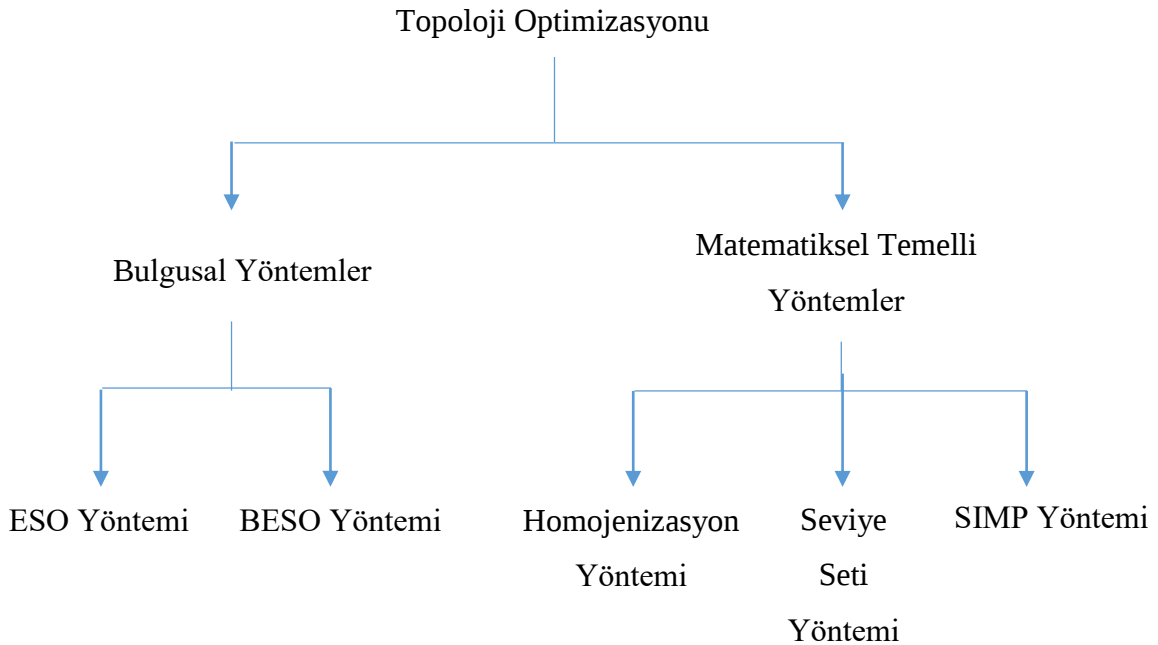
$$0 < \rho_{min} \leq \rho_i \leq 1$$

Burada p eleman yoğunluğu olup, V ise yerel elemanların toplam dağılımına sahip malzeme hacmi olarak ifade edilmektedir. ρ_i bölünen parçadaki i 'nci yerel elemanın yoğunluğunu kastederken, V_i ise i 'nci yerel elemanın kendine ait hacmi olarak tanımlanabilmektedir [65].

Son yıllarda, mekanik, inşaat ve otomotiv mühendisliği gibi birçok alanda uygulanmasıyla hızla büyüyen bir araştırma alanı haline gelen yapısal optimizasyon ve onun alt başlığı olan topoloji optimizasyonu yukarıda da bahsedildiği üzere bir tasarım alanının şeklini olabilecek en iyi topolojiye getirebilmek için gelişmeye devam etmektedir. Sürekli yapıların topoloji optimizasyonu için önerilen yaklaşımlar iki kategoriye ayrılmaktadır:

- Bulgusal Yöntemler (Heuristic Methods)
- Matematik Temelli Yöntemler (Mathematical Based Methods) [83]

Bulgusal yöntemlere daha sezgisel olan ve az matematiksel işlem içeren ESO/BESO yöntemleri [84, 85, 86] örnek verilebilmekteyken, matematik temelli yöntemlere ise Homojenizasyon Yöntemi [77], Seviye Seti Yöntemi [87, 88] ve SIMP [89, 90] örnek olarak gösterilebilmektedir.



Şekil 3.2. Sürekli yapıların topoloji optimizasyonu için iki kategoride toplanmış önerilen yaklaşımlar

3.2 Bulgusal Yöntemler

3.2.1 ESO yöntemi

Yapısal optimizasyonun temel taşları olarak boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu sayılabilmektedir [59]. Son yıllarda ise bu temel taşların dışında da bir çok yapısal optimizasyon metodu geliştirilmiştir. Optimizasyon yöntemleri olarak çoğunlukla analitik ve nümerik yöntemler tercih edilmektedir. Analitik olanlarda matematiksel teoriler ve değişken metotları kullanılır, fakat yapıların git gide daha karmaşık sistemlerden oluşması ve hesap sürelerindeki artışların maliyete olumsuz yansımaları bulunmaktadır. Nümerik metot ise programlama metodu olarak da adlandırılabilir ve ESO da nümerik matematik alanının bir dalı olarak sayılmakta olup, genel olarak iteratif işlemlerden oluşmaktadır [91].

Geleneksel metotlarda kullanılan karmaşık hesaplardan kurtulmak için 1993 yılında Y.M. Xie ve G.P. Steven tarafından Evrimsel Yapı Optimizasyonu (ESO) geliştirilmiştir [84, 92]. ESO, aslında topoloji optimizasyonunun bir uygulaması olup, topoloji optimizasyonunda da yapıldığı gibi etkisiz bir şekilde kullanılan malzemeyi tasarım alanından kademeli olarak kaldırarak, optimum yapının maksimum sertlik ve minimum ağırlığa ulaşması fikrine dayanmaktadır [93]. Yöntemin ana ilkesi dış yükler, mesnet şartları, yapının topolojisi vb. yapısal özelliğin dış şartlara uyum sağlayarak kendisini çevre koşullarına adapte etmesi olarak söylenilebilmektedir [59]. Evrimsel yapı optimizasyonu, genellikle kafes benzeri eş gerilmeli ve azami rijitlikte topolojiler elde edilmektedir [94]. Yöntem aslında iki temele dayanmaktadır. Birincisi Michell kafes sistemleri olarak bilinmektedir. Şimdiye kadar yapılan araştırmalara göre Michell kafesleri, malzeme ağırlığı ve performansı yönünden en uygun kafesler şeklinde tanımlanabilmektedir. İkinci olarak ise optimizasyon süresince yapıda mikro boşluklar oluşturarak en uygun yapıya ulaşmayı hedefleyen Bendsøe ve Kikuchi'nin [77] sunduğu "Homojenleştirme Yöntemi" söylenebilmektedir. Xie ve Steven'in [84] ortaya çıkardığı algoritmaya dayandırılarak eleman modeline dış yüklemeler ve mesnet koşulları uygulanıp, yapının sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildikten sonra bütün elemanların gerilme yani Von Mises değerleri not edilerek burada tespit edilen en düşük gerilmeye sahip elemanlar, bir döngü içerisinde küme küme yapıdan uzaklaştırılmaktadır. Bu döngü, homojenleştirme metodunda bulunan düşük gerilmeli bölgelerde boşluk oluşturma düşüncesinden yola çıkılarak ortaya konulmuştur [95].

Mühendislik yönleri dikkate alındığında, ESO'nun bazı önemli avantajları bulunmaktadır. Tasarım alanı, sonlu elemanlar metodu ile inşa edilirken ayrıca eleman modeline de harici yükler ve destek koşulları uygulanmaktadır. Sonlu elemanlar analizi ile programlanması çok basittir ve nispeten az miktarda sonlu eleman analizi zamanı gerektirmektedir. Ayrıca evrimsel yapı optimizasyonu işlemi boyunca her analizden önce yeniden ağ oluşturma zorunluluğu bulunmamaktadır, bu da ESO'nun tercih edilme sebeplerinden biri olarak sayılmaktadır. Uzaklaştırılan elemanların malzeme özellik numarası sıfıra getirilip, genel rijitlik matrisi oluşturulurken de bu elemanlar göz ardı edilmektedir [84]. Uzaklaştırmanın diğer bir yolu ise elastisite modülü ya da eleman kalınlığı gibi boyut özelliklerine çok düşük değerlerin atanması da olabilmektedir. Örnek olarak Hinton ve Sienz [96], uzaklaştırılan elemanların elastisite modüllerini 10^{-5} ya da 10^{-6} gibi değerlerle çarpılmaktadırlar ve bu yöntem ESO üzerine çalışan araştırmacılar tarafından da analizlerde sorun yaşamamak için en çok tercih edilen yöntem olarak kabul görmektedir [97].

Analitik yöntemlere göre daha olumlu sonuçlar alınan ESO topolojileri diğer yöntemlere kıyasla kavramsal olarak daha basit ve uygulanması daha kolay bir yöntem olarak bilinmektedir, çünkü karmaşık denklemler ve işlemler içermezken, sistematik olarak çıkarılan etkisiz elemanlarla sistemin tam gerilmeli hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bunların yanında ESO'nun en büyük eksiklerinden olan teorik temele sahip olmaması, ESO'daki minimizasyon sorununun hala çözilememesine sebebiyet vermektedir. Sonuçlar arasındaki uyumun bir tesadüf olamayacağı düşünülürse, malzemenin aşamalı olarak kaldırılmasının matematiksel olarak açıklanıp açıklanamayacağını ve ESO'nun teorik temelini çizilip çizilemeyeceği hala incelenmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanmakta olan ESO'nun konvansiyonel optimizasyon yaklaşımlarından farklı olarak ayrı bir amaç işlevi veya kısıtları bulunmamaktadır. Bu yüzden ESO'nun teorik yönleri, konuyla ilgili olarak literatürde bulunan vakalardan elde edilen sonuçlarla incelenmektedir. [59, 97]

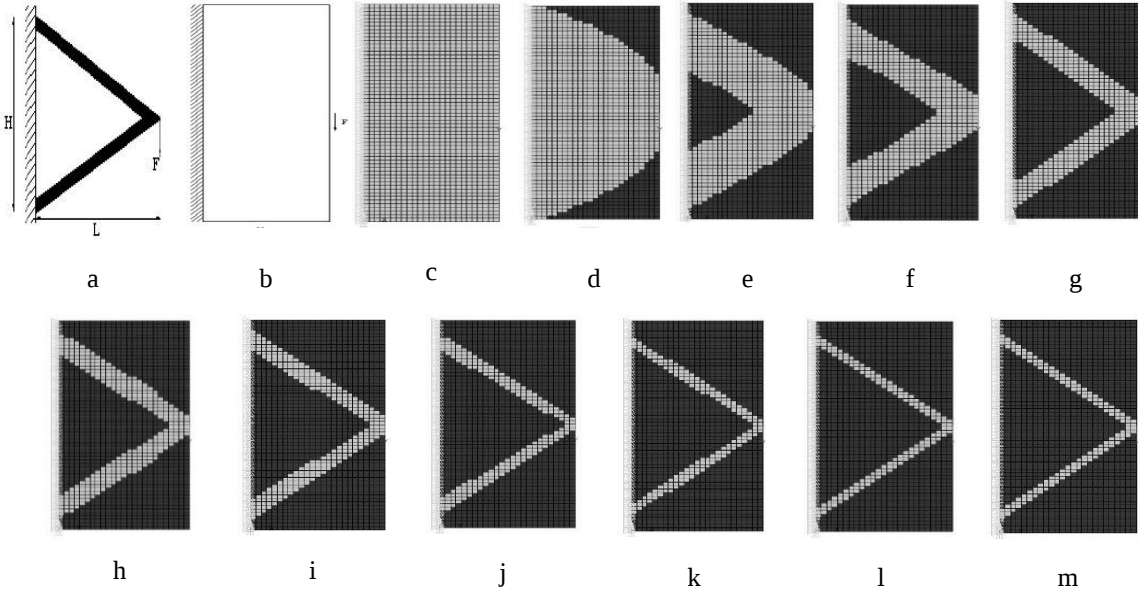
Nesnelerin sahip olduğu şekli kullanarak yeni tasarımlar oluşturmak daha hızlı ve güvenilir olabilir, ancak en etkili veya en iyi dizaynı elde etmek için kullanılan yöntem olarak ESO tercih edilememektedir. Tasarım kısıtlarının açık bir şekilde tanımlanamadığı durumlarda, optimum dizaynın bulunmasında zorluklarla karşılaşılabilir. Farklı çevre koşulları,

farklı yapısal formlarda ise evrimsel yapı optimizasyonu yöntemi kolaylıkla uygulanabilmektedir [97].

ESO algoritması

Optimizasyon dizaynlarında genel olarak, amaç fonksiyonu olarak minimum ağırlık veya hacim kullanılmaktadır, kısıtlar ise değişebilmektedir. Optimizasyonda ele alınacak yapının kullanım amacına, çevre koşullarına ve ekonomik şartlara göre kısıtlayıcılar, rijitlik, gerilme, kalınlık, frekans vb. gibi nicelikler olabilmektedir. Tasarım değişkenleri de kullanılacak algoritmalara veya malzemeye göre değişebilmektedir, ancak genelde eleman sayısı, eleman kalınlığı, eleman hacmi gibi değişkenler tercih edilmektedir.

ESO yönteminde, eleman uzaklaştırmada kriter olarak von Mises gerilmeleri veya asal gerilmeler kullanılabilmektedir. Yapıda çekme ve basınç elemanlarının her ikisinin de mevcut olduğu ve hemen hemen eşit olarak dağıldığı durumlarda asal gerilmeler yerine von Mises gerilmelerinin uzaklaştırma kısıtı olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür [93].



Şekil 3.3 Başlangıç modelinin bazı red oranlarıyla incelenerek iki çubuklu kafes yapıya dönüşüm süreci a) İki çubuklu çerçeve yapı örneği, b) İki çubuklu çerçeve yapı için tasarım alanı, c) 25x60 adet sonlu elemana bölünen tasarım alanı, d) RR=%3, e) RR=%6, f) RR=%9 g) RR=%12, h) RR=%15, i) RR=%18, j) RR=%21, k) RR=%24, l) RR=%27, m) RR=%30 [100].

3.2.2. BESO yöntemi (Çift yönlü evrimsel yapı optimizasyonu)

ESO'daki ilk gelişmeler, yapıdan yalnızca malzemenin kaldırılmasına izin verilerek sınırlandırılmıştır ve çıkarılmış olanlar daha sonraki evrimlerde okunamamaktadır, bu nedenle nihai tasarımın yeterli elemanlarla temsil edilmesini sağlamak için iyi bir tasarım başlangıç ayarı gerekmektedir. Bazı durumlarda optimizasyon yanlış tanımlanmış başlangıç ayarı nedeniyle yanlış yönlendirilebilmektedir [98]. ESO algoritmasının tersi bir yöntem olan eklemeli evrimsel yapı optimizasyonu (AESO) tamamlayıcı olarak Querin ve araştırma grubu tarafından önerilmiştir. AESO'da az bir malzemeden oluşan temel yapı, üzerinde bulunan yüksek stresli bölgelere kademeli olarak malzeme eklenerek evrimleştirilmektedir [99]. Hem ESO hem de AESO, yapısal malzeme düzeninde yalnızca malzeme kaldırma veya malzeme ekleme olarak tek yönlü bir varyasyona izin vermektedir. Optimum yapı üretmek için harcanan zamanı azaltmak ve metodun optimum yapıları bulmadaki güvenilirliğini artırmak arayışı, çift yönlü evrimsel yapısal optimizasyonun geliştirilmesine yol açmıştır [100]. Querin ve araştırma grubunun ESO ve AESO kavramlarını kombine etmesiyle birlikte ortaya çift yönlü evrimsel optimizasyonu yöntemi (BESO) çıkmıştır [85]. Ayrıca Yang da Querin ve arkadaşları gibi çalışmalarında ESO yöntemini çift yönlü evrimsel yapısal optimizasyon (BESO) yöntemine genişleterek yüksek gerilimli elementlere komşu olan uzaklaştırılmış öğelerin tekrardan kazanılmasını sağlamıştır [101]. Şimdiye kadar tanıtılan tüm BESO tasarımları, Dorn ve arkadaşlarının belirttiği tasarım alanında bulunan katı ve boş alanlar da dahil olmak üzere bütün elemanları içerdiği zemin yapısı fikrini kabul etmektedir [102]. BESO algoritmalarında, en düşük von Mises gerilmelerine sahip elemanlar, bir reddetme oranı (C_{rr}) ile kriteri karşılayacak şekilde kaldırılırken, en yüksek von Mises stres bölgelerine yakın boşluk elementleri ise dahil etme oranı (C_{ir}) ile ayrı ayrı muamele edilerek yapıya iki yönlü bir şekilde hem eklenip hem de çıkarılabilmektedir. Böylece hem ESO'dan hem de AESO'dan farklı olarak BESO ile yapıdan malzemenin kaldırılması da eklenmesi de mümkün kılınmıştır. BESO ile ilk tasarım ayarının nasıl tanımlandığına bakılmaksızın optimum yapıya ulaşılması daha kolaylaşmıştır [103].

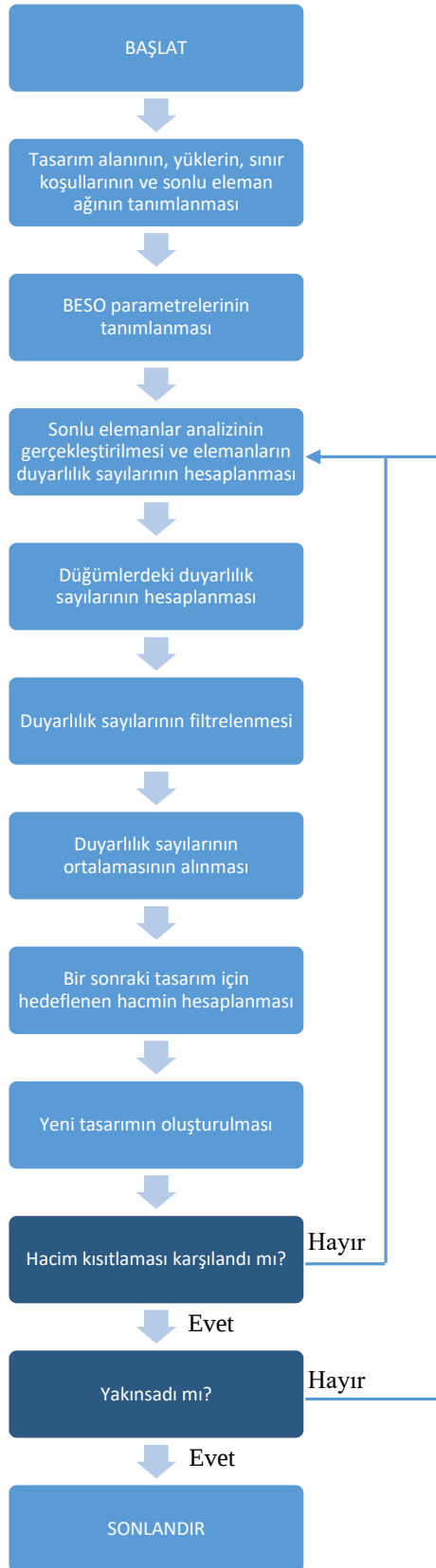
Yukarıda da bahsedildiği üzere BESO yöntemi ile, tasarımların potansiyel olarak optimum seviyeye ulaşmasını sağlamak için malzemenin aynı anda kaldırılmasını ve eklenmesini sağlamaktadır [104]. Yöntemdeki amaç sertlik optimizasyonuna dayandırılmıştır [102] ve boşluk elemanlarının duyarlılık sayıları, sonlu elemanlar analiziyle beraber yer değiştirme alanının doğrusal bir ekstrapolasyonu ile tahmin edilmektedir. Bu noktada en düşük

duyarlılıklı sayılar içeren katı elemanlar yapıdan uzaklaştırılıp, boşluklu elemanların en yüksek olduğu noktalarda ise duyarlılık sayıları katı elemanlara dönüştürülmektedir. Her bir iterasyonda çıkarılan ve eklenen elementlerin sayısı, sırasıyla reddetme oranı (RR) ve dahil etme oranı (IR) ile belirlenmektedir [104].

Huang ve Xie'nın BESO algoritmalarındaki yaptığı iyileştirmeler sonucunda önceki çalışmalara göre önemli adımlar atılmış olup optimum tasarımların elde edilmesi sağlanmıştır. 2007 yılında bu ikili BESO yöntemini geçmişte yapılan çalışmalardan da yararlanarak, bir duyarlılık filtresi şeması ve bir stabilizasyon şeması ile geliştirmiştir [105]. Bu gelişme çift yönlü evrimsel yapı optimizasyonu yönteminde bulunan en son ve en büyük geliştirme olarak kabul edilmektedir. BESO yönteminin son hali aşağıdaki işlemleri içermektedir:

- Sonlu elemanlar kullanarak tasarım alanının bölünmesi
- Bölünen tasarım alanında sonlu elemanlar analizi yapıldıktan sonra temel duyarlılık sayısının hesaplanması
- Eski verileri de göz önüne alınarak bulunan duyarlılık sayısının ortalamasının elde edilmesi
- Sonraki iterasyon için hedeflenen hacimin belirlenmesi
- Duyarlılık sayısına göre eleman eklenmesi veya uzaklaştırılması
- Kısıtlamada istenilen hacime ulaşıncaya kadar 2. adımdan 5 adıma kadar olan maddelerin tekrarlanması

Yöntem bazı statik problemlerinde uygun sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olurken, dinamik problemler için aynı şey söylenememektedir. Neden olarak ise, hesaplama karmaşıklığı ve yük bölgelerinin çıkarılan elemanlarla birlikte uzaklaştırılabilmesi gösterilmektedir [106]. BESO'nun ilk zamanlarında ise optimuma ulaşamamasının bazı nedenleri olarak, yakınsamama, ağa bağımlılık, yetersiz matematik açıklamalar ve ayrıntılı teorik odaklı yaklaşım gösterilmektedir. Düşük von Mises gerilmelerine sahip elemanlar kaldırılırken ve en yüksek von Mises gerilme bölgelerine yakın yerlerde olan boşluklu elemanlar katı elemanlara dönüştürülmektedir, ancak bu prosedür optimal olmayan çözümlere yol açabilmektedir. Neden olarak ise ret oranının ve dahil etme oranının seçiminin zorluğu gösterilirken, bu durum iyi sonuç alınmasını da güçleştirmektedir [104]



Şekil 3.4. BESO akış şeması [107]

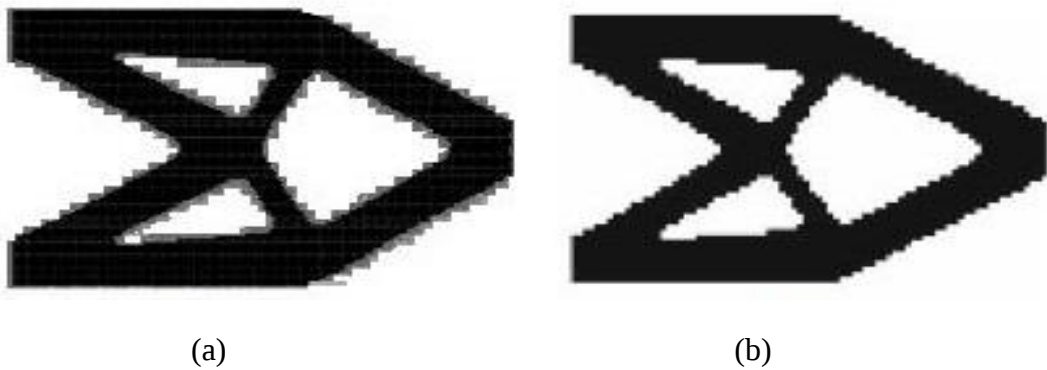
İlk olarak yakınsak olmayan çözüm ele alınacak olursa, BESO'nun ilk zamanlarında karşılaşılan önemli dezavantajlardan biri olarak görülmektedir. Özellikle de hedef fonksiyonu uyumluluk olduğunda BESO prosedürünün durdurulmadan devam etmesi çözümün çok daha kötü sonuçları ortaya çıkarmasına neden olabilmektedir [105]. Uygulanan iterasyonların çok sayıda olması nedeniyle, optimal çözümün seçilmesi de giderek zorlaşmaktadır.

İkinci olarak ise ağa bağlı olan çözümün sonucunda oluşan problem bulunmaktadır. Bunun nedeni ise farklı ağ yoğunluklarında, yapısal hacmi değiştirmeden daha fazla delik açmanın genellikle belirli bir tasarımın verimliliğini artıracığı beklentisi olarak değerlendirilebilmektedir [108]. Bu etki, sonlu elemanlar ağı kullanıldığında çok sayıda deliğin görüldüğü ve ağa bağımlılık olarak adlandırılan sayısal bir kararsızlık ortaya çıkışı olarak kabul edilmektedir [104]. Gözlenen yoğun delikli yapı dama tahtası deseni olarak bilinmektedir. Dama tahtası desenleri sonlu elemanlara dayalı yapısal optimizasyon tekniklerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [109]. Bu desenler aslında çok pratik değildir ve yapının üretimini zorlaştırmaktadır. Ağa bağımlılık problemlerinin üstesinden gelmek için, çevre kontrolü ve yumuşatma algoritması gibi çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Bunlardan çevre kontrolü sayesinde, yapı çevresinin yeterince düşük bir değere ulaşması, ayrıca yerel minimuma yol açması ve sonlu elemanların ayrıklaştırılması ile yakınsamaya ulaşılması sonucunda ağ bağımsızlığı bastırılabilir [110]. Ancak, yeni bir tasarım için çevre uzunluğunun uygun bir değerini tahmin etmek veya seçmek de yine zor bir görevdir ve yumuşatma algoritması ağa bağımlılık probleminin tamamen üstesinden gelememektedir [104]. Bu nedenle, BESO yönteminde dama tahtası kalıplarını bastırmaya yarayan ve ağ bağımsızlığı için çalışan bir filtre düzeni tanıtılmıştır.

Tanımlanan tüm eksikliklere çözüm olarak, Huang ve Xie tarafından sağlam bir matematik geçmişine sahip rafine bir BESO algoritması önerilmiştir [104, 105, 111]. Önerilen bu algoritmayla gündeme getirilen yeni yumuşak öldürme BESO yöntemi, orijinal sert öldürme BESO yönteminin yerine geçmeyi başarmıştır. Uyguladıkları malzeme enterpolasyon şemasında, geçersiz elemanların yerini yumuşak elemanların aldığı ceza kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, filtre şeması bu yeni algoritmadaki ana bileşenlerden biri olarak alınmaktadır [112].

Sert öldürme BESO yöntemi ile yumuşak öldürme BESO yöntemi arasındaki ana fark, sert öldürme için etkisiz ögenin ortadan kaldırılması ve silinmesi; yumuşak öldürmede ise silinen ve artık boşluk olan yerlerde buralara yumuşak elemanların düşük yoğunluklarda eklenmesi olarak ifade edilebilmektedir. Rozvany ve Querin, boşluk elemanlarının çok düşük yoğunluğa sahip yumuşak elemanlarla titiz bir şekilde değiştirildiği optimalite kriterleriyle uyulan Sıralı Eleman Reddi ve Kabul (SERA) yöntemini önermiştir. Ardından Huang ve Xie tarafından malzeme enterpolasyon şemasını kullanan yeni bir BESO algoritması geliştirilmiş ve tasarım değişkenleri, sırasıyla katı ve yumuşak elemanlara karşılık gelen 1 ve x_{min} değerleri olarak ayrı ayrı sınırlandırılmıştır [111]. Yöntemin en büyük avantajı, tasarım alanından gelen verimsiz malzemelerin mevcut kalmasının (asla kaldırılmaması) ve dolayısıyla, yumuşak elementlerin bilgisinin, daha fazla duyarlılık hesaplaması için sonlu eleman analizi yoluyla kolayca elde edilebilmesi olarak söylenebilmektedir. Ayrıca yöntem sayesinde, eski BESO yöntemlerine oranla daha optimum tasarımların elde edildiğine inanılmaktadır [112].

Yumuşak öldürme yöntemi, sert öldürme yönteminin sezgisel temeline dayanmaktadır ve iki yöntem arasındaki ilişki bazı örneklerde çözümlerin benzerliğini açıklamaktadır. Sertlik optimizasyon probleminin sayısal örneği hem yumuşak öldürme yöntemi hem de sert öldürme yönteminin ürettiği optimal tasarımların birbirine eşit olduğunu göstermektedir. Hesaplama süresindeki fark, silinmiş elemanların sonlu elemanlar analizinden çıkarılmasından dolayı zorlu öldürme yöntemini daha çok tercih edildiğini göstermektedir [104].



Şekil 3.5. Sertlik üzerine ele alınmış modellerdeki optimal tasarımlar a) sert öldürme yaklaşımı, b) yumuşak öldürme yaklaşımı [112]

3.3. Matematik Temelli Metodlar

3.3.1. Homojenizasyon yöntemi

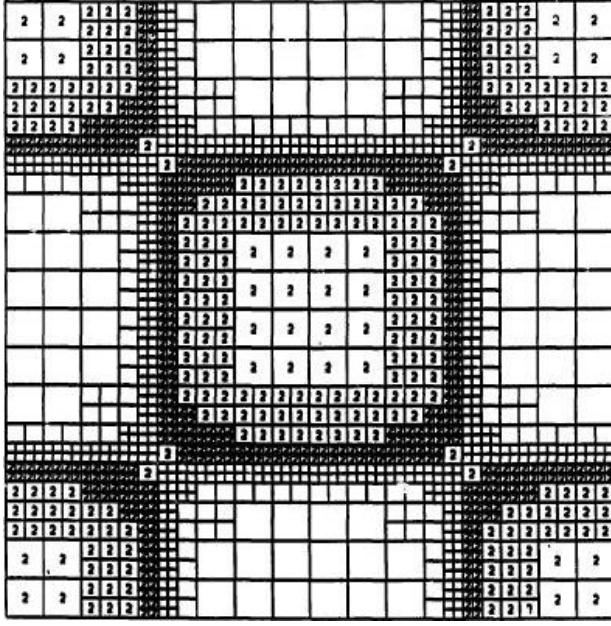
1970'lerden bu yana gelişen matematiksel homojenizasyon teorisi, eşdeğer homojenize edilmiş malzemenin etkin özelliklerini bulmak için alternatif bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır [113, 114, 115]. Bu teori, gözenekli ortamlarda ısı transferi veya akışkan akışı veya örneğin kompozitlerde elektromanyetizma gibi ince heterojen sürekli ortama sahip birçok fizik ve mühendislik alanında uygulanabilmektedir. Mekanik ve fizikteki temel varsayımlar, materyaller atomlardan veya moleküllerden oluştuğu için bir tür homojenizasyon olarak düşünülebilmektedir [116].

Topoloji optimizasyonunda ise matematiksel temelli olarak kabul edilen homojenleştirme metodu bulunmaktadır. Yapısal tasarımda topoloji optimizasyonu için homojenizasyon yöntemi 1988'den bu yana çeşitli çalışmalarla geliştirilmiştir [77, 117-123].

Homojenizasyon yönteminin ortaya çıkmasına yardımcı olacak olan Cheng ve Olhoff'un katı elastik plakaların optimum kalınlık dağılımının tasarımı konusunda önemli özellikler bildirdikleri çalışmaları bulunmaktadır [124]. Cheng ve Olhoff'un çalışmasından önce Cea ve arkadaşları ve de Tartar benzer bazı endikasyonları araştırmalarında dile getirmişlerdir [77, 125, 126]. Cheng ve Olhoff küresel bir optimal çözümün genel olarak pürüzsüz fonksiyonlar sınıfında veya sınırlı sayıda süreksizlik içeren pürüzsüz fonksiyonlar sınıfında olmadığını belirtmiştir. Bu çalışmaları sonucunda ise mikro yapı kullanılarak optimum tasarım problemlerinin çözülmesi üzerine bir dizi çalışmanın başlatılmasına yol açmışlardır. Çoğu çalışma, levha problemi [127-130] ve belirli bir hacim fraksiyonunda iki farklı materyalden yapılmış burulma çubuklarının optimum tasarım problemi ile ilgili olarak yer almaktadır [129,131,132]. Optimal tasarımda çeşitlilik problemiyle başa çıkmak için Kohn ve Strang gevşeme kavramını ortaya çıkarmışlardır [132]. Bu kavram, mikro yapıların tanıtılmasının ve homojenizasyon yönteminin kullanılmasının istenilen optimum çözüme ulaştıracağını anlatmaktadır. Matematiksel terimlerle, yapısal tasarım problemlerinin formülasyonunda mikro yapıların tanıtılması, tasarım optimizasyonu için formüle edilebilecek varyasyon probleminin gevşemesine karşılık gelmektedir [132-135]. Ardından Rozvany ve arkadaşları yaptıkları araştırmalarda, gevşeme kavramının delikli elastik plakaların dizaynlarıyla ilişkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır [130]. İki boyutlu model

kullanarak bir kirişin tasarımı ise 1988 yılında Zochowski tarafından çalışmasında tarif edilmiştir [136]. Plaka tasarım problemi boyutlandırma problemi olarak geçerken, burulma problemi ise bir şekil tasarım problemi olarak ifade edilebilmektedir. Her iki durumda da lamine yapıların daha verimli tasarımlar sağladığı ve dolayısıyla en güçlü yapıları elde etmek için mikro yapıların inşa edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu, mikro yapıli malzemeler için etkili malzeme özelliklerini hesaplamak için tutarlı bir yol gerektirir ve bu homojenizasyon yöntemi kullanılarak rahatlıkla yapılabilmektedir [113, 126, 137-139]. Bu nedenle, yapıların optimal tasarımı, mikro yapıli malzemelerin çalışmaları ve kompozitler için etkin malzeme özellikleri üzerindeki optimal sınırların bulunmasında yakından ilişkili olduğu ifade edilebilmektedir [140-146].

Bu gelişmelerle beraber Bendsøe ve Kikuchi, homojenizasyon yöntemini kullanarak topoloji optimizasyonu için yeni bir yöntem elde etmişlerdir [77]. Bu yeni optimizasyon yaklaşımı, yapısal optimizasyon alanında bir örnek model değişikliği yaratmıştır. Suzuki ve Kikuchi, amaç fonksiyonunda ortalama uyumluluğu en aza indirmek hedef olarak alındığı statik bir optimizasyon problemi ortaya çıkarmışlardır [147]. İlerleyen zamanlarda bu problem dinamik problemler için de genişletilmiştir. Diaz ve Kikuchi, amaç fonksiyonunun tek bir özdeğerini en üst düzeye çıkarmak olduğu bir özdeğer optimizasyon yöntemi önermişlerdir [148]. Bu gelişmenin ardından Ma ve arkadaşları optimizasyon sürecinde dışbükey yaklaşımı olan çok özdeğerli bir optimizasyon metodu kurmuştur [149]. Hatta oluşturdukları bu yaklaşımı bir frekans tepkisi optimizasyon problemine de genişleterek incelemişlerdir [150]. 1993 yılında Ananthasuresh bu yaklaşımı ilk defa uyumlu mekanizmaların tasarımına genişletmiştir [151]. Bununla birlikte, sonuçları mekanizma tasarımından ziyade maksimum sertlik tasarımı gibi görünmektedir. Yani, optimal yapılar çok amaçlı optimizasyon probleminin formülasyonu nedeniyle uyumlu mekanizma olarak yeterli esnekliğe sahip olamamaktadırlar. Bu nedenle, uyumlu mekanizmalar gibi esnek yapıların tasarımı için bu optimizasyon yöntemi homojenleştirme yöntemi kullanılarak oluşturulmamıştır [152].



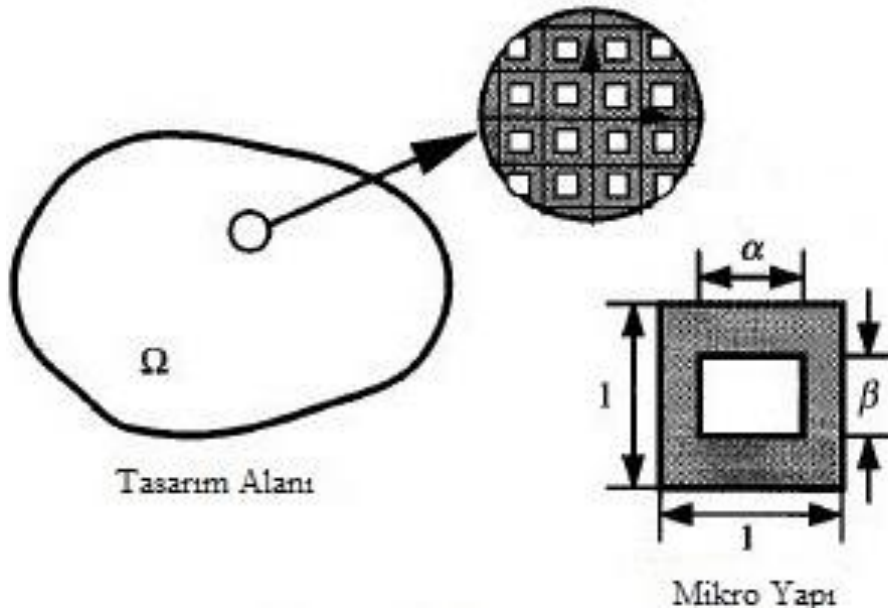
Şekil 3.6. Sonlu elemanlar ağı uygulanmış bir hücre [77]

Aslında pratikte olduğu gibi teoride de uyumluluk, tek veya çoklu yükleme durumlarında öz frekans veya yer değiştirme alanı optimizasyonu ile sınırlandırılmıştır. Bu yüzden asıl sorun, gevşek objektif fonksiyonunun türetilmesinde çok önemli olan optimum mikro yapıların, yalnızca depolanan elastik enerjiyle ilgili hedeflenmiş özel objektif fonksiyonlar için bilinmektedir. Sayısal bakış açısıyla ele alındığında bu zorluk mikro yapıların bir alt sınıfı ile yetersiz olsa da açık bir şekilde hafifletilebilmektedir. Örneklendirecek olunursa en basit sınıf olarak tamamen açık homojenize özelliklere sahip sıralı lamine kompozitler gösterilebilmektedir [120]. Bu yaklaşım Allaire ve arkadaşları tarafından 2000 ve 2002 yıllarında sorunun kısmi gevşetilmesi olarak adlandırılmaktadır [153, 154].

Homojenizasyon yöntemi hakkında, şekil optimizasyonuna olası alternatif bir yaklaşım olarak bahsedilmektedir. Şekil optimizasyon problemleri, kompozit materyaller kullanılarak materyal dağıtım problemlerine dönüştürülmektedir. İki madde bileşeni, madde ve boşluk göz önünde bulundurularak, mikroskobik olarak en uygun boşluk dağılımı, genel anlamıyla sınır değişimleri değerlendirilmektedir. Homojenizasyon yönteminin önemli bir özelliği olarak, skobik madde bileşenleri içeren malzemenin makroskopik yapı denklemlerini belirlemek için uygulanması söylenebilmektedir [77].

Homojenizasyon yaklaşımının avantajları bazı zorluklarla kazanılmıştır. Standart problem binlerce değişkenle başa çıkarken bu yüzden şimdiye kadar sadece basit objektif

fonksiyonlar ve kısıtlamalar kullanılmıştır. Bildirilen sorunların çoğunda, yalnızca bir yükleme durumu göz önünde bulundurulur, yöntemdeki amaç topoloji optimizasyonunun temel hedeflerinden olan uyumluluğu en aza indirmektir ve mevcut tek kısıtlama ise malzeme miktarı üzerindeki izoperimetrik kısıtlama olarak ifade edilebilmektedir [155].



Şekil 3.7. Tasarım alanı içerisinde bulunan bir mikro yapının birim hücresi [152]

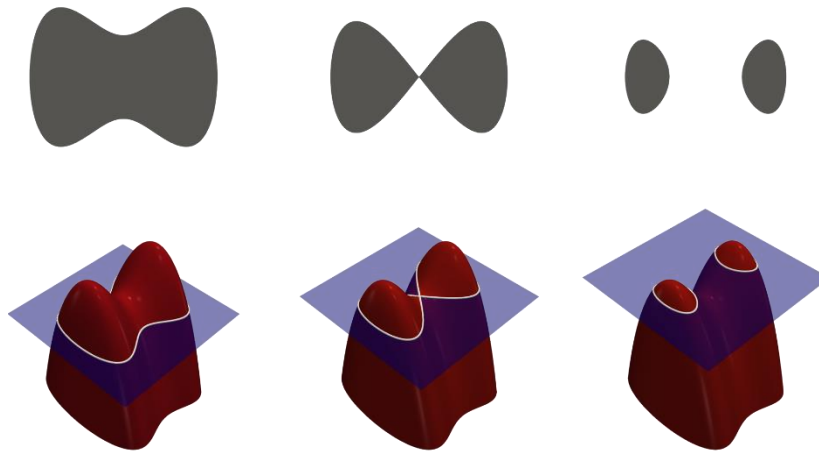
3.3.2. Seviye seti yöntemi

Yeni tip bir yapısal optimizasyon yöntemi olarak geliştirilmiş olan seviye seti bazlı yapısal optimizasyon yönteminde diğer yöntemlere göre daha farklı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu metodlar dolaylı olarak bir skaler fonksiyon olan seviye seti fonksiyonunun izo-yüzeyini kullanan hedef yapısal yapılandırmaları temsil etmektedir ve hedef yapıların ana hatları optimizasyon işlemi sırasında seviye seti fonksiyonu güncellenerek değiştirilmektedir. Seviye seti yöntemi ilk olarak Osher ve Sethian tarafından Eulerian koordinat sisteminde evrimsel arayüzleri dolaylı olarak temsil etmek için çok yönlü bir yöntem olarak önerilmiştir [156]. Hemen sonrasında seviye seti fonksiyonunun Von Mises stresine dayanan bir geçici yöntem kullanılarak geliştirildiği seviye seti temelli bir yapısal optimizasyon yöntemi önerilmiştir [157]. Osher ve Santosa ise şekil hassasiyetinin normal hız olarak kullanıldığı ve yapısal optimizasyonun yukarı sarma şeması kullanılarak seviye seti denklemi çözülerek gerçekleştirildiği yapısal bir optimizasyon yöntemi önermiştir. Önerilen yöntem, elastiklik tensörü tüm alan üzerinde sabitken, kütle yoğunluğunun iki farklı değeri aldığı zarın iki fazlı

bir optimizasyonunu kullanarak homojen olmayan bir tambur için öz frekans problemlerine uygulanmıştır [158].

Belytschko ve arkadaşları yapısal sınırları simgelemesi için dolaylı bir işlev kullanarak bir topoloji optimizasyonu önermiş ve yöntemde Young modülü gibi malzeme özelliklerinin düzgün bir şekilde dağıldığı, bir aktif bölge kavramı getirerek topolojik değişikliklere izin vermektedir [159]. Sınırların zamana göre evrimi, Hamilton-Jacobi denilen kısmi diferansiyel denklemin, arayüze normal olan hareketli sınır hızı olan uygun bir normal hız ile çözülmesiyle izlenebilmektedir. Wang ve arkadaşları, şekil optimizasyon yöntemi olan levet set fonksiyonunu Hamilton-Jacobi denklemi kullanarak şekil duyarlılığı bazında geliştirdiğinde, bu önerilen yeni yöntem minimum ortalama uyumluluk problemine uygulanmıştır [87]. Metodun yayınlanmasından sonra geliştirmelerine devam eden Wang ve Wang, m seviye seti fonksiyonlarının 2m farklı materyal fazını temsil etmek için kullanıldığı “renk” seviye seti metodunu kullanarak çok materyalli optimal tasarım problemine genişletmiştir [160]. Luo ve arkadaşlarıyla benzer bir çalışma ortaya koyan Chen ve arkadaşları da hayali aktif çevre çizgisi tekniklerini temel alan, ikinci dereceden bir enerji kullanarak yapısal bileşenlerin geometrik genişliğini kontrol eden seviye setine dayalı bir şekil optimizasyon yöntemi önermiştir [161, 162]. Allaire ve arkadaşları da bağımsız olarak, levet set fonksiyonunu bir düzleştirme tekniği kullanılarak tasarım alanına eşleştirilen düzgünleştirilmiş şekil hassasiyetleri ile geliştirilerek levet set bazlı bir şekil optimizasyon yöntemi önermiştir [88]. Bu önermede, durumun sayısal hesaplaması için seviye seti ağı kullanabilmek adına bu özel sınır koşulundan faydalanmayı önermektedir. Yapının yer değiştirme alanını hesaplamak için basit bir ersatz malzemesi yaklaşımı kullanılmıştır ve bu yaklaşımda hem doğrusal elastik hem de doğrusal olmayan hiperelastik malzemeden oluşan yapılar için minimum uyumluluk problemi ve de yapısal tasarım uyumlu mekanizma problemleri için optimal konfigürasyonlar elde edilmiştir. Ersatz malzeme yaklaşımı, alanın dışını daha zayıf bir iletkenlik malzemesi ile doldurarak durum fonksiyonunu, tüm seviye seti ağında belirtilen bimateryal denkleminin çözümü ile değiştirmek üzerine olduğu ifade edilebilmektedir. Buna sebep olan ersatz malzemesinin hesaplanması gereken durumun yakın bir şekilde tahmin edilmesine yol açan yalıtkan bir tabaka gibi davranması olarak söylenebilmektedir. Bu yaklaşım, yapı optimizasyonunda kullanılan tüm genel kriterler için çok iyi sonuçlar vermektedir ve zamanla referans bir yöntem olmuştur [88, 163]. Bunun üzerine çalışmalarına devam eden Allaire, Jouve ile birlikte yöntemlerini en düşük öz-

frekans maksimizasyonu problemlerine ve çoklu yüke sahip minimum uyumluluk problemlerine kadar genişletmeyi başarmışlardır [164].



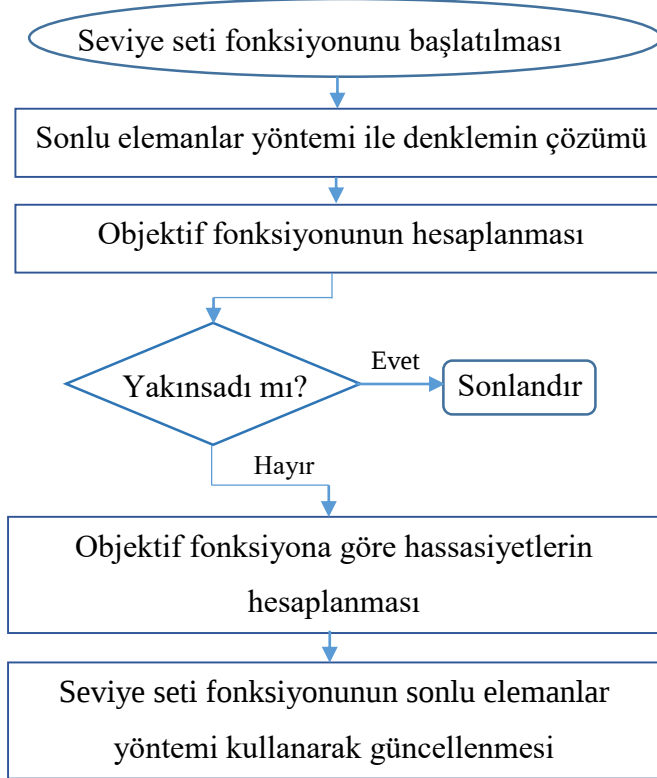
Şekil 3.8. Seviye seti yönteminin bir illüstrasyonu [165]

Yukarıda belirtilen seviye seti temelli yapısal optimizasyon yöntemlerinin, bir tür şekil optimizasyon yöntemi olduğu söylenebilmektedir, çünkü hedef yapıların şekil sınırları, şekil hassasiyetlerini kullanarak ve seviye seti denklemini güncelleyerek bir başlangıç konfigürasyonundan geliştirilmektedir. Uygulanan yöntemlerin sonucunda elde edilen en uygun yapılandırmalar, verilen ilk yapılandırmaya büyük ölçüde benzemektedir. Sonraki bazı çalışmalarda Hamilton-Jacobi denklemi kullanılarak levet set temelli yapısal optimizasyonda, yapısal sınırların hareketinin sabit tasarım alanının sınırlarında kaldığı gözlemlenmiştir, çünkü seviye seti fonksiyonu burada sıfır olmayan bir değer çıkmaktadır ve bunun sonucunda aslında uygun olmayan optimal yapılandırmalar elde edilmektedir [166, 167]. Topolojik değişikliklerin olabilesini sağlamak için Allaire ve çalışma arkadaşları kabarcık metodunu, topolojik türevlerini kullanan bir seviye seti temelli şekil optimizasyon yöntemine uygulamışlardır [168]. Kabarcık metodundaki temel fikir, kabarcıklar olarak adlandırılan yeni deliklerin bileşenin mevcut yapısına yinelemeli konumlandırılması olarak tanımlanabilmektedir. Yeni kabarcıkların iteratif konumlandırılması değişken bir problem çözülerek gerçekleştirilmektedir. Her yeni kabarcığın eklenişi topoloji sınıfının değişmesine neden olmaktadır. Bu farklı topoloji sınıfları için, mevcut kabarcığın optimal şeklini ve diğer değişken sınırlarını belirleyen hiyerarşik olarak yapılandırılmış şekil optimizasyonları gerçekleştirilmelidir [169]. Allaire'in çalışmasında uyguladığı yöntem, yapısal sınırlar seviye seti denklemini kullanılarak düzleştirilmiş şekil hassasiyetlerine göre

güncellenmektedir ve optimizasyon işlemi sırasında delikler açılmaktadır. Birkaç farklı başlangıç konfigürasyonu kullanarak uygun optimal konfigürasyonlar elde edilmiştir, ancak optimizasyon işlemi sırasında deliklerin girişine ilişkin zor olan parametre ayarı elde edilen optimum konfigürasyonları potansiyel olarak etkilemiştir [168].

Wang ve arkadaşları ise daha önce önerilen yöntemlerinden birine dayanan bir topoloji optimizasyonu yöntemi için genişletilmiş bir seviye seti yöntemi önermiştir [87, 170]. Yöntemlerinde malzeme alanında sıfır olmayan bir değere sahip olan uzatılmış bir hız tanımlanmakta ve işaretlenmiş bir mesafe fonksiyonunun özelliğini korumak için seviye ayarlama fonksiyonu yeniden başlatılmamaktadır. Bu nedenle, bir malzeme alanındaki deliklerin dahil edilmesini içeren topolojik değişikliklere izin verilirken, genişletilmiş hız, mantıksal olarak belirlenmemektedir, çünkü seviye seti denklemi, sınır önerisi kavramına dayanarak elde edilmektedir. Sonuç olarak açıklandığında, uygun genişletilmiş hızların tanımlanması zor ifade edilebilmektedir ve genişleme hızlarındaki uzama hızlarının tanımlanması, elde edilen optimal yapıların şeklini belirlemektedir [167]

Genel anlamda seviye seti temelli yapısal optimizasyon yöntemlerinde, karmaşık şekil ve topolojik değişiklikler uygulanabilmektedir ve elde edilen en ideal yapılar gri tonlardan arındırılmıştır, çünkü elde edilmek istenen yapısal sınırlar seviye set fonksiyonunun izoyüzeyi olarak gösterilmektedir. Her ne kadar yeni yapısal optimizasyon yöntemleri, dama tahtası desenleri ve gri tonlama problemlerinin üstesinden gelse de, örgü bağımlılıkları tamamen ortadan kaldırılamamıştır [171]. Sınırdan bağımsız yükler, koşullar ile topoloji optimizasyonu, strese bağlı topoloji optimizasyonu problemlerinin çözümü için sahip olduğu doğal avantajları nedeniyle, son yıllarda git gide daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Bilinen topoloji optimizasyon yaklaşımları arasındaki temel farklılık, bir yapının topolojisini ve karşılık gelen sayısal iyileştirmeleri göstermek için kullanılan karakteristik fonksiyonun nasıl yaklaştırılacağına dikkat edilmesi olarak ifade edilebilmektedir [172]. Seviye seti yöntemi, akışkanlar mekaniği [173-175], faz geçişleri [176], görüntü işleme [177-179] ve CAD [180] uygulamasında katı modelleme gibi çeşitli çalışmalarda da yarar sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Seviye seti optimizasyonu prosedürünün akış şeması [171]

3.3.3. SIMP yöntemi

SIMP yöntemi bu çalışmada optimizasyon yöntemlerinin ayrıldığı başlıktaki gibi matematiksel temelli bir yöntemdir ve sınıflandırılması buna göre yapılmıştır ancak yöntemin ilk çalışmalardan bu yana optimizasyonlarda ele alındığı asıl nokta yapıdaki malzeme yoğunluğu üzerine olarak ifade edilebilmektedir.

Yoğunluğa dayalı yöntemlerin dikkat edilmesi gereken bir yönü, sürekli tasarım değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak problemin fiziksel niceliklerini ifade etmek için uygun bir enterpolasyon fonksiyonu ve cezalandırma tekniğinin seçilmesi olarak görülmektedir. Yoğunluk bazlı topoloji optimizasyonunda tasarım değişkenlerinin dağınık fonksiyonu, her sonlu elemanın malzeme yoğunluğu (ρ_e) olarak ifade edilmektedir. Yoğunluk değerleri aralığı $0 \leq \rho_e \leq 1$ ya da $0 < \rho_{min} \leq \rho_e \leq 1$ olduğunda, 0'ın boş bir elemanı, 1'in ise katı bir elemanı temsil ettiği söylenmektedir ve ρ_{min} yoğunluk sıfır alındığında ortaya çıkacak zorlukları önlemek için bazı formülasyonlarda kullanılan minimum yoğunluk değeri olarak ifade edilmektedir. Bu yoğunluk değeri sonlu elemanlar analizinin sayısal kararlılığını sağlamaktadır. Bu zorluklar, sonlu elemanlar matrislerinde tekilliği ve bazı durumlarda sıfır

yoğunluklu bir alanda malzemenin tekrar görünememesiyle ilgili sorunları içermektedir. Bu parametreleştirmenin seçimi ile problemi katı-boş bir çözüme yönlendirmek gerekmektedir. Bu genellikle kapalı cezalandırma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bunlardan en yaygın olanı ise İzotropik Malzemelerin Ceza Kombinasyonu yöntemi olarak bilinmektedir [181].

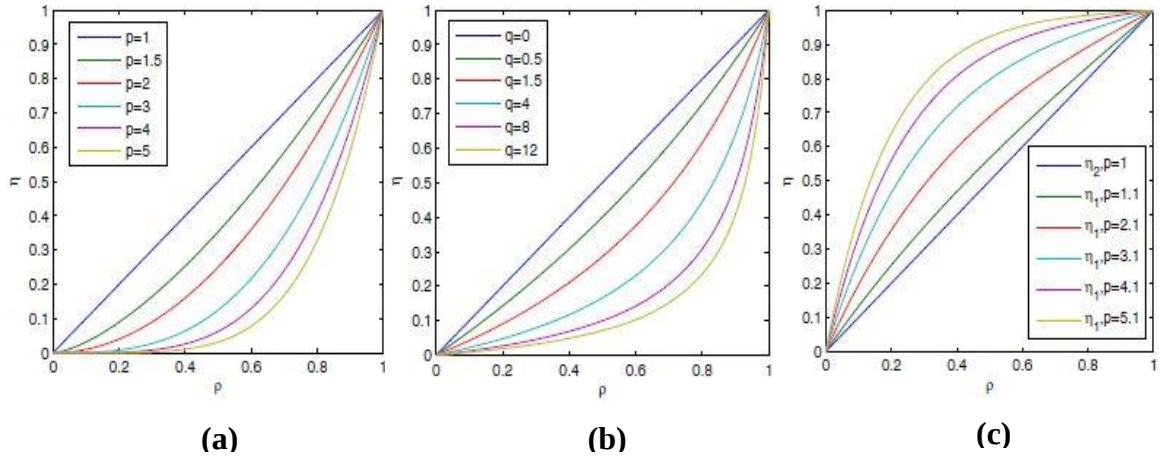
Bazı araştırmacılar SIMP yöntemindeki “S” ve “M” harflerini “Basit” (Simple) ve “Malzeme” (Material) şeklinde yorumlamıştır. SIMP yönteminin orijinal tanımında “S” harfi “Katı” (Solid) anlamında gelmektedir. “Gözenekli”nin (Porous) tam tersi olarak düşünülüp ifadelendirilirken, örneğin “Katı Altın” (Solid Gold) da geçen katı kelimesinin anlamı ile aktarılacak istenen tamamen o malzemeyle dolu iken, “Akışkan” (Fluid) kelimesinin zıttı olarak kullanılmamıştır. “Basit Malzeme” (Simple Material) veya “Basit Mikro Yapı” (Simple Microstructure) ifadelerinin anlamı çok belirsiz kalmaktadır, yöntemde anlatılmak istenen tam olarak verilememektedir. “Mikro Yapı” (Microstructure) ise aslında homojen olmayan bir element veya “hücre” içindeki materyal konfigürasyonu anlamına gelmektedir [73, 90]. SIMP'deki "Katı Mikroyapı", bütün elemanın boşluksuz bir malzeme tarafından işgal edildiği, sınırlayıcı mikroyapı durumuna atıfta bulunmak için kullanılmaktadır. 1999 yılında Bendsøe and Sigmund “M” harfi için faydalı bir alternatif olarak “Malzeme” (Material) ifadesini kullanmıştır [182].

İlk olarak Bendsøe’nun 1989 yılında çalışmasıyla ortaya çıkardığı yöntem [89] ardından Rozvany ve Zhou [183] ve Zhou ve Rozvany [184] tarafından geliştirilmiştir. Rozvany ve arkadaşları 1992 yılında yöntemi "SIMP" olarak ifade etmişlerdir [90]. Güç yasası veya hayali malzeme modeli olarak da adlandırılan SIMP yönteminde, yoğunluk değişkenleri temel değeri sonlu bir güç yasası ile cezalandırılmaktadır ve bunun sonunda da malzeme sertliği, maliyet veya iletkenlik değerleriyle elde edilen veriler çarpılmaktadır [58, 182]. Malzeme özelliklerinin tasarım değişkenleriyle olan bağımlılığı, basit bir “güç yasası” enterpolasyonu kullanarak malzeme yoğunluğu terimleriyle ifade edilebilmektedir. Ara değerlerin, toplu yoğunlukların cezalandırılmasıyla bastırıldığı anlamına da geldiği söylenilebilmektedir. Başka bir deyişle, SIMP yaklaşımı için, tamsayı değişkenlerini sürekli değişkenlerle değiştirmek ve ardından çözümü ayırık 0/1 değerlerine yönlendiren bir çeşit ceza vermek denilebilmektedir. Problem bu şekilde çözüme ulaştırıldığında, optimum topolojilerde 0 ile 1 arasında orta yoğunluktaki gri bölgeler elde edilebilmektedir. Farklı 0/1 optimal topolojilerin kolay değerlendirilmesini sağlamak amacıyla, ara yoğunlukları bastırmak için

sıklıkla ceza programları kullanılmaktadır. Özünde SIMP yöntemi gri alanları kaldırma eğilimindedir, dolayısıyla 0/1 işlemleri istenilen sonucu vermektedir. SIMP'in uygulanmasının kolay olduğu söylenebilmektedir, bunun sonucunda 0/1 çözümlerin geliştirilmesi kısmında topoloji optimizasyonu topluluğunda önemli bir konuma sahip olduğu dile getirilmektedir [185]. Bununla birlikte, SIMP çözümlerin bulunmamasını doğrudan çözme yeteneğine sahip değildir [58] ve bu nedenle sayısal dengesizlikler ortaya çıkabilmektedir [108].

SIMP yönteminin sahip olduğu sadeliği, hem endüstride hem de akademide giderek daha yaygın şekilde kullanılmasına ve kabul edilmesine yol açmaktadır. Yöntemin bazı teorik yakınsama özellikleri Rietz [186], Martinez [187] ve Stolpe ve Svanberg [188] tarafından tartışılmıştır. 2007 yılında Sigmund, cezadan bağımsız bir asgari sertlik veya başka bir malzeme parametresi içeren, biraz değiştirilmiş bir SIMP versiyonunun avantajlarını ele almıştır [189]. SIMP yönteminin arkasındaki gerekçeler ve teorik mekanizmalarla ilgili ek referanslar için okuyucu, erken incelemeye (Rozvany 2001a; Eschenauer ve Olhoff 2001) ve forum (Rozvany 2009a) makalelerine ve buradaki referanslara yönlendirilir. SIMP yönteminin arkasındaki gerekçeler ve teorik mekanizmalarla ilgili ek referanslar için de araştırmacılar önceki incelemelere [78, 190], forum makalelerine [69] ve buradaki referanslara yönlendirilmektedir.

2001 yılında Malzeme Özelliklerinin Rasyonel Yaklaşıklığı (RAMP) olarak bilinen alternatif bir interpolasyon şeması önerilmiştir [191]. RAMP modelinde SIMP'den farklı olarak sıfır yoğunlukta sıfır hassasiyete sahip olması beklenmektedir. Sonuç olarak, RAMP ile malzeme modelinin tasarıma bağlı yükleme varlığında çok düşük yoğunluklu değerlerle ilgili problemlerde bazı sayısal zorlukları giderdiği gösterilmiştir. Bir başka interpolasyon şeması olarak sunulmuş olan SINH yönteminin Zhou ve Rozvany (1991) tarafından önerilen maliyet cezalandırma yönteminin tersi olduğu söylenebilmektedir, yöntemde belirtilen maliyet malzeme ağırlığını temsil etmektedir. SIMP'den farklı olarak, SINH sözcüklerin baş harflerinden oluşan bir kısaltma sözcük değildir; bunun yerine, yalnızca hiperbolik sinüs fonksiyonu bulunmaktadır. Bu interpolasyon şemasının diğerlerinden farklı olduğu ifade edilebilmektedir, çünkü genellikle maddi parametreler cezalandırılırken, SINH formülasyonunda söz konusu cezalandırılma hacim üzerine uygulanmaktadır. Dolayısıyla, orta yoğunluklu malzeme, yük taşıma kabiliyetine göre katı veya boş malzemeden daha fazla hacime ihtiyaç duyabilmektedir [192].



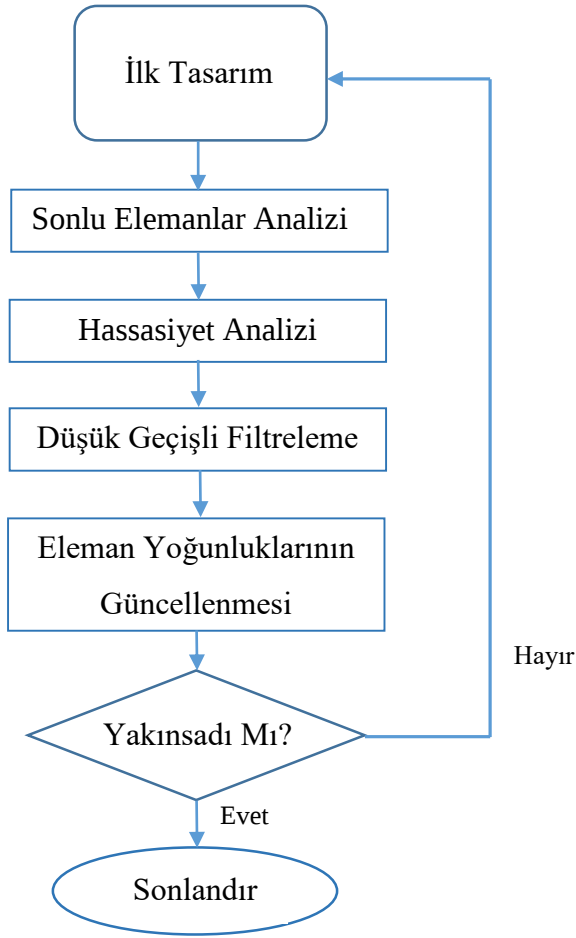
Şekil 3.10. Yoğunluk bazlı topoloji optimizasyon modellerinde ara yoğunluklardaki cezalandırma modellerinin karşılaştırılması; **a)** SIMP: $n(\rho) = \rho^p$, **b)** RAMP: $n(\rho) = \frac{\rho}{1+(1-\rho)^q}$, **c)** SINH: $n_1(\rho) = 1 - \frac{\sinh(p(1-\rho))}{\sinh p}$, $n_2(\rho) = \rho$ [181]

SIMP, RAMP ve SINH ceza şemalarının karşılaştırılması Şekil 3.10.da gösterilmektedir. Şekilde ρ , yoğunluk değişkeni, p , SIMP ve SINH yöntemleri için ceza parametresiyken q ise RAMP için ceza parametresi olarak ifade edilmektedir. Şekilde gösterilen ceza parametreleri, uygulamada kullanılan parametreleri, sorunun altında yatan fiziğe bağlı olarak gerçek değerlerle temsil etmektedir. 2005'te ise Fuchs ve arkadaşları, doğrusal yoğunluklu fonksiyondan ve Karşılıklı Değişkenlerin Toplamı (SRV) olarak adlandırdıkları yeni bir kısıtlamadan katı / boş bir düzen elde etmektedir [193]. Kısıtlama, SRV'nin belirli bir malzeme miktarı için ayrı bir tasarımdaki değerine eşit veya daha büyük olması gerektiğini şart koşturmaktadır. Bu teknik, makaledeki kıyaslama problemlerinde faydalı olduğunu kanıtlamıştır, ancak literatürde daha fazla araştırılması gerekmektedir [181].

Bu yöntemler dışında da önerilmiş olan yöntemler bulunmaktadır. Kesikli ve cezalandırılmış, sürekli katı-boşluk yapısal topoloji sorunları Haber ve arkadaşları tarafından ortaya atılmıştır, dolayısıyla yoğunluk tasarım alanı değişimi burada sınırlandırılmaktadır [194]. Örneğin, çevre kontrolü [194], açık yoğunluk eğimi kısıtlamaları [195], yoğunluk eğimi kısıtlamaları uygulayan adaptif yoğunluk tasarım değişken sınırları [196] düzenli yoğunluk kontrolü [197], MOLE metodu [198] veya bulanıklaştırma filtreleri [199] gibi çeşitli kısıtlama yöntemleri geliştirilmiştir. Çeşitli kısıtlama yöntemleri arasında iyi bir karşılaştırma için Borrvall'ın 2001'deki çalışması önerilmektedir [200]. Sigmund 1994'teki çalışmasında literatürdeki en yaygın yaklaşım olarak bilinen hassasiyetleri filtrelemektedir [199]. Alternatif olarak, doğrudan filtrelenebilir tasarım üzerine çalışmalar da bulunmaktadır [201]. Her iki yaklaşımın da avantajları ve dezavantajları vardır [192].

SIMP'de yapının her sonlu elemanındaki malzeme yoğunluğu tasarım değişkeni olarak değerlendirilmektedir ve optimizasyon işlemi sırasında orta yoğunluk değişkenleri cezalandırılmaktadır. 2001'de Rozvany'nin çalışmasında köken, teorik geçmiş, tarih, geçerlilik aralığı ve SIMP'in başlıca avantajları üzerine bir derleme sağlanmıştır [78]. Homojenizasyon yönteminden farklı olarak, SIMP'te bireysel elemanlar izotropik olarak kabul edilmektedir ve bu nedenle her elemanın tasarım problemini karakterize etmesi için sadece bir tasarım değişkeni gerekmektedir. Sonuç olarak, özellikle bilinmeyen mikroyapı detayları ile çoklu fiziksel, çoklu malzeme / kompozit problemleri için güçlü bir tasarım yöntemi olarak kabul edilmektedir. Sankaranarayanan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yöntemleri eşzamanlı analiz ve tasarım olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem iki boyutlu kafes giriş problemlerinin topolojisini belirlemek için kullanılmıştır [202].

SIMP yönteminin gerekçesi, plaka kalınlığının sıfır veya belirli bir değer (t_0) olduğu düzlem gerilmesinde delikli bir plaka örneği göz önüne alındığında daha kolay bir şekilde anlaşılabilir. Çok sayıda element barındıran bir yapıda olası tüm çözümleri araştırmak için, çok fazla sayıda analiz yapmak zorunda kalınmaktadır ve bu nedenle başlangıçta sürekli değişkenleri olan iterasyonlu yöntemlere başvurulmalıdır. Rossow ve Taylor'un 1973'teki çalışmasıyla beraber, plaka kalınlığının (t 'nin) 0 ve t_0 arasında sürekli değişebileceğini varsayabilmekteyiz [203]. Plakanın mekanik özellikleri hakkında (örneğin, düzlem içi kuvvetler için sertlikler, düzlem içi kuvvetlerin izin verilen değerleri vb.) kalınlığı ile doğrusal orantılı olduğu söylenebilir. Optimallik kriterlerini (OC) veya matematiksel programlama (MP) yöntemini kullanarak yukarıdaki plakanın ağırlığı kolayca minimize edilebilir. Uyumluluk kısıtı için, bu problemin optimumu kolay ve hızlı bir şekilde hesaplanabilmektedir [78].



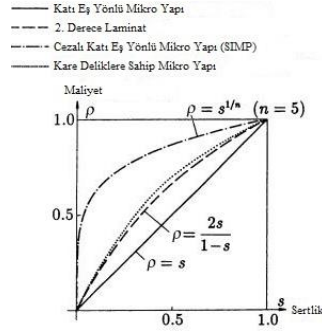
Şekil 3.11. SIMP akış şeması [204]

Burada bulunan sonuçlar için kullanılan çözümlerin her türlü kalınlığı içereceğini belirtirken, ISE topolojilerinde yalnızca sıfır veya t_0 kalınlıklarının elde edilmesi istenmektedir. Ortaya çıkacak 0 istenmeyen sonuçlardaki ara kalınlıklar $0 < t < t_0$ 'a göre gözden geçirilerek cezalandırma tekniğiyle iyileştirilebilmektedir. Normalize edilmiş levha sertliği s (düzlem gerilmede) ve özgül maliyet veya yoğunluk ρ (kalınlık konusunda bahsedilmek istenen ise plaka kalınlığı) arasındaki ilişki Şekil 3.12.de grafiksel olarak gösterilmiştir. Cezalandırılmamış olan ve değişen kalınlığa sahip bir plaka için bu ilişki düz bir çizgiyken, ara kalınlıklar aşağıdaki eşitsizlik kullanılarak cezalandırılabilir.

$$s = \rho^p \quad (2.4)$$

Eşitsizlikteki p 'nin değeri 1'den büyük alınmaktadır. Cezalandırılmamış prosedürde [203] $p=1$ değeri şekilde sürekli çizgide gözlemlenebilmektedir. Cezalandırılmış bağıntının tersi ise $p = 5$ için Şekil 3.12.de çizgi-nokta çizgisi olarak gösterilmiştir. Yukarıdaki ceza etkili

bir şekilde ara kalınlık değerlerini baskılayacaktır, ancak sorun uyumluluk tasarımı için optimumun küreselliği garanti edilememektedir. İterasyonun başlangıcında $p=1$ değeriyle başlanır ve daha sonra bu değer kademeli olarak arttırılırsa sonuçlar genellikle iyileşme yönünde gelişim göstermektedir [78].

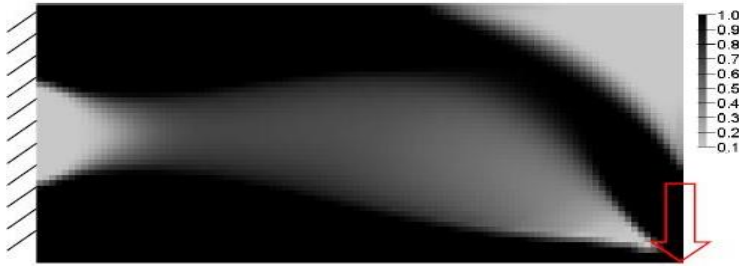


Şekil 3.12. Çeşitli mikro yapılarda sertlik (s) / maliyet veya yoğunluk (ρ) ilişkisi [78]

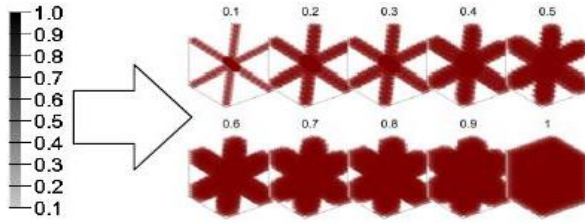
Çizelge 3.1. Şekil optimizasyonunda izotropik katı veya boş (ISE) ya da izotropik katı (IS) topolojileri için kullanılan SIMP yöntemi [78]

SIMP	
Elemanların Mikro Yapısı	Katı, Eş Yönlü
Ek Ceza?	Var
Homojenleştirme Gerekli Mi?	Hayır
Eleman Başına Serbest Parametre Sayısı	1
Kullanılabilirliği	Tasarım Kısıtlamalarının Tüm Kombinasyonlarında
Yeterli Cezalandırma?	Var

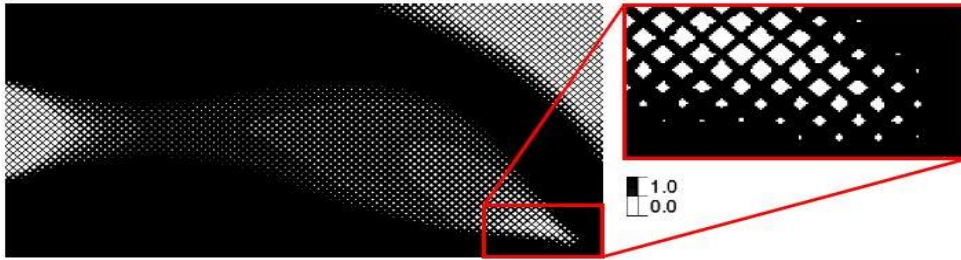
Bazı optimizasyon problemlerinde ise cezalandırma uygulanmadan sonuca gidilmeye çalışılmaktadır. SIMP yöntemindeki “P” harfi cezalandırma anlamına gelmektedir, dolayısıyla cezalandırma uygulanmadan ele alınan yönteme SIM adı verilmektedir. Aşağıda şekil 2.28’de basit bir konsol plakası optimizasyon problemine SIMP yöntemi cezalandırma olmadan uygulanmıştır (SIM) ve bu yüzden beklendiği gibi, ara yoğunluğa sahip geniş bölgeler görünmektedir. Bu bölgelerin düzeltilmesine yönelik ilk yaklaşım, bir sonraki şekilde de görüldüğü üzere, ara yoğunlukları değişen hacimli, bölünmüş kafes hücrelerine haritalamaktır. Gri tonlama sonucunun enterpolasyonu ve her pikselin birim hücreyle yer değiştirilmesiyle, diğer şekilde gösterildiği gibi sürekli bir yapı birleşmesi sağlanabilmektedir [205].



Şekil 3.13 Cezalandırmasız SIMP (SIM) kullanılarak konsol plakası problemi için optimize edilmiş sonuç [205]



Şekil 3.14. Değişken yoğunlukların değişken hacimli kafes birim hücrelerine haritalandırılması [205]



Şekil 3.15. Yoğunluğu birim hücrelere eşleyerek birleştirilen katı ve kafes yapı [205]

Yapısal topoloji optimizasyonu için en yaygın kullanılan metodolojiler, genel olarak İzotropik Malzemelerin Ceza Kombinasyonu (SIMP) yöntemini içeren, yoğunluğa dayalı yöntemler olarak bilinmektedir. Başlarda da bahsedildiği üzere yoğunluğa dayalı yöntemler, her bir ögenin katı malzemeden mi yoksa boşluktan mı oluşması gerektiğini belirleyerek, bir nesnel işlevi en aza indirmeyi amaçlayan sabit bir sonlu elemanlar alanı üzerinde çalışmaktadır. Yapısal topoloji optimizasyonunda, bu amaç genellikle uyumluluk olup, kullanılabilecek malzeme miktarına kısıtlamalar getirilmektedir. Aslında bu durum son derece büyük ölçekli tamsayılı programlama problemi oluşturmaktadır. Ayırık değişkenleri sürekli değişkenlerle değiştirmek ve çözümü ayırık bir katı / boşluk çözümlisine doğru yönlendirmek için bir araç belirlemek istenmektedir. Bu, sürekli tasarım değişkenlerinin her bir elemanının malzeme yoğunluğu olarak yorumlandığı bir enterpolasyon fonksiyonu ile

gerçekleştirilmektedir. Ardından ceza yöntemleri uygun “0/1”, “siyah / beyaz” veya “katı / boş” topolojilere uygun hale getirmek için kullanılabilir. Yoğunluğa dayalı bir topoloji optimizasyon probleminin temel matematiksel ifadesi, bir hedef fonksiyon, bir dizi kısıtlama ve fiziksel sistemin ayrık bir gösterimini içermektedir. Doğrusal statik sonlu elemanlar analizine dayanan genel bir formülasyon aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\text{Minimize} : f(\rho, U) \quad (2.5)$$

$$\text{Kısıtlar} : K(\rho)U = F(\rho)$$

$$g_i(\rho, U) \leq 0$$

$$0 \leq \rho \leq 1$$

Yukarıdaki eşitsizlikte f ; hedef fonksiyonu, ρ ; tasarım değişkenlerinin yoğunluk vektörü, U ; yer değiştirme vektörü, K ; küresel sertlik matrisi, F ; kuvvet vektörü ve g_i ise sınırlamalar olarak gösterilmektedir. Sertlik matrisi K ve bazı durumlarda F yük vektörünün, eleman seviyesindeki yoğunluk tasarım değişkenlerine bağlı olduğu gözlemlenebilmektedir. Bu genelleştirilmiş açıklamada uyumluluk, stres, sıklık, yer değiştirme ve özdeğer problemleri, akışkan akışı ve doğrusal olmayan sistemler gibi çeşitli problemler hedefler ve kısıtlamalar göz önünde bulundurularak formüle edilebilmektedir [181].

Uyumluluk problemi, yapısal uyumluluk hedefini en aza indirerek kurulabilmektedir:

$$f = c = u^T K u \quad (2.1)$$

Eşitsizlikte c ; uyumluluğu göstermektedir, ve madde kullanım miktarı şu şekilde kısıtlanabilmektedir:

$$g = \frac{V}{V_0} - V_f \leq 0 \quad (2.6)$$

V ve V_0 sırasıyla malzeme hacmi ve tasarım alanı hacmidir, V_f ise izin verilen hacim kesri olarak ifade edilmektedir.

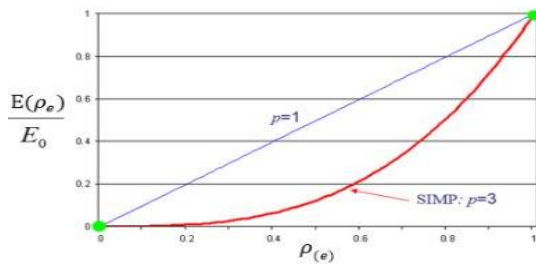
Yoğunluğa dayalı yöntemlerin kritik bir yönü, sürekli tasarım değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak problemin fiziksel niceliklerini ifade etmek için uygun bir enterpolasyon fonksiyonu ve cezalandırma tekniğinin seçilmesi olarak söylenebilmektedir. SIMP’in başlarında da

belirtildiği gibi, yoğunluk temelli topoloji optimizasyonundaki tasarım değişkenlerinin dağılık fonksiyonu, her sonlu elemanın malzeme yoğunluğu (ρ_e) olarak yorumlanmaktadır.

Yoğunluk değerlerinin aralığı $0 \leq \rho_e \leq 1$ ya da $0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1$ olduğunda, 0 boş bir elemana, 1 ise katı bir elemana karşılık gelmektedir ve $\rho_{\min}$ bazı formülasyonlarla önlemek için gerekli minimum yoğunluk değeri olarak ifade edilmektedir. Bu zorluklar, sonlu elemanlar matrislerinde tekilliği ve bazı durumlarda sıfır yoğunluklu bir alanda malzemenin tekrar görünememesiyle ilgili sorunları içermektedir. Parametreleştirmenin seçimi ile sorunu katı / boş bir çözüme yönlendirmek gerekmektedir. Bu noktada, en yaygın yöntem olarak cezalandırma yöntemlerinden İzotropik Malzemelerin Ceza Kombinasyonu (SIMP) (orjinalde Mikro Yapı) olan ceza tekniği kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [181].

Malzeme yoğunluğu sürekli değişebildiğinden, her elemanın Young modülü de sürekli değişebilmektedir. Her e elemanı için malzeme yoğunluk faktörü (ρ_e) ve izotropik malzeme modelinin Young elastikiyet modülü (E_0) arasındaki ilişki güç yasası ile hesaplanmaktadır [206]:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad (2.7)$$



Şekil 3.16. Young elastikiyet modülü ile malzeme yoğunluk faktörü arasındaki ilişki [206]

Ceza faktörü (p), orta yoğunluklu elemanların (gri elemanların) toplam sertliğe katkısını azaltmaktadır. Ceza faktörü, optimizasyon çözümünü katı siyah ($\rho_e = 1$) veya boş beyaz ($\rho_e = \rho_{\min}$) elemanlara yönlendirmektedir. Sayısal deneyler, $p = 3$ ceza faktörü değerinin uygun olduğunu göstermektedir.

Bir elemanın malzeme elastik modülünün azaltılması, eleman sertliğinin azalmasına yol açabilmektedir. SIMP yöntemi için küresel sertlik aşağıdaki eşitsizliğe göre hesaplanabilmektedir:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e \quad (2.8)$$

K_e e elemanın küresel sertlik matrisi, ρ_e e elemanın yoğunluğu, ρ_{min} ise alabileceği minimum yoğunluk olarak ifade edilebilmektedir. Eşitsizlikte kullanılan p ceza faktörünü nitelendirirken, N ile gösterilen de tasarım alanındaki tüm elemanların sayısı olarak söylenebilmektedir. Örneklendirilecek olursa, bir elemanın tanımlanmış yoğunluğu (ρ_e) 0.5 alınıp, cezalandırma faktörü (p) = 3, ρ_{min} ise = 0.001 olarak tanımlanırsa, küresel sertlik matrisi:

$$K = 0.001 + (1 - 0.001) * 0.5^3 \rightarrow 0.12587$$

olarak hesaplanabilmektedir [206].

Optimizasyon hedefi olarak, bir yapının genel rijitliğini en üst düzeye çıkarmak veya belirli miktarda malzemeyi uzaklaştırırken parçanın uyumluluğunu en aza indirmek amaçlanmaktadır. Önceki sayfalarda topoloji metodu bölümünde yoğunluk bazlı optimizasyonlarda da bahsedildiği üzere uyumluluk, bir yapının genel esnekliğinin veya yumuşaklığının bir ölçüsü ve sertliğin tersi olarak tanımlanmaktadır. Küresel uyumluluk elastik elemanların veya gerilme enerjilerinin toplamına eşit çıkmaktadır. Küresel uyumu en aza indirgeyen C, küresel sertliği maksimuma çıkartmaya eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Optimizasyon algoritması, iteratif bir süreç aracılığıyla, yapının küresel uyumluluğunu en aza indiren eleman yoğunluklarını elde etmeye çalışmaktadır.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e] \quad (2.9)$$

u_e e elemanın yer değiştirme vektörünü, K_e e elemanın sertliğini ve ρ ise eleman yoğunluklarını (ρ_e) ifade etmek için kullanılmaktadır.

Her optimizasyon iterasyonunda, hedef kütle kısıtlaması, küresel kuvvet-sertlik dengesi ve diğer gerekli fonksiyonel kısıtlamalar sağlanmalıdır:

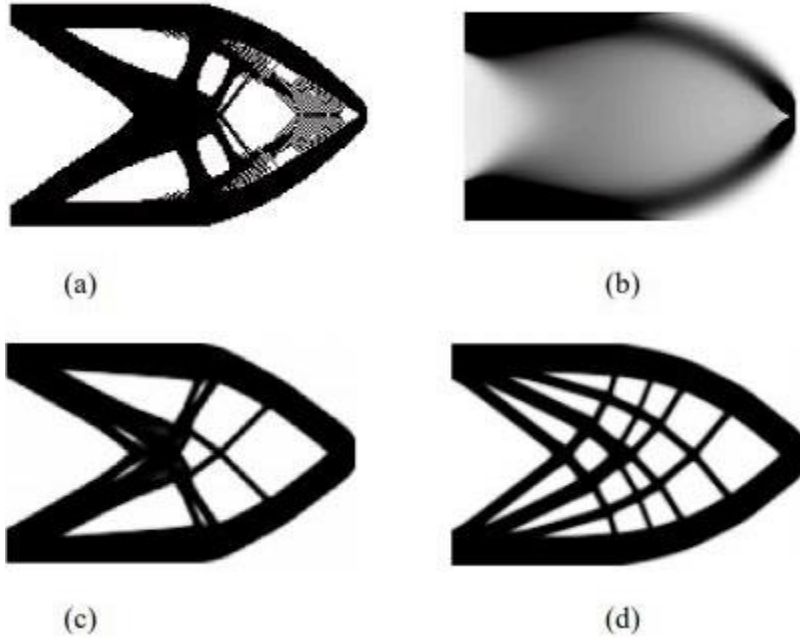
$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{hedef} \quad (2.10)$$

v_e eleman hacmi ve M_{hedef} optimizasyonda hedeflenen kütle olarak gösterilmektedir.

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\} \quad (2.2)$$

$K\{\rho\}$, yoğunluklara göre hesaplanan küresel sertlik matrisi, u yer değiştirme vektörü ve F ise etkileyen dış kuvvet vektörünü ifade etmektedir [206].

Aşağıdaki örnek şekilde farklı başlangıç noktaları ve parametrik değerler için SIMP topolojileri gösterilmektedir. 1 mm'lik düşük bir FR (filtre yarıçapı), dama tahtası düzenini tamamen ortadan kaldırmaya yetmemektedir. Hem FR hem de P (cezalandırma faktörü), 1'de tutulursa, dama tahtası kaybolur, ancak yeterli cezalandırma uygulanmamış orta yoğunluklar bulunduran geniş bir gri bölge gözükmemektedir. SIMP'in en önemli özelliği, TO'yu gri bölgeye sahip olmayan uygulanabilir topolojilere yönlendirmek olsa da, AM'deki orta yoğunluklar için bir yorum olabilmektedir çünkü bu durumda en düşük SE'ye (gerilme enerjisine) sahip olmaktadır. $P = 3$ ve $FR = 1.5$ olduğunda ise şekilde c'de gösterildiği gibi gri bölgeler kaybolmaktadır. Son şekil diğerlerinde olduğu gibi 0.5 yoğunlukla değil rastgele bir başlangıç noktasına sahip yoğunlukla gerçekleştirilmiştir. Önceki şekillerde olduğu gibi d şekline de uygulanan simetrik kısıtlama, plakanın üst yarısının yoğunluk dağılımının alt yarısının bir ayna görüntüsü olmasını sağlamaya zorlanmıştır. Gerilme enerjisi a ve c şekline göre daha düşük elde edilmiştir [204].

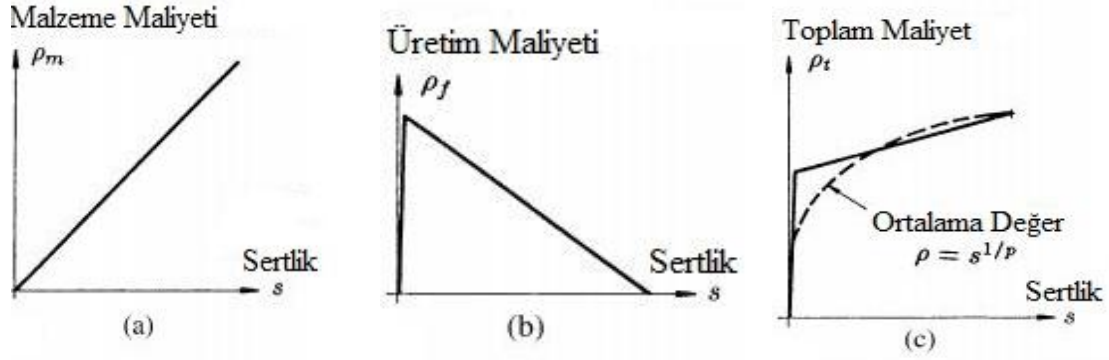


Şekil 3.17. SIMP Topolojileri: a) $P=3$, $FR=1$ mm, $SE=4.0Nmm$, 0.5 başlangıç yoğunluğu b) $P=1$, $FR=1$ mm, $SE=3.3Nmm$, 0.5 başlangıç yoğunluğu c) $P=3$, $FR=1.5$ mm, $SE=3.9Nmm$, 0.5 başlangıç yoğunluğu d) $P=3$, $FR=1.5$ mm, $SE=3.8Nmm$, rastgele yoğunluk başlangıcı

Maliyet boyutunda ise öncelikle Zhou ve Rozvany, boşluklar için bir çeşit kalıp gerektiren bir döküm işlemi gibi düşünülürse, boşlukların ekstra üretim maliyeti için, boşlukların boyutuyla orantılı olarak artacağını ifade etmişlerdir [184]. Bu, AM için doğru değildir, çünkü AM’de üretim maliyeti, parça karmaşıklığından bağımsız olarak ele alınmaktadır [207]. Çoğu ticari TO yazılımı TO için SIMP’i uygulamıştır, dolayısıyla AM’ye uygunlukları hakkında bir takım sorular ortaya çıkmaktadır [204].

SIMP yaklaşımının bağımsız bir türetmesinde, toplam maliyete imalat maliyetlerini (malzeme maliyetlerine ek olarak) dahil ederek $s = \rho^p$ eşitsizliğinin doğruluğunu kanıtlamıştır. Bir yapı için ilk olarak uygulanabilir çözümlere son kalınlıkları veya yoğunlukları ($t = 0$, $t = t_0$) eklenildiği sürece, ara değerler için herhangi bir fiziksel modeli seçebilmektedir. Yukarıdaki değerler arasında sürekli değişen bir plaka seçilerek [203], şekilde a grafiğinde gösterilen ρ_m spesifik malzeme maliyeti elde edilebilmektedir. Sonraki adımda, $0 < t < t_0$ olan elemanların t_0 orjinal kalınlığından giderek inceltildiğinde ortaya çıkan üretim maliyetini gözlemlemişlerdir. Ancak bu adımda, inceltelen malzeme son noktaya geldiğinde sıfır kalınlığa ulaşmaktadır ve elemanlar için üretim maliyeti de doğru orantılı olarak sıfıra düşmektedir. Daha sonra belirli malzeme ve özel üretim maliyetleri üst üste

konularak, ilişkinin yaklaştığı sertlik açısından belirli bir toplam maliyet fonksiyonuna ulaşılabilir [78].



Şekil 3.18. SIMP prosedürünün imalat maliyetleri temelinde doğrulanması [184]

4. LİTERATÜR TARAMASI

Tasarımda eklemeli imalat yaklaşımlarının kullanımı 3B yazıcı teknolojilerinin gelişimi ile birlikte dikkat çekici bir şekilde artış göstermiştir. Bu gelişmelerin ışığında verimin arttırılabilmesi ve zaman, malzeme gibi alanlarda tasarruf sağlanabilmesi için ele alınan optimizasyon çalışmaları giderek yaygınlaşmıştır. Parçaya uygulanacak optimizasyon çalışmaları farklı yöntemlerle incelenebilmektedir. Bu çalışmada incelenen yöntemler hakkında yapılan literatür araştırmaları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.1. Topoloji optimizasyonu yöntemleri

Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri	Referanslar
ESO Yöntemi	Xie ve Steven, 1993 [84]; Xie, Nha Chu, Hira ve Steven, 1996 [208]; Querin, 1997 [98]; Xie, Nha Chu, Hira ve Steven, 1997 [59]; Tanskanen, 2002 [94]; Usluoğulları, 2006 [97]; Özkal ve Uysal, 2010 [209]; Çelik 2017 [210];
BESO Yöntemi	Querin, Steven ve Xie, 1998 [85]; Querin, Young, Steven ve Xie, 2000 [103]; Yang, Xie, Liu, Parks ve Clarkson, 2002 [110]; Huang ve Xie, 2007 [105]; Huang ve Xie, 2010 [104]; Ling, 2012 [112]; Tikenogulları, 2015 [107]; Xia L., Xia Q., Huang ve Xie, 2016 [211];
Homojenizasyon Yöntemi	Bendsøe ve Kikuchi, 1988 [77]; Ma, Kikuchi ve Cheng, 1995 [149]; Allaire, Bonnetier, Francfort ve Jouve, 1997 [118]; Nishiwaki, Frecker, Min ve Kikuchi, 1998 [152]; Hassani ve Hinton, 1998 [116]; Allaire, Jouve, ve Maillot, 2004 [120];
Seviye Seti Yöntemi	Osher ve Sethian, 1988 [156]; Wang, M. Y., Wang X. ve Guo, 2003 [87]; Allaire, Jouve ve Toader, 2004 [88]; Dambrine ve Kateb 2010 [163]; Yamada, Izui, Nishiwaki ve Takezawa, 2010 [171]; Xia, Shi, Liu ve Wang, 2011 [212]; Shu, Wang, Fang, Ma ve Wei, 2011 [213];
SIMP Yöntemi	Bendsøe 1989 [89]; Rozvany, Zhou ve Birker, 1992 [90]; Stolpe ve Svanberg (2001) [191]; Bruns, 2005 [192]; Brackett, Ashcroft ve Hague 2011 [205]; Deaton ve Grandhi, 2014 [181]; Jain, Bankoti ve Saxena, 2015 [214]; Nguyen ve Vignat, 2017 [80]; Gebisa ve Lemu, 2017 [215]; Saadlaoui, Milan, Rossi ve Chabrand, 2017 [216]; Top, Şahin ve Gökçe, 2018 [217]; Top, Gökçe ve Şahin, 2019 [218]; Yaman, 2019 [82];

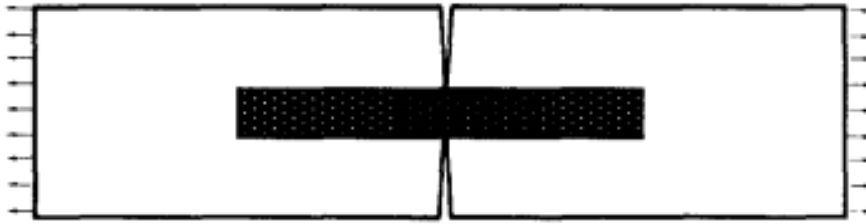
Çizelge 4.2. Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin avantajları

Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri	Avantajlar
ESO Yöntemi	-Konsantre yoğunluk değişkenleri vardır. -Kabul edilebilir enterpolasyon. -Uygulanması daha kolay bir yöntem olarak bilinmektedir. -İyi topolojik sonuçlar vermektedir. -Elde edilen yapılar daha fazla sertliğe sahiptir.
BESO Yöntemi	-Tam tasarım yerine ilk tahmin tasarımından başlanabilirken, hesaplama süresinde önemli ölçüde tasarruf edilebilir. - BESO prosedüründe kullanılan yeni yakınsama kriteri sayesinde ilk tasarımlar ve belirtilen parametre değerlerinin son tasarım üzerinde çok az etkisi vardır, sağlam parçalar elde edilmektedir. -BESO topolojilerinin ölçülmesi ve üretilmesi kolaydır.
Homojenizasyon Yöntemi	-Mikro delikli kompozitlerin kabul edilebilir tasarımlar olmasına izin vermektedir. -Sabit bir ağ üzerinde en uygun şekli yakalayan yeni sayısal algoritmalar oluşturmaktadır. -Optimal şeklin topolojisinde açık veya kapalı bir kısıtlama içermemektedir.
Seviye Seti Yöntemi	-Topolojik olarak esnekler. -3B skaler fonksiyon basit bir topolojiye sahip olacak şekilde tanımlanmaktadır. -Seviye kümeleri, karmaşık yüzey şekillerini kolayca temsil edebilmektedir. -Şekil değişikliklere uğradığı için modeli tekrardan parametrelendirilmeye gerek yoktur. -Modeller çok sayıda serbestlik derecesi içerebilir ve denklemin başlangıç değer problemini oluşturmak için güvenilir ve verimli sayısal teknikler geliştirilmiştir. -Hesaplama karmaşıklığı seviye seti yüzey alanı ile bağlantılıdır.
SIMP Yöntemi	-Kavramsal sadeliğe sahiptir, çünkü algoritma yüksek matematik içeren türevler gerektirmez. -Yüksek hesaplama verimliliği genel tarafından kabul edilmiştir. -Evrimsel yöntemle göre birimdeki bir limitte uyumluluğu minimize ederken çok daha hızlı sonuç elde edilmektedir. -Sorun formülasyonunun seçeneğine bağlı olarak, evrimsel optimizasyonun aksine SIMP yöntemi, topolojide büyük farklılıklar gösteren çözümler sunmaktadır. -Tasarım kısıtlamalarının herhangi bir kombinasyonu için kolayca kullanılabilmesi açısından sağlamlık. -Ceza faktörü ayarlanabilmektedir ve bu nedenle hesaplama açısından optimum ceza kullanılabilir. -Mikroyapının homojenleştirilmesi gerekmez.

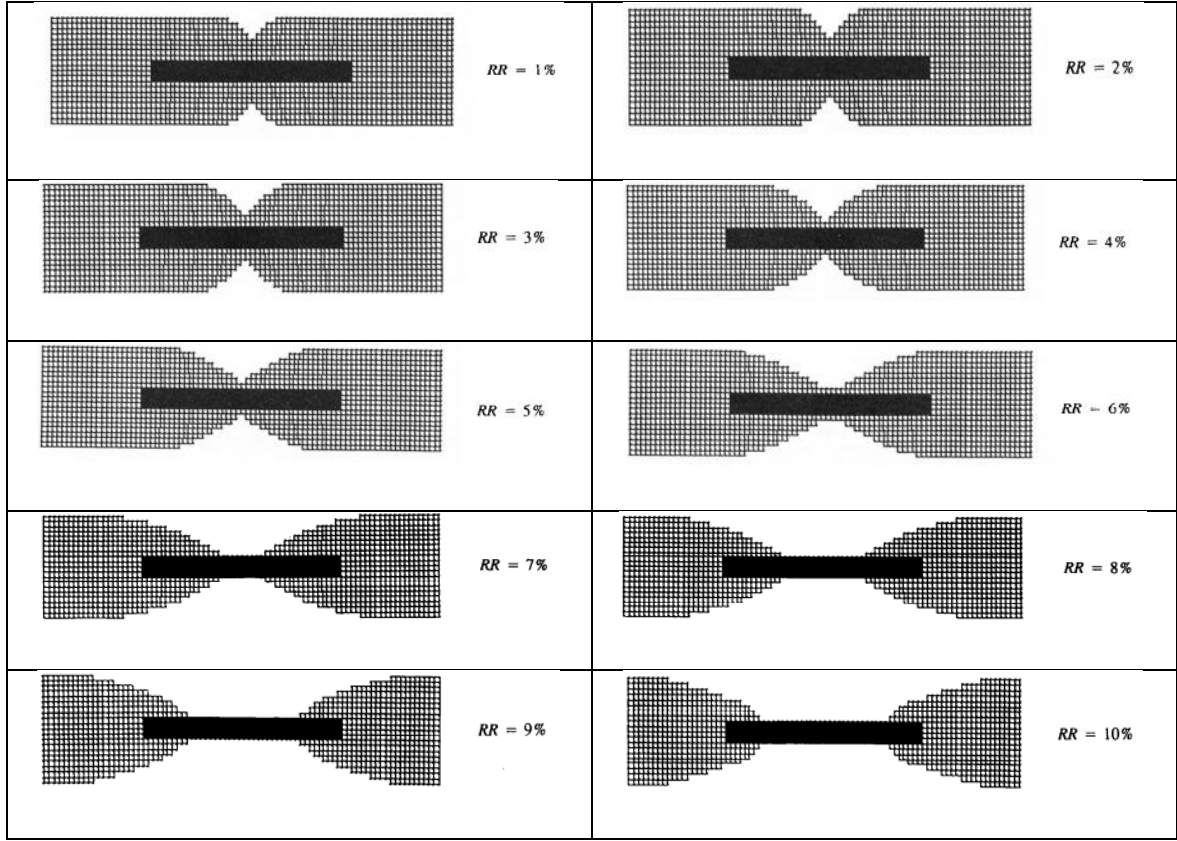
Çizelge 4.1 ve 4.2’de listelenen yöntemler kullanarak yapılan çalışmalar bir sonraki bölümde detaylandırılarak anlatılmıştır.

4.1 ESO Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Xie ve Steven (1993) von Mises stresi gibi bazı red kriterleri (RC) belirleyerek parçadan gereksiz gördükleri bölümleri uzaklaştırmışlardır. Çalışmalarında ele aldıkları yapılardaki elemanlar von Mises geriliminin daha az olduğu yerlerde bir red oranı (RR) ile yapı üzerindeki maksimum von Mises stresine göre elimine edilmektedir. Böyle bir sonlu eleman analizi ve eleman eliminasyonu kararlı bir durum elde edilene kadar RR kullanılarak tekrarlanmaktadır. Kemik kırılmalarının tedavisi için kullanılan metal implant örneğini incelemişlerdir. İki parçaya bölünen kemik modeli 82 x 20 bilinear dörtgen düzlemde ortasından metal implant ile bağlantılanmıştır. Başlangıçta red oranı %1 ve evrimsel oran da yine %1 olarak kabul edilmiştir. 10 farklı red oranıyla (%1-%10) evrimsel optimizasyon gözlemlenmiştir [84].



Şekil 4.1. Kırık kemikte metal implant modeli [84]



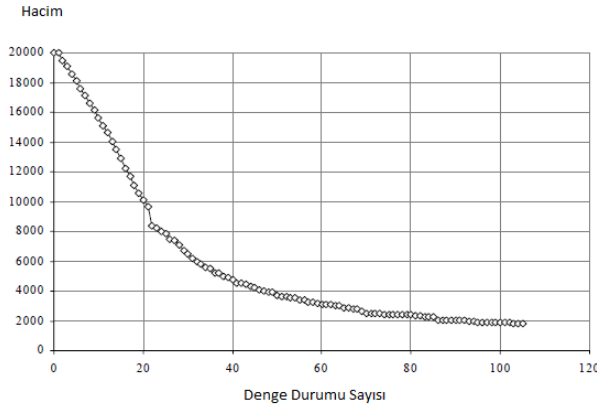
Şekil 4.2. Evrimsel kemik erozyonu öyküsü [84]

Xie, Nha Chu, Hira ve Steven (1996) tarafından yapılan bir çalışmada şekil ve düzen optimizasyonu sorunları için sertlik kısıtlamaları içeren yeni bir ESO gelişimi sunmaktadır. Toplamdaki değişikliği gösteren yeni bir hassasiyet numarası türü, sertlik veya bir elemanın çıkarılmasından kaynaklanan belirli bir yer değiştirme, elde edilen sonuçlar kullanılarak formüle edilmiştir. Sonlu elemanlar ağını kullanarak yapıyı ayırdıktan sonra verilen yükler için yapıyı analiz edip her elemanın hassasiyet sayısını hesaplamışlardır. İşlemlerin ardından en düşük hassasiyet sayılarına sahip elemanlar yapıdan uzaklaştırılmıştır. Sonucunda birden fazla yük durumu ve birden fazla yer değiştirme kısıtlaması olanlar da dahil olmak üzere çeşitli optimizasyon sorunları için duyarlılık sayılarını elde etmişlerdir [208].

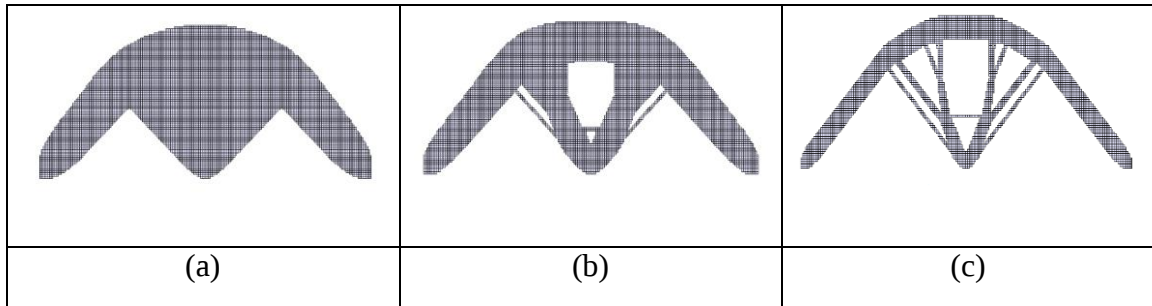
Xie, Nha Chu, Hira ve Steven'in (1997) bir diğer araştırmalarında, eleman çıkarma oranının etkisini incelemek için kullanılacak tek bir yer değiştirme kısıtlamasına tabi olan bir yapı örneği kullanmışlardır. Yapı Airbus uçaklarının yolcu taşıyıcısının gövdesindeki döşemede kullanım için tasarlanmıştır. Yapıdan eleman uzaklaştırarak farklı yer değiştirme sınırları için son tasarımların ağırlık oranları ve uzaklaştırma stratejileri değerlendirilmiştir. Eleman çıkarma oranı %1 ila %4 arasında değiştiğinde, ağırlık ve optimal tasarımın dış şeklinde ufak

değişikliklere neden olmuştur. Çalışma tüm durumlar için optimal tasarımların ağırlıklarının önemli ölçüde azaldığını açıkça göstermektedir [59].

Querin (1997) yazdığı kitapta ESO ile ilgili birçok örneğe yer vermiştir. Bunlardan biri Michell tipi yapıdır. Tasarım alanı, Michell tipi yapı için eşit boyutta plaka elemanlarının 100 x 200 ağ kullanılarak alt bölümlere ayrılmış ve 20000 eleman içermektedir. Performansı belirlemek için kullanılan nominal mesafe indeksi $L = 100$ mm olarak alınırken nominal kuvvet ise $F = 200$ N olarak belirlenmiştir. İterasyonlar sonucu yapının bazı iterasyonlardaki denge durumlarını çalışmasına eklemiştir [98].



Şekil 4.3. Sabit destekli Michell yapısı için hacimsel evrim geçmişi [98]



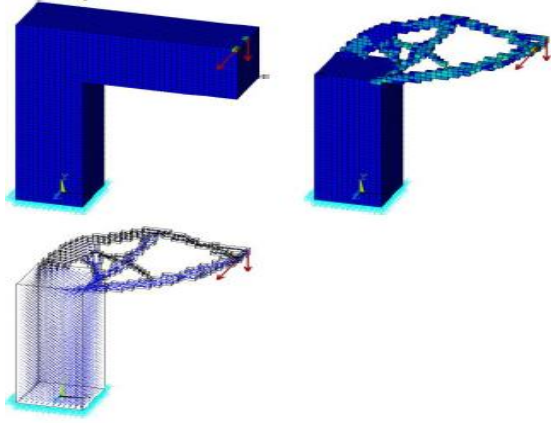
Şekil 4.4. Michell yapısına uygulanan çeşitli iterasyonlardaki denge durumunun optimal topolojisi a) 21. iterasyon b) 28. iterasyon c) 55. iterasyon [98]

Tanskanen (2002) yayınladığı çalışmasında ESO yönteminin teorik arka planından bahsetmiştir. Tanskanen'e göre bazı diğer bilim insanları tarafından sadece sezgisel bir yaklaşım olarak nitelendirilen ESO'nun aslında gerçekte teorik temele sahip olduğunu aktarmaya çalışmıştır. Uygulanmasının kolay olduğundan bahsettiği evrimsel yapı optimizasyonunda sonuçların tam gerilimli topolojiler gibi hacime bağlı olarak maksimum

sertliğe sahip kafes kirişlere yaklaştığından bahsetmektedir. ESO topolojisinin tasarım değişkenleri ise kısıtlamalar ihlal edilmeyecek şekilde ölçeklendirilebilir. ESO, kafes benzeri yapılar üretme eğiliminde olduğundan, bu yöntemi, menteşeli derzleri olan yapısal problemlere uygulamanın daha doğru olacağını önermektedir [94].

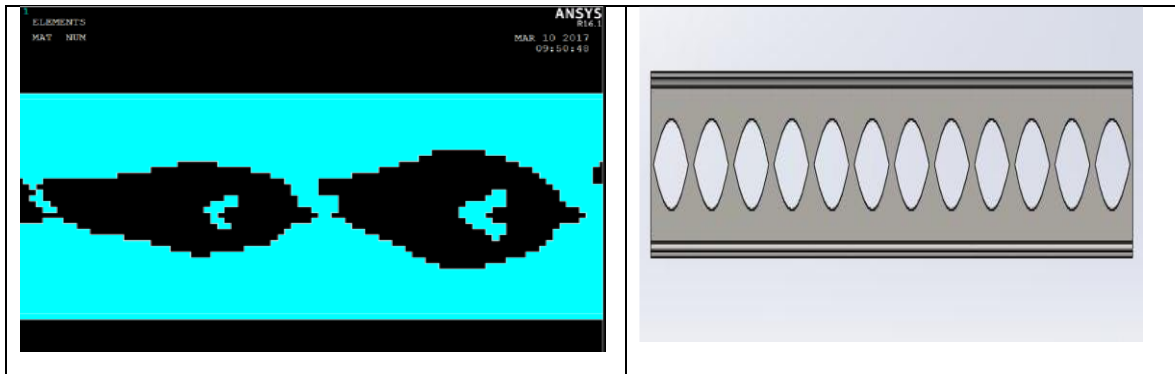
Usluoğulları (2006) yapısal dizaynın, malzeme kullanımını nasıl etkilediğini göstermek için karmaşık matematiksel ifadelerle girmeden bir örnekle ESO'yu açıklamaya çalışmıştır. İki çubuklu çerçeve yapı örneğinde Fortran diline benzeyen algoritmalarla sahip ANSYS batch komutları kullanarak optimizasyon sürecini gerçekleştirmiştir. İterasyon sayısı ve başlangıç çıkarma oranını sabit tutulurken, evrimsel oran ER ise nihai çıkarma oranına göre değişim göstermiştir. Çıkarma oranı artırıldığı zaman ise başlangıçta düz bir dizayn alanına sahipken, optimizasyon sonucunda iki-çubuklu kafes sistem elde edilmiştir. Başlangıç modelini ile optimum modelin gerilmesini karşılaştıran Usluoğulları yaklaşık %12'lik bir artış gözlemlemişken, bu yapılar arasındaki hacim farkında %98'lik bir azalma elde etmiştir [97].

Özkal ve Uysal (2010) araştırmalarında ilk olarak optimizasyon parametrelerini belirlemiş ve tasarım değişkenleri olarak sonlu elemanlar ağındaki elemanların elastisite modüllerini tanımlamışlardır. Gerilme analizi için kullandıkları ANSYS programında iterasyonla her bir elemanın maruz kaldığı von Mises gerilmelerini bir dosyaya aktararak azami ve asgari gerilme değerlerini hesaplamış ve belirtilen parametrelere göre eleman çıkarma işlemi gerçekleştirmişlerdir. İnceledikleri problemlerinde bir kolon üzerine oturan 2,0x0,6x0,8m boyutlarındaki konsol bir kiriş seçmiş olup optimizasyon işlemini sadece kirişe uygulamışlardır. Kirişin uç kısmında ortadan dikey ve köşeden yatay tekil yükler uygulanarak en uygun tasarım aranmıştır. 228 iterasyon sonucunda en uygun tasarıma ulaşılmış olup yapıdaki gerilme dağılımı elde edilirken, en uygun tasarıma ait çekme (siyah) ve basınç (mavi) gerilmelerinin vektörsel gösterimi de program üzerinden elde edilen görüntülerle aktarılmıştır. Von Mises gerilmelerini referans alarak ağırlığı azaltacak şekilde eleman kaldırma fikriyle çalışan bir topoloji optimizasyonu yöntemi olan ESO'nun ilerleyen yıllardaki çalışmalarla dinamik, çoklu yükleme ve mesnet koşulları altındaki yapıların da çözümünün yapılabildiğini, yapı davranışını etkileyen bütün parametreler evrimsel algoritmaya dahil edilebildiğini dile getirmişlerdir [209].



Şekil 4.5. Yapının başlangıç ve optimizasyon sonucu ulaşılan en uygun tasarımları [209]

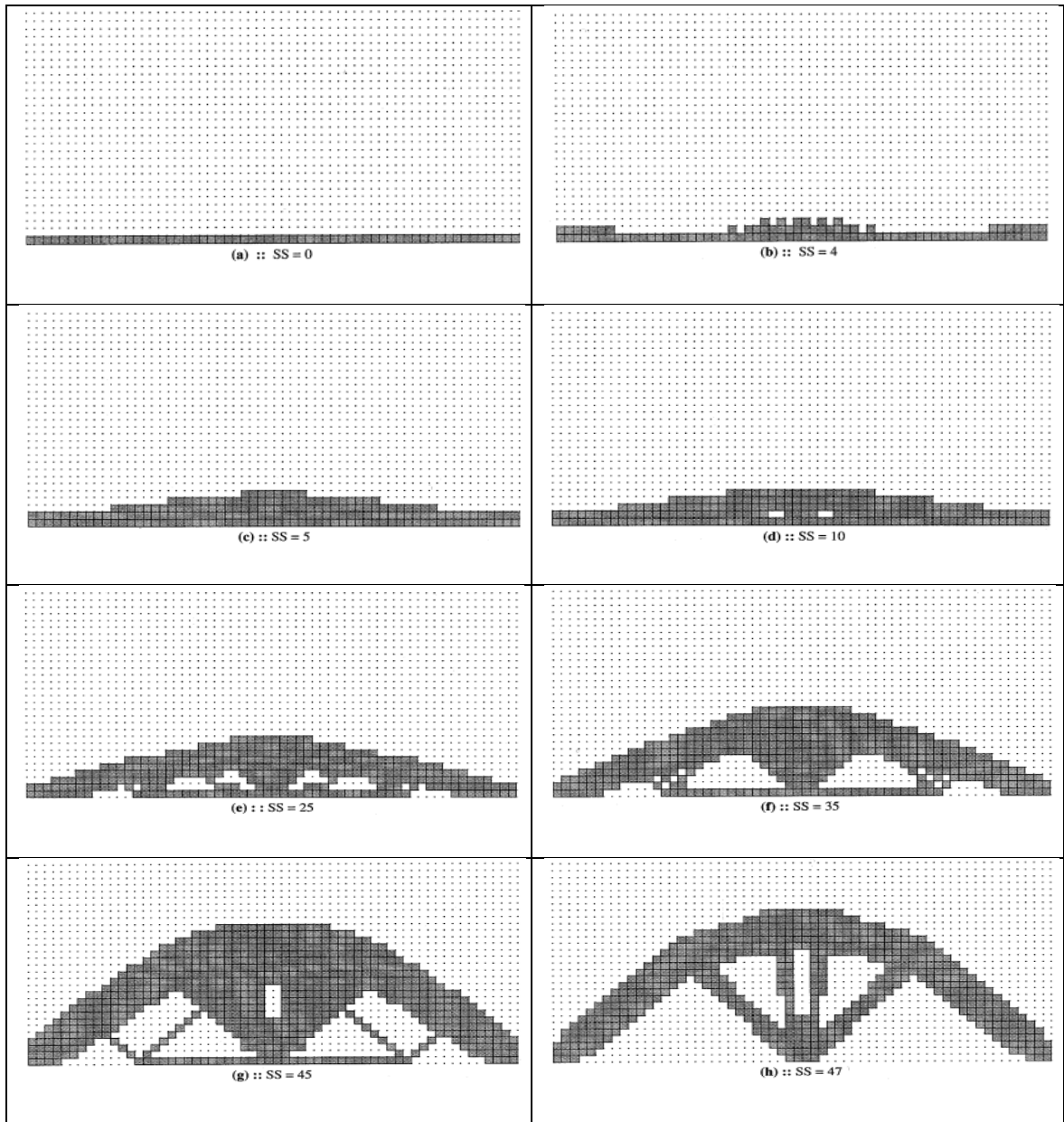
Çelik'in (2017) ise petek kirişlerin optimizasyonu çalışmasında evrimsel topoloji optimizasyon algoritmasını gerilme değeri bazlı bir algoritma olarak ele almıştır. Çalışmada yapı sektöründeki birçok çalışmada olduğu gibi elemanın hafifletilmesi ve de rijitliğin artırılması evrimsel topolojik optimizasyon algoritmasının temel hedefidir. Çelik alaşımından imal edilmiş I profilili yapıda deplasman ve bunun gibi fonksiyonların hesaplanması için sonu elemanlar yöntemi ile analizi uygulamıştır. Analiz sonrasında evrimsel topoloji optimizasyon algoritması çalıştırılmasıyla ANSYS programında optimal göz boşluğu geometrisi elde etmiştir (Şekil 4.6.). Boyutlandırmayı ise MS Excel programında hesaplayarak ulaştığı sonuçlarla birlikte Solidworks programında modellemiştir. Sonuçları karşılaştırıldığında optimal petek kirişin diğer kirişlerden nispeten daha rijit bir yapı sergilediğini, piyasada yaygın olarak kullanılan kirişlere göre boy/ağırlık oranının düşük olduğunu, yapılardaki diğer kirişlere göre yük/ağırlık oranının yüksek olduğunu yani en düşük ağırlıkla en çok yükü taşıyabileceğini gözlemlemiştir [210].



Şekil 4.6. Elde edilen optimal göz boşluğu geometrisi ve veriler ışığında modellenmesi [210]

4.2 BESO Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Querin, Steven ve Xie (1998) çalışmalarında BESO metodu optimizasyonunun gereken yere malzeme ekleyerek veya gerektiği yerde yapının gereksiz unsurlarını kaldırarak gerçekleştiğinden bahsetmişlerdir. Örneklerinde BESO'nun kendi kendini geliştiren veya kendi tasarlayan bir yapı oluşturma kabiliyetini evrim süreçleriyle göstermişlerdir. BESO süreci artık minimum sonlu elemanlar analizi döngüsüyle yapısal bir form geliştirebileceğimizi anlatmaktadır [85].



Şekil 4.7. BESO yöntemiyle iterasyonlar sonucunda malzeme eklenip veya gereken yerde gereksiz unsurlar uzaklaştırılarak tasarlanan bir yapı [85]

Querin, Young, Steven ve Xie (2000) hazırladıkları çalışmalarında BESO'nun metodolojisi hakkında açıklamalarda bulunmuştur. Bunlardan bazılarına değinilecek olursa, ilk olarak yapının kaplayabileceği izin verilen maksimum alan belirtilmelidir. Bunun dışında fiziksel alan yoğun nüfuslu düzenli sonlu eleman ağına bölünmelidir ve tüm kinematik sınır kısıtları, yükleri ve malzeme özellikleri tanımlanmalıdır. Ayrıca tasarımcıdan yükleri desteklere bağlayan en az sayıda elemanın belirlenmesi ya da izin verilen maksimum etki alanına uyan bir başlangıç tasarım etki alanı belirlenmesi arasında bir seçim yapması istendiği söylenmektedir. Başlangıç alanında bulunmayan elemanlar sıfır değerini almaktadır ve de etki alanında bulunan elemanlar için sonlu elemanlar çözümü olması gerekmektedir. Son olarak optimizasyon kriterinin belirtilmesi gerekmektedir (Örn. von Mises gerilmesi). Querin, Young, Steven ve Xie çalışmalarında 2 boyutlu örnekler ve Michell tipi yapı ve 3 boyutlu bazı örnekler incelemişlerdir [103].

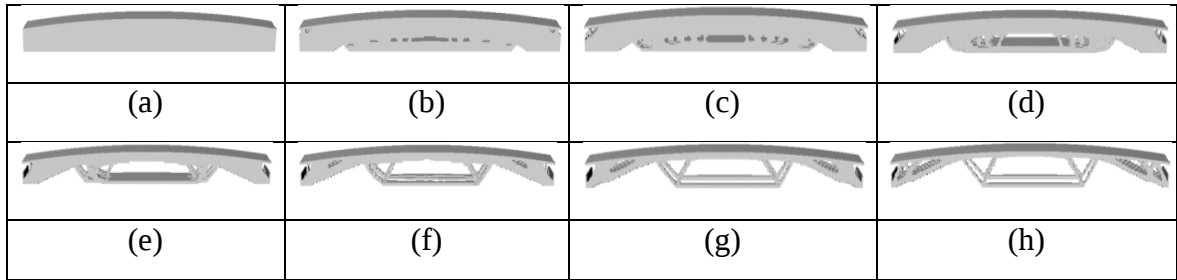
Yang, Xie, Liu, Parks ve Clarkson (2002) yayınladıkları makalede, yapısal çevre üzerindeki bir kısıtlamayı karşılamak ve böylece bu boyut etkisi problemini çözmek için optimizasyon sürecini kontrol etme araçlarını içeren geliştirilmiş bir BESO metodolojisi sunmuşlardır. Sayısal testler, sonlu elemanların ayrıklaştırılmasının farklı seviyelerinde üç örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Özellikle çevre sınırları yeterince düşük olduğunda, ağ iyileştirmede yakınsak çözümler elde edilir. Daha az ve daha büyük yapısal üyelerden ve deliklerden oluşan basit topolojiler, daha kısıtlayıcı bir koşul uygulandığında oluşmaktadır. Bu nedenle BESO'nun çevre kontrolü ile birleştirilmesinin ağ bağımlılığını baskılayabildiği ve optimizasyon problemleri için yapısal karmaşıklığı kontrol edebileceği sonucuna varılmıştır [110].

Huang ve Xie (2007) BESO ile ilgili yaptıkları çalışmada BESO'nun değiştirilmiş ve geliştirilmiş yanlarından bahsederken, yeni bir tasarımdaki elemanları kaldırıp eklemekten önce, sonraki iterasyon için hedef hacmin verilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Üzerinde durdukları ilk örnekte ise konsantre bir yük altında konsol kirişinin sertlik optimizasyonu tasarımı ele alınmıştır. Diğer örneklerde de ilk örnekte olduğu gibi BESO yönteminin özellikleri kullanılarak tasarımdan başlayıp yakınsak, dama tahtasız ve ağa bağımsız bir çözüm elde etmek kolaylaşmaktadır [105].

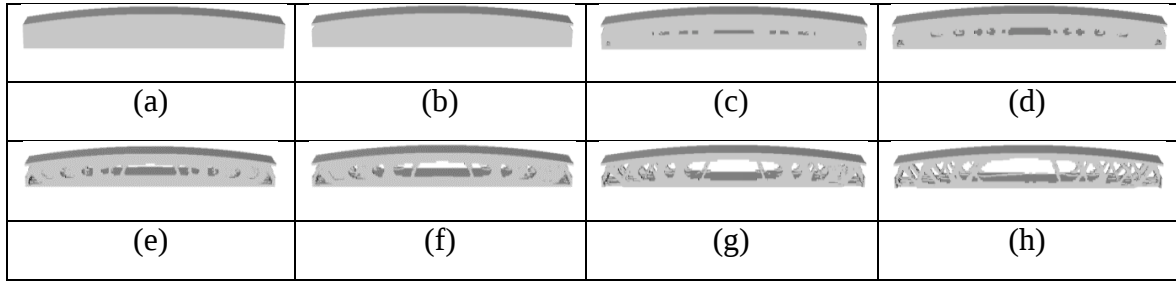
Huang ve Xie (2010) BESO yumuşak öldürme yöntemiyle ESO ve SIMP gibi topolojik optimizasyon yöntemlerini karşılaştırmıştır. ESO ile karşılaştırıldığında, yumuşak öldürme

BESO ve SIMP yöntemleri daha karardır ve yumuşak öldürme BESO yönteminde nispeten ince bir ağın gerekli olmasına rağmen kullanılan parametrelere daha az bağımlı oldukları ifade edilebilmektedir. Ceza üssü p yeterince büyük olduğu sürece, hem yumuşak öldürme BESO hem de SIMP yöntemleri optimallik kriterleri çerçevesinde doğru sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. BESO ağdan bağımsızlık filtresi, dama tahtası ve ağa bağımlılık gibi sayısal kararsızlıklardan kaçınmak içindir ve SIMP ile benzer şekilde çalışmaktadır [104].

Ling (2012) tez çalışmasında iki yönlü evrimsel yapı optimizasyon tekniğinin (BESO) çeşitli uygulamalarını incelemiştir ve geçici dinamik yüklemeye sahip yapısal optimizasyon problemlerine BESO yönteminin etkisini araştırmıştır. Çalışmada yapılması hedeflenen yaya köprüsü tasarımı için 2 farklı red oranı belirlemiş olup bunlardan birincisi 0.90 iken ikincisi ise 0.80 olarak kabul etmiştir. Abaqus programında tasarım alanında oluşturduğu sonlu elemanlar analizine göre modeli tasarlayıp CAD programlarından Rhinoceros'a aktarmıştır. İlk red oranına göre bazı iterasyon görüntülerini koyduğu çalışmasında 140. döngüde optimum tasarımı elde etmiştir (Şekil 4.8.). Şekil 4.9.'da da görüldüğu üzere ikinci red oranıyla ele aldığında 77. iterasyonda optimum yaya köprüsü tasarımı ortaya çıkmıştır. İki farklı red oranlarının sonucunda ve köprünün sabitleme özelliklerindeki farklılıklardan dolayı elde edilen yaya köprüsü tasarımları birbirinden farklıdır [112].



Şekil 4.8. Her iki ucun da sabit olduğu yaya köprüsünün evrimsel süreci (a) Başlangıç tasarımı; (b) 5. iterasyon; (c) 20. iterasyon; (d) 30. iterasyon; (e) 40. iterasyon; (f) 60. iterasyon; (g) 100. iterasyon; (h) 140. iterasyon [112]



Şekil 4.9. Bir ucu sabit diğeri ise iskeleye destekli uç silindirik yaya köprüsü evrimsel süreci
 (a) Başlangıç tasarımı; (b) 1. iterasyon; (c) 5. iterasyon; (d) 10. iterasyon; (e) 30.
 iterasyon; (f) 40. iterasyon; (g) 60. iterasyon; (h) 77. İterasyon [112]

Tikenogulları (2015) tez çalışmasında ayrık tasarım parametrelerinin bulunduğu ve 0 veya 1 değerini alabilen BESO sert öldürme yöntemini kullanılmıştır. Bu yüzden çalışmada ara elemanlar yani gri bölgeler gözlemlenememektedir. Bir problemde BESO yönteminin performans değerlendirmesi için, türbin diskinin iyileştirmesi incelenmiştir. İç bölgenin topolojisi tamamen kısıtlarla tanımlandığı için optimizasyon bu bölgede etkisizdir. Hedef fonksiyonun gelişimi incelendiğinde, yumuşak bir eğilim içinde olduğu söylenebilmektedir ancak evrimleşme devam ettikçe hedef fonksiyon dikleşir, bu da sonraki adımlarda sertliğin daha fazla azalacağı anlamına gelmektedir. Böylece sertliğin düşmesi kadar hacmin azalması eş zamanlı devam edecektir. 102 iterasyon sonucunda problemin optimizasyonu sağlanmıştır. Ayrıca Tikenogulları yapıdaki kararlılığın, evrimsel oran, ortalama hassasiyet ağırlıkları ve hassasiyet yarıçapı filtreleme gibi diğer optimizasyon parametrelerine de bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle, BESO yönteminden en iyi şekilde yararlanmak için optimizasyon parametrelerine özellikle dikkat edilmelidir [107].

Xia L., Xia Q., Huang ve Xie (2018) BESO'nun sert öldürme ve yumuşak öldürme yöntemlerinden bahsetmişlerdir. Geleneksel BESO yönteminin “sert öldürme” olarak bilindiğinden bahsedilmektedir ve yöntem verimsiz elemanların tamamen çıkarılması olarak tanımlanmıştır. Sert öldürmenin en önemli avantajı olarak hesaplama süresinin ciddi boyutlarda azalması gösterilmektedir. Yumuşak öldürme BESO yapay malzeme enterpolasyon şeması kullandığından yöntem olarak SIMP modelindeki cezalandırma ile iyileştirmeye benzetilmektedir. BESO uygulamaları hakkında üç kategoriye değinilmiştir:

İleri düzeyde yapı tasarımları:

- Birden fazla malzemede sertlik optimizasyonu
- Yer değiştirme ile ilgili yapısal tasarımlar
- Tasarıma bağlı yapısal tasarımlar
- Yapısal doğal frekans tasarımı
- Doğrusal olmayan yapıların tasarımı
- Periyodik yapıların tasarımı
- Yer altı kazılarının güçlendirme tasarımı

Malzeme mikroyapılarının tasarımları:

- Malzeme topolojisi tasarımı
- Olağanüstü özelliklere sahip malzemelerin tasarımı
- Eş yönlü ve eş yönsüz malzemelerin tasarımı
- Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin tasarımı
- Fotonik-fononik kuşak aralığı tasarımı
- Multifizik malzemelerin tasarımı

Çok ölçekli eş zamanlı yapıların tasarımı

- Çok ölçekli doğrusal olmayan yapıların tasarımı
- Yapısal performans için malzeme tasarımı
- Yapıların ve malzemelerin eş zamanlı tasarımı
- Diğer eş zamanlı tasarımlar

BESO yöntemi yukarıdaki çeşitli tasarım problemleri üzerinde yüksek etkiye sahiptir [211].

4.3. Homojenizasyon Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Bendsøe ve Kikuchi (1988) yayınladıkları çalışmada plaka tasarım sorununun bir boyutlandırma sorunu olduğunu, burulma çubuğu sorununun ise şekil tasarım problemi olduğundan bahsetmişlerdir. Bu da aslında zayıf bir malzemenin güçlü bir malzemeye dahil edilmesiyle alakalı olarak ifade edilebilmektedir. Her iki durumda da lamine edilmiş yapılar

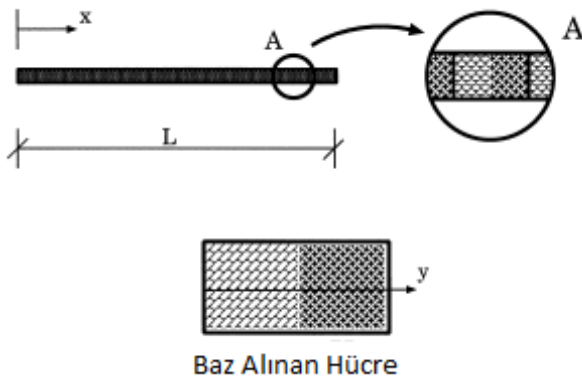
daha verimli tasarımlar verir ve bu nedenle mikroyapılardan en güçlü yapıların elde edilmesi beklenmektedir. Bu, etkili mikroyapıları olan malzeme özelliklerinin hesaplanması için tutarlı bir yol gerektirmektedir ve bu homojenizasyon yöntemi kullanılarak kolayca yapılabilmektedir. Anlaşıldığı üzere mikroyapılı malzemelerin incelenmesi yapıların optimum tasarımı ile yakından bağlantılı olarak ifade edilebilmektedir ve kompozitler için etkin malzeme özelliklerinin optimal sınırlarını bulmakta çok önemli rol oynamaktadır. Çalışmada homojenizasyon yöntemi için net bir tanım olarak, sonsuz sayıda küçük deliklere sahip bir kompozit malzeme için mikroskobik boşluklarda etkili özelliklerinin belirlenmiş bir alan için optimal dağılımını hesaplamamızı sağladığı söylenmektedir. Ayrıca Bendsøe ve Kikuchi belirli bir hacimdeki malzemeye uyumluluğu en aza indirmek için problem formülasyonunu incelemişlerdir [77].

Ma, Kikuchi ve Cheng (1995) makalelerinde homojenizasyon yönteminin temel fikri olarak değişken mikro yapıya sahip bir kompozit malzemenin optimum malzeme dağılımını (OMD) elde etme olduğunu belirtmişlerdir [149].

Allaire, Bonnetier, Francfort ve Jouve'un (1997) incelemelerinde homojenizasyon yönteminin şekil optimizasyonu için optimallik koşulları sağlanmış tasarımlar elde etmekte öneminin diğer var olan teoremlere göre giderek arttığından bahsetmişlerdir. Malzemenin hedef fonksiyonunu geliştirmek için malzemeyi hareket ettirerek ve yönlendirerek topoloji, şekil ve boyut olarak en uygun düzeni veren bir OMD elde edilebilmektedir. Optimizasyonun iterasyon döngüsünde 4 ana adım bulunduğu bahseden Allaire, Bonnetier, Francfort ve Jouve, bunların ilki ile ilgili homojenizasyon yöntemi ile tasarım modelinin homojenizasyon katsayılarını hesaplamışlardır. Sonra durum denklemi çözülüp hedef fonksiyonu hesaplanmaktadır. Yakınsama ölçütleri karşılanıyorsa, işlem burada durdurulur. Aksi takdirde ise duyarlılık analizi yapılabilir. Son olarak tasarım değişkenleri bir optimallik kriteri yöntemi kullanarak güncellenmektedir [118].

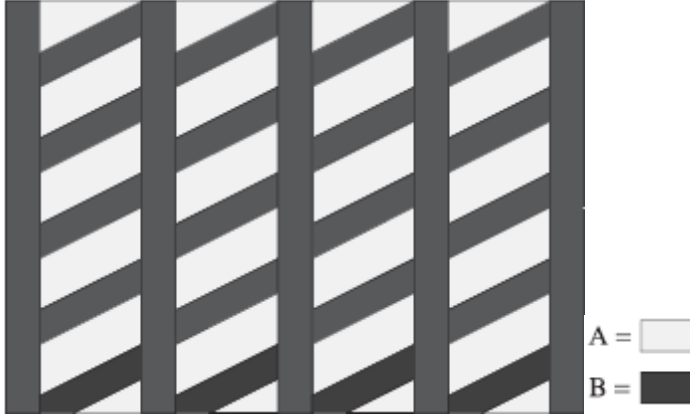
Nishiwaki, Frecker, Min ve Kikuchi (1998) yayınladıkları araştırmada ağ boyutunun etkisini bir örnekle açıklamak istemişlerdir. Ağ elemanları düzgün bir şekilde dağıtılmış ve diğer koşullar da sabit tutulmuşken optimal topoloji yapılandırmasının benzersizliğini doğrulamayı örnek üzerinde göstermişlerdir. Ayrıca hacim kısıtlamasının etkisi üzerine de bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan malzemelerin ortak uyumluluğunun yapıların esnekliğini formüle etmek için kullanıldığını aktarmışlardır [152].

Hassani ve Hinton (1998) homojenizasyon yöntemi teorisinin periyodik bir mikroyapı sahip kompleks malzemelerde etkili kurucu parametrelerinin hesaplanmasını amaçlamışlardır. Tek boyutlu esneklik sorunuyla ilgili bir problemi homojenizasyon yöntemiyle çözüme ulaştırmışlardır. Homojenizasyon yöntemini açıklığa kavuşturmak için, basit ve homojen olmayan bir çubuğun boyuna yönde deformasyonunun hesaplanması durumu dikkate alınmıştır. Homojen olmayan birim hücre miktarların büyüklüğüne bağımlılığı komut dosyası ile tanımlanmıştır. Ayrıca Hooke'un doğrusal esneklik yasası ve Cauchy'nin hareketin ilk yasası formüllerinden faydalanılmıştır [116].



Şekil 4.10. Bir kompozit çubuğun homojenizasyon yöntemiyle incelenmesi [116]

Allaire, Jouve ve Maillot (2004) homojenizasyon metodu için teori ve sayısal uygulama, çoğunlukla uyumluluk, öz frekans veya yer değiştirme alanı optimizasyonu ile sınırlı olduğundan bahsetmiştir. Ana sorun, optimal mikro yapılar için depolanmış elastik enerjili özel hedef fonksiyonlar ile ilgili olmasıdır. Ancak bu zorluğun, bir alt sınıfla çalışarak hafifletilebileceğinden bahsedilmektedir. En basit sınıf, tamamen açık homojenleştirilmiş özelliklere sahip olan sıralı lamine kompozitlerin sınıfı olarak tarif edilmektedir. Çalışmanın amacını sayısal bir bakış açısıyla, homojenizasyon yönteminin hedef fonksiyona bağlı olarak minimum stres tasarımını elde edebilmek olarak ifade etmişlerdir. Yani lamine mikroyapıların kullanımı için problemi kısmi olarak gevşetebilmek hedef olarak alınmıştır. Bilinen homojenizasyon yöntemi ile kıyaslanıldığında, gerilme tensörünün mikroskopik dalgalanmalardan dolayı ek bir zorluk ortaya çıkmaktadır. Araştırmalarında değindikleri örnekte güçlü bir malzeme ile ve zayıf bir malzemenin iki aşamalı optimizasyon problemini formülize etmişlerdir [120].



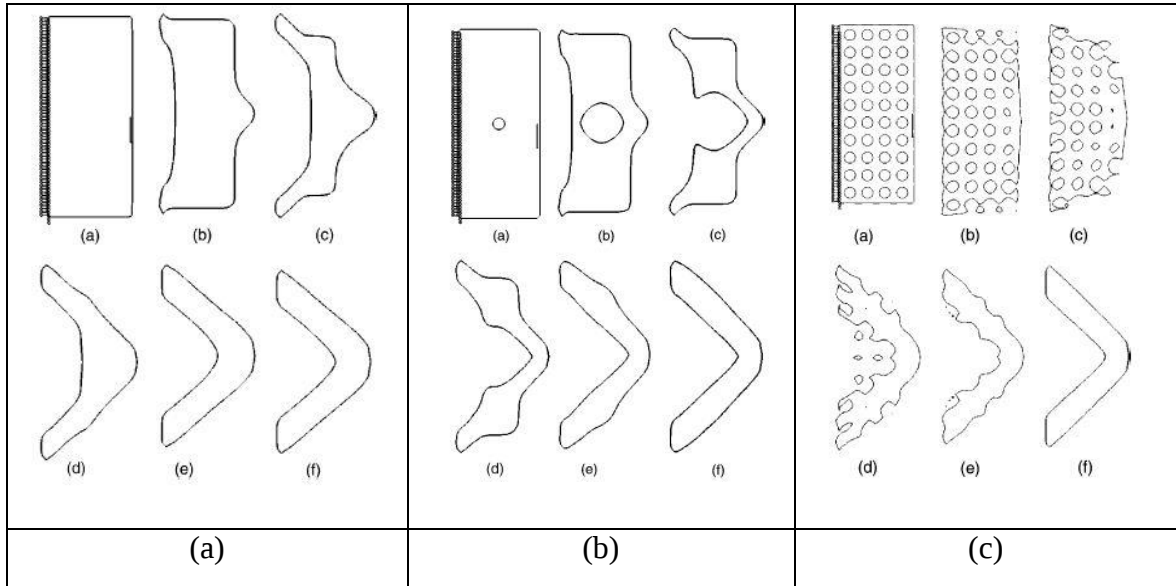
Şekil 4.11. A ve B malzemesinden oluşan sıralı lamine kompozit yapısı [120]

4.4. Seviye Seti Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Osher ve Sethian (1988) makalelerinde eğriliğe bağlı hızın bir ön ilerletme için doğru hareket denkleminin formülasyonunu ele almışlardır. Bu denklem bir başlangıç değeri olan Hamilton-Jacobi denkleminde eğrilik etkileri incelenmektedir. Eğrilik etkileri olarak sağ tarafın sınırının sıfıra gitmesi, entropi koşullarıyla ilişkili bir şekil denklemi olduğunu göstermektedir. Yüzeyi seviye seti yöntemiyle inceleyerek, topolojik karmaşıklıklar ve hareketli cephedeki değişiklikler ele alınmıştır. Temel olarak denklemlerle, hiperbolik koruma yasalarının çözümü için geliştirilen teknoloji kullanılarak, birçok sayısal algoritma rastgele doğruluk derecesinde tasarlanabilmektedir. Algoritmalar, hiperbolik korunum yasalarının yaklaşım teknikleri ile Hamilton-Jacobi denklemlerinin viskoz terimlerle sayısal olarak çözülmesine dayandırılmıştır [156].

Wang M.Y., Wang X. ve Guo (2003) makalelerinde o dönem için yapısal topoloji optimizasyonunda yeni bir yaklaşım olarak kabul edildiği belirtilen ve yapısal sınırı daha yüksek bir boyutun skaler fonksiyonuna gömülü seviye seti modelini incelemektedirler. Bu seviye seti modelleri karmaşık topolojik değişikliklerin kullanımında esnektir ve yapının sınır şeklini tanımlamak için önemli rol oynamaktadırlar. Topolojik değişikliklerin ele alınmasında olağanüstü esneklik gösteren bir 3 boyutlu topoloji optimizasyon tekniği sayılan seviye seti yöntemi, sınır temsiline uygunluk ve otomasyon derecesi ile iyileştirme problemlerinde tercih edilmektedir. Tasarımdan hedeflenen ve belirli kısıtlamalar içeren doğrusal elastik yapıları optimize etmek için kullanılmıştır. Ayrıca yöntemde, optimizasyon altındaki yapı dolaylı olarak daha yüksek boyutluluğa sahip bir skaler fonksiyona (seviye seti fonksiyonu) gömülü, hareketli bir sınır ile temsil edilmektedir. Çalışmada seviye seti

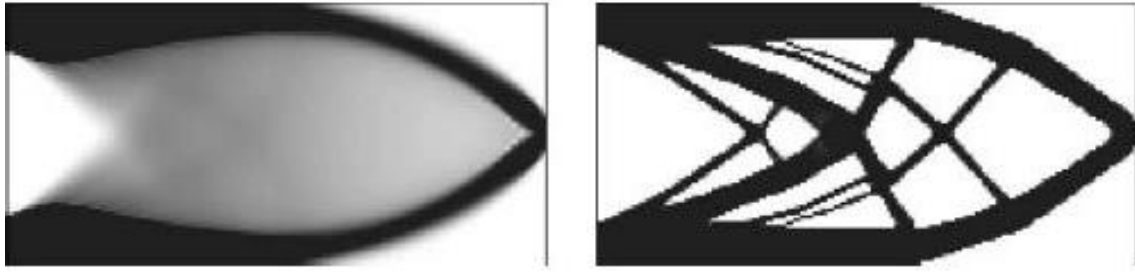
modellerinin formülasyonunun geleneksel yüzey modellemelerine göre topoloji optimizasyonu bağlamında teorik ve pratik olarak iki önemli avantajından bahsedilmektedir. İlk olarak, önceden de değinildiği üzere seviye set modelleri topolojik olarak esnek olarak ifade edilebilmektedirler. 3 boyutlu skaler Φ fonksiyonu her zaman basit bir topolojiye sahip olacak şekilde tanımlanmıştır; seviye seti delik oluşturabilen, birden fazla sınır oluşturmak üzere bölünebilen, karmaşık yüzey şekillerini kolayca temsil edebilirken, tek bir yüzey oluşturmak için de diğer sınırlarla birleşebilmektedir. Hesaplama karmaşıklığı hakkında ise seviye setinin yerleştirildiği birimin boyutundan ziyade yüzey alanı ile orantılı olduğu dile getirilmiştir. Ele aldıkları örneklerinde malzeme olarak 210 GPa elastikiyet modülü ve 0.3 Poisson oranına sahip çelik incelenmiştir [87].



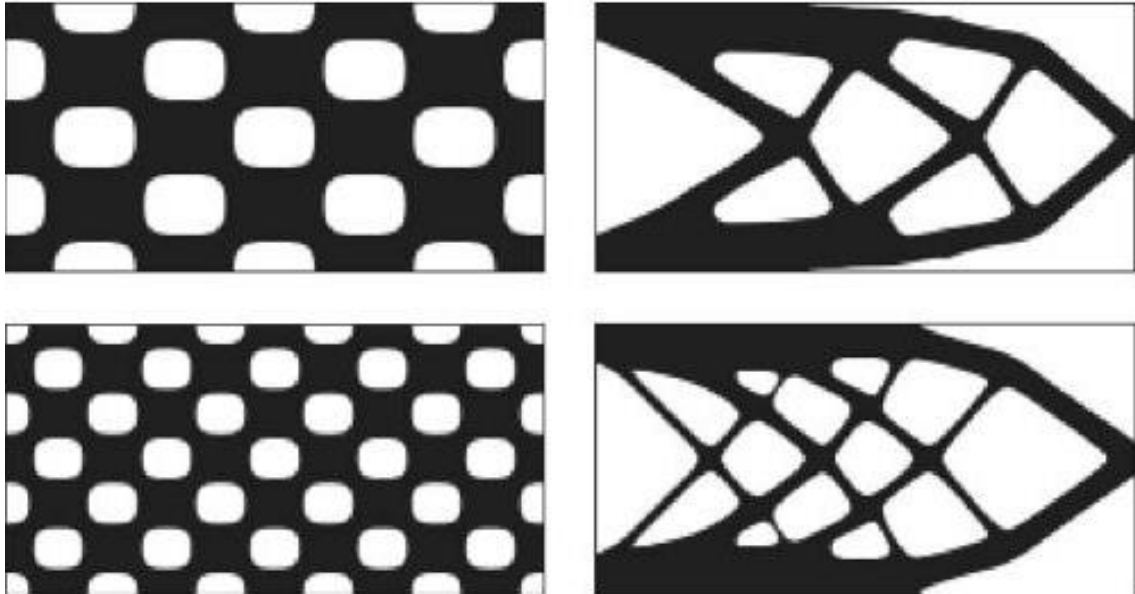
Şekil 4.12. Seviye seti optimizasyonu uygulanan üç farklı yapı için 6 iterasyon sonucu elde edilen örnek iki çubuklu yapılar; (a) Başlangıç tasarımında herhangi bir deliği bulunmayan ve tek parça olan, (b) Başlangıç tasarımında tek bir delik bulunan, (c) Delikli bir başlangıç tasarımına sahip [87]

Allaire, Jouve ve Toader (2004) yapısal optimizasyon bağlamında, klasik şekil türevi ve önden yayılma için yeni bir sayısal yöntem kabul ettikleri seviye seti yöntemini önermişlerdir. Bu yöntem iki ve üç boyutlu, doğrusal veya doğrusal olmayan elastikiyetlere sahip modeller için uygulanabilmektedir. Ayrıca seviye seti yöntemi hakkında çok yönlü ve hesaplama olarak çok verimli olduğundan bahsetmişlerdir. Yöntem, ortalama eğrilik, akışkanlar mekaniği, görüntü işleme gibi hareket içeren birçok alanda klasik bir araç haline gelmiştir. Ayrıca ön hızın şekil hassasiyeti analizinden türetildiği, seviye seti yöntemiyle alakalı sistematik bir uygulama önermektedirler. İki ve üç eksenli yapılarda farklı hedef

fonksiyonlarını incelemişlerdir. Bunlar, uyumluluk (sertlik), hedeften en az kare sapma (uyumlu mekanizma), tasarıma bağlı yükler (basınç yükleri) olarak ifade edilmiştir. Öz frekanslar, çoklu yükler ve minimum stres gibi hedef fonksiyonlarına ise değinmemişlerdir. İki fazlı optimizasyondan ziyade şekil optimizasyonuna odaklanmışlardır. Ayrıca doğrusal olmayan esneklik modelini de çalışmalarında ele almışlardır. Tüm bu problemler için bir bitişik problem kullanarak şekil türevi hesaplanmaktadır. Daha sonra, şekil türevi optimizasyon işlemi sırasında taşınan serbest sınırın normal hızı olarak kullanılmaktadır. Bir konsol üzerindeki homojenizasyon yöntemi ve seviye seti yöntemleriyle elde edilen optimizasyon çalışmalarında bazı karşılaştırmalara yer vermişlerdir [88].



Şekil 4.13. Homojenizasyon yöntemiyle hesaplanmış bir konsol yapı. Kompozit (solda) ve cezalandırma tekniğiyle elde edilmiş çözüm (sağda) [88]



Şekil 4.14. Seviye seti yöntemiyle elde edilen optimum sonuçlar [88].

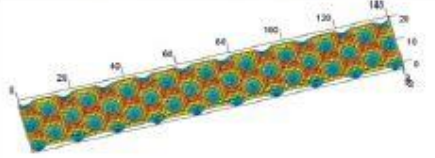
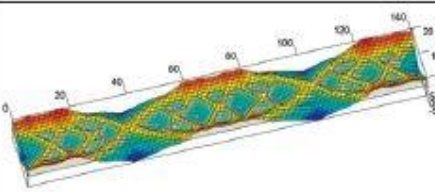
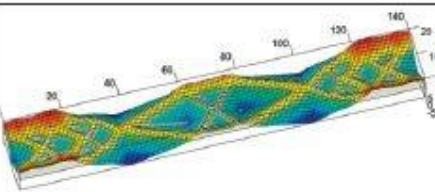
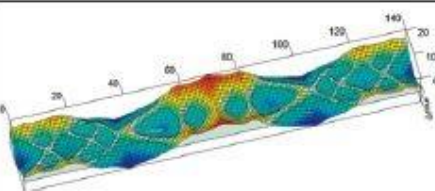
Dambrine ve Kateb (2010) seviye seti yöntemi için, şekil optimizasyonunda olan en dik iniş yönteminin popüler uygulaması ifadelerini kullanmıştır. Yapay malzeme yaklaşımıyla birlikte incelendiğinde, yapı optimizasyonunda sadece tek bir ağına bile çok verimli ve ucuz sayısal şemaların elde edilmesini sağladığını belirtmişlerdir. Ancak yöntemin bazı sınırlamalarının bulunduğu ve her durumda uygulanamayacağından bahsetmişlerdir. Ayrıca yapay malzeme yaklaşımı, etki alanının dışını daha zayıf iletkenlikte bir malzeme ile doldurmaktan ve tüm seviye seti ağına belirtilen iki malzemeli denklemin çözümüyle durum fonksiyonunu değiştirmekten oluşmaktadır ve fiziksel artıları olarak yapay malzemenin hesaplanması gereken durumlarda makul bir yaklaşıma yol açan bir yalıtım tabakası gibi davranmasını göstermişlerdir. Böylece bu yaklaşımın yapı optimizasyonunda kullanılan tüm olağan kriterler için çok iyi sonuçlar verdiğini ve şimdilerde ise bir referans yöntemi olarak gösterildiğini ifade etmişlerdir [163].

Yamada, Izui, Nishiwaki ve Takezawa (2010) ise seviye setine dayalı yapısal optimizasyon yöntemlerinde diğer yöntemlere göre farklı bir yaklaşım kullanıldığını yeni bir tür yapısal optimizasyon yöntemi olarak kabul gördüğünü belirtmişlerdir. Skaler bir fonksiyon olan seviye seti fonksiyonunun eşyüzeyini kullanarak hedef yapısal yapılandırmaları dolaylı olarak temsil eder ve optimizasyon işlemi sırasında seviye seti fonksiyonu güncelleştirilerek hedef yapıların ana hatlarını değiştirmektedir. Seviye seti yönteminin başlangıçta dolaylı olarak Eulerian koordinat sistemindeki arayüzlerin evrimsel yapısını temsil etmek için çok yönlü bir yöntem olarak ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Seviye seti yöntemleri ile akışkanlar mekaniği, faz geçişleri, görüntü işleme ve CAD programlarında katı modelleme gibi çeşitli uygulamalarda yararlanıldığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında da faz alanı kavramından elde edilen hayali bir arayüz enerjisini içeren seviye seti topoloji optimizasyon modelini anlatmaktadırlar. Yöntem, nitel olarak belirtilen optimal konfigürasyonun geometrik karmaşıklığına izin vermektedir ve optimizasyon sırasında yeniden başlatma işlemleri gerektirmemektedir. Ele alınan problemde ise seviye seti yöntemine göre formüle edilmiş bir topoloji optimizasyonu yaklaşımı incelenmiş ve hayali bir arayüz enerjisi getirerek optimizasyon problemi açıklanmıştır. Problemde ayrıca seviye seti fonksiyonunu güncelleyen reaksiyon-difüzyon denklemi türetilmektedir. Burada Eulerian koordinat sistemi üzerindeki yapının denklemlerindeki dengeyi hesaplamak için yapay malzeme yaklaşımını tercih etmişlerdir. Önerilen topoloji optimizasyon yöntemi daha sonra minimum ortalama uyumluluk, uyumlu mekanizmaların optimum tasarımı ve en düşük öz frekans problemine uygulanmaktadır [171].

Xia, Shi, Liu ve Wang (2011) çalışmalarında gerilme bazlı optimizasyon çalışmalarındaki sayısal zorlukları göz önüne alarak, yeni bir küresel gerilim ölçümünden bahsetmişlerdir. Bunun ölçümünden ilk olarak von Mises gerilmelerindeki güç fonksiyonunun integralinin alınması ile bahsedilmişken diğeri ise öngörülen bir eşikten daha büyük olan von Mises gerilmesinin cezalandırılması olarak dile getirilmiştir. Optimizasyon probleminin formülizasyonunda kısıtlayıcı olarak malzeme hacmi göz önünde bulundurulmuş ve gerilimi en aza indirecek şekilde seviye seti temelli optimizasyon yöntemi ile çözülmüştür. Seviye seti temelli yöntemde sabit bir ağda bulunan ve aslının yerine geçebilecek malzemede Eulerian yöntemi sonlu elemanlar analizi için uygulanmaktadır. Bu yöntemde göre Ω yapıya sonlu elemanlar yöntemini uygulamak yerine yapıyı içeren D referans alanına bir sonlu eleman analizi uygulanmaktadır. ($\Omega \subset D$). Seviye seti esaslı yöntemi kullanmak ve yapay zayıf materyali ortadan kaldırmak, "tekillik teorisi" olarak adlandırılan tanınmış bir sayısal zorlukla ilgilenen gerilime dayalı topoloji optimizasyonunda başka bir avantaj olarak ifade edilmiştir. Tekillik teorisi için bir topoloji optimizasyonu probleminde gerilimler tasarıma bağlı kısıtlamalar olarak modellendiğinde ortaya çıktığını söylemişlerdir. Son olarak seviye seti yöntemi hakkında hareketli sınır koşulları için izlenen bir yöntem olduğundan bahsetmiş ve yöntemin topolojik değişikliklere açık olduğunu açıklamışlardır. Topolojik değişimin bu kadar rahat bir şekilde işlenmesi ile zor topoloji optimizasyonu problemlerinin nispeten daha kolay şekil optimizasyonu problemlerine dönüştüğünden bahsetmişlerdir [212].

Shu, Wang, Fang, Ma ve Wei (2011) yaptıkları çalışmada yapı titreşimini azaltma amacıyla, yapısal bir topoloji optimizasyonu olan seviye seti yöntemini frekans tepkisini en aza indirmek için incelemişlerdir. Bir uyarma frekansı veya frekans aralığı ile yapı üzerindeki belirtilen noktalarda veya yüzeylerde kabul edilebilir tasarım alanı üzerinde belirtilen miktarda malzemeye tabi olarak frekans tepkisini en aza indirmek amaçlanmıştır. Yapısal sınırlara ilişkin duyarlılık analizi yapılırken, genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi (X-FEM) ise durum denklemini ve ortak denklemi çözmek için kullanılmaktadır. Düzgün sınırlara sahip optimum yapı, duyarlılık analizi ve optimizasyon algoritmasından elde edilen, yatay iletim hızı ile seviye seti evrimi sonucu elde edilmektedir. Ayrıca seviye seti yönteminin fizibilitesi ve etkinliğini göstermek için iki boyutlu ve üç boyutlu bir dizi sayısal örnek sunulmuştur. Çalışmalarındaki izotropik materyalin özellikleri tüm örnekler için, Young modülü (E) 100 GPa, Poisson oranı (ν) 0.3, malzeme yoğunluğu (ρ) 1000 kg/m³ olacak şekilde alınmıştır. Şekil 3.4.4.te bulunan iki boyutlu kirişin yatay uzunluğu 0.14 m, dikey uzunluğu ise 0.02 m verilmiştir. Amaç, verilen frekans uyarma aralığı $\omega = (\omega_a, \omega_b)$ ile

yüklenen noktadaki frekans tepkisi minimizasyonu için en uygun yapı sınırlarını bulmaktır. Bir yapı bileşeninin dinamik davranışı çoğunlukla temel özfrekansı (ω_0) tarafından hakim olduğundan, temel özfrekansı (ω_0) etrafında üç farklı uyarma frekans aralıkları seçilmiştir. Başlangıç tasarım yapısının temel öz frekansı (ω_0) 275Hz, üç farklı uyarma frekansı aralığı ise sırasıyla (0,200Hz), (200,400Hz) ve (400,600Hz) seçilmiştir [213].

	Yapı	Seviye Seti Fonksiyonu Yüzeyi
Başlangıç Tasarımı		
Optimum Tasarım (0, 200Hz) $\omega_0=465\text{Hz}$	 A Yapısı	
Optimum Tasarım (200, 400Hz) $\omega_0=524\text{Hz}$	 B Yapısı	
Optimum Tasarım (400, 600Hz) $\omega_0=398\text{Hz}$	 C Yapısı	

Şekil 4.15. Farklı frekans aralıkları için ilk tasarım ve optimum tasarım [213]

4.5. SIMP Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Bendsøe (1989) SIMP ile ilgili ilk çalışmalardan kabul edilen araştırmasında yapısal bir unsurun, yalnızca taşıması gereken yükler; hacmi (maliyeti) ve gerilme ve gerinim sınırlamaları gibi tasarım gereklilikleri üzerinde durmuştur. İterasyon uygulanan tasarım optimizasyonu prosedüründeki ilk tasarım için, malzemenin en uygun şekilde doldurduğu kaba bir alan bloğu ifadesini kullanmıştır. Makalede, çok zayıf bir malzemenin boşlukların rolünü oynadığı katmanlı bir ortam kullanımı ile kare ve dikdörtgen şekil boşlukları ile malzemeden oluşan kompozitlerin kullanımını karşılaştırmıştır. Ayrıca, sonuçlar yapay bir

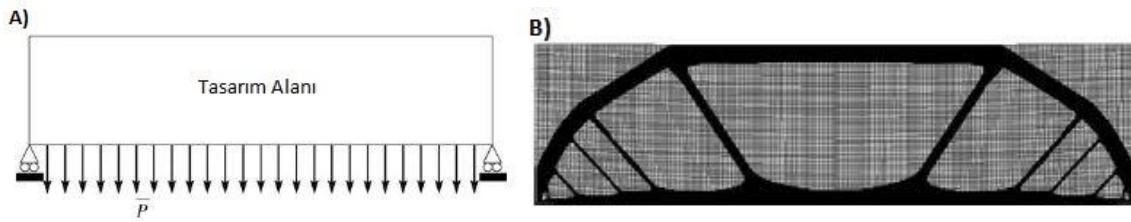
güç yasasındaki katılığın yoğunluğa bağımlılığının sunulmasıyla ve düzlem geriliminde değişken kalınlıktaki levhaların tasarımını temsil eden doğrusal bir yasa ile elde edilebildiğinden bahsetmiştir [89].

Rozvany, Zhou ve Birker (1992) orta yoğunluklar için ayarlanabilir bir cezalandırmanın katı izotropik mikroyapılarda optimal topolojileri ortaya çıkarmada etkili olduğunu belirtmişlerdir. Çözümde sadece katı ve boş bölgeler istendiği için, ara bölgelerdeki herhangi bir mikroyapı uygun cezalandırmayla uzaklaştırılmaktadır. Böyle bir mikroyapıyı seçerken analiz ve optimizasyonun basitliği, ayarlanabilir ceza ile ara gözenekli bölgelerin bastırılması ve çeşitli tasarım koşullarından yük koşulları için sapma, gerilim, doğal frekans ve stabilite kısıtlamaları kombinasyonları taşıma becerisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu gibi ara yoğunluklarda çözüm, geliştirilen SIMP modeli ile elde edilmiştir [90].

Stolpe ve Svanberg (2001) Malzeme Özelliklerinin Rasyonel Yaklaşıklığı (RAMP) olarak bilinen alternatif bir enterpolasyon şeması önermiştir. RAMP modelinin tercih edilen bir özelliği, SIMP yönteminin aksine, sıfır yoğunlukta sıfır olmayan duyarlılığa sahip olması olarak belirtilmiştir. RAMP iki doğrusal elastik malzemenin optimum dağılımını bulmak için ayrık 0-1 sürekli topoloji optimizasyonu probleminde, uyumluluğun en aza indirilmesi olarak görmektedir. Tasarımın geometrik karmaşıklığı, tasarımın çevresi üzerindeki bir kısıtlama kullanılarak sınırlandırılmıştır. Bu sorunları çözmek için kullanılan yaygın bir yaklaşım, sıfır-bir kısıtlamaları gevşetmek ve malzeme özelliklerini, kullanılan malzeme miktarına kıyasla çok az sertlik veren bir güç yasası ile modellemektir. Pozitif bir skaler q ile parametrelendirilmiş ve q sıfır olduğunda konveks fonksiyonu, sonlu ve q üzerinde bilinen olası bir değer için içbükey bir fonksiyon olması gibi, belirli bir rasyonel fonksiyona dayalı bir malzeme enterpolasyon modeli önermişlerdir. Sonuç olarak RAMP malzeme modelinin, tasarıma bağlı yükleme varlığında çok düşük yoğunluk değerleri ile ilgili sorunlarda bazı sayısal zorlukları gidermek için ortaya konulmuştur [191].

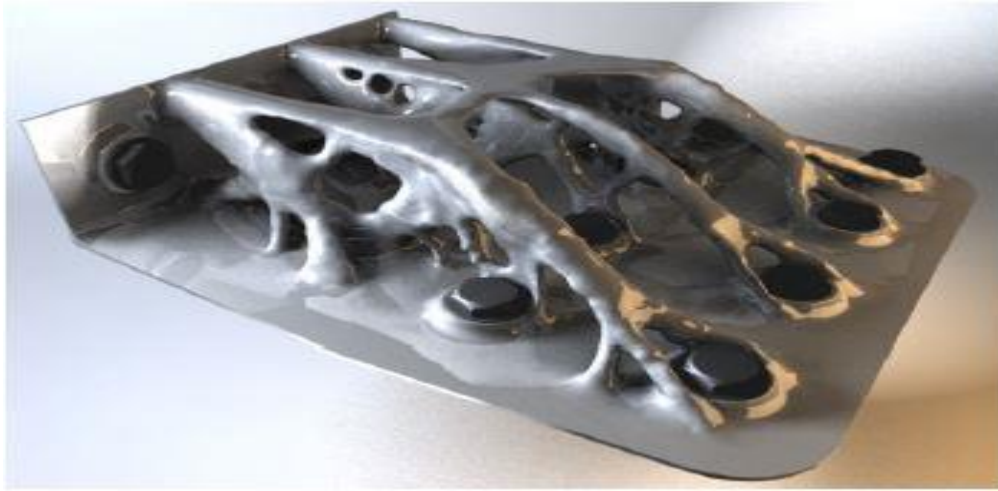
Bruns'a (2005) göre SIMP'in yoğun kullanımının arkasındaki temel ilke, tasarım değişkeninin yoğunluk temelli malzeme oluşturma yasasını gerektirmesi ara yoğunluk malzemesini de hacim kısıtlamasıyla birlikte cezalandırması olarak ifade etmiştir. SIMP'den farklı olarak, SINH yalnızca bir kısaltma değildir; yöntemde hiperbolik sinüs fonksiyonu kullanılmaktadır. Çalışmada filtreleme ile SIMP yöntemi yeniden değerlendirilmiş ve SINH adı verilen alternatif bir topoloji optimizasyon problemi formülasyon yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada SINH yönteminin temeli için katı veya boş malzemeye kıyasla ara yoğunluk malzemesinin hacimsel olarak daha az etkili hale getirilmesi olarak ifade edilmiştir. Hassasiyetleri filtrelemenin avantajı, tasarımın yoğunluk tasarım alanından doğrudan yorumlanabilmesidir. Ayrıca diğer bir avantajı, optimizasyon sorununun tutarlılığını ve düzenli oluşunu sağlamasıdır. En büyük dezavantajı ise, duyarlılıkların analiz ile tutarlı olmamasıdır, bunun nedeni ise yaklaşımın sezgisel olması olarak gösterilmesidir. Örnek olarak ise SINH yaklaşımını kullanarak alt kenarı boyunca dikey olarak yüklenen silindirik destekli bir kirişin tasarım alanı ve açıkça tanımlanmış optimal topolojisi gösterilmiştir [192]



Şekil 4.16. Makara destekli kirişte tasarım alanı (a) ve topoloji optimizasyonu yöntemlerinden SINH yöntemi uygulanarak elde edilmiş sonuç (b) [192]

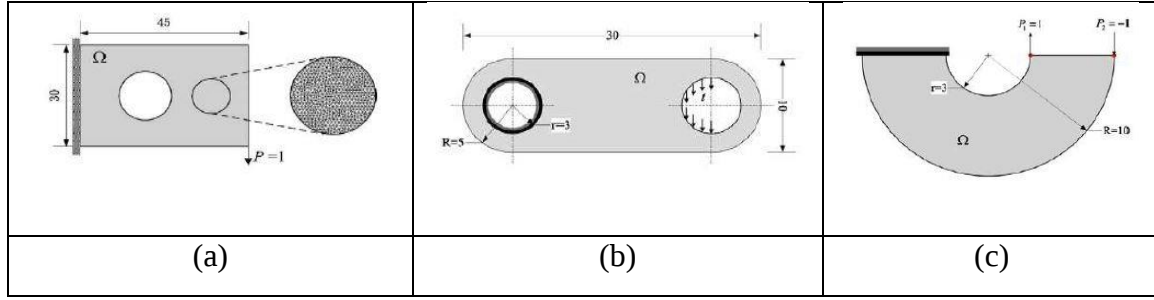
Brackett, Ashcroft ve Hague (2011) eklemeli imalat için topoloji optimizasyon yöntemlerinin oluşturduğu fırsatlara ve uygulamalarına incelemelerde bulunmuşlardır. Optimize edilecek modelde maksimum geometrik çözünürlüğün nasıl elde edileceği ve bu işlem sonrası eklemeli imalat yöntemiyle kolayca üretilebilmesi üzerine analizlerde bulunmuşlardır. Dikkate alınması gereken imalat kısıtlamaları ve optimizasyon sonrası aşamalarındaki karmaşık geometrik yapının işlenebilmesi için gereken iş akışı değişikliklerinden bahsetmişlerdir. Çalışmada havacılık sanayinde kullanılan bir braket üzerinde gerçekleştirilen bir topoloji optimizasyonu incelenmiştir. Buna benzer bileşenler metal seçici lazer eritme (SLM) işlemi kullanılarak herhangi bir modifikasyona gereksinim olmadan inşa edilmiştir. Bazı destek yapıları büyük çıkıntıları desteklemek için gereklidir, ancak topoloji SIMP yöntemi kullanılarak üretime uygun düzeltilip optimize edilmiştir [205].



Resim 4.1. Topoloji optimizasyonu uygulanıp eklemeli imalat yöntemi kullanılarak elde edilen braket [205]

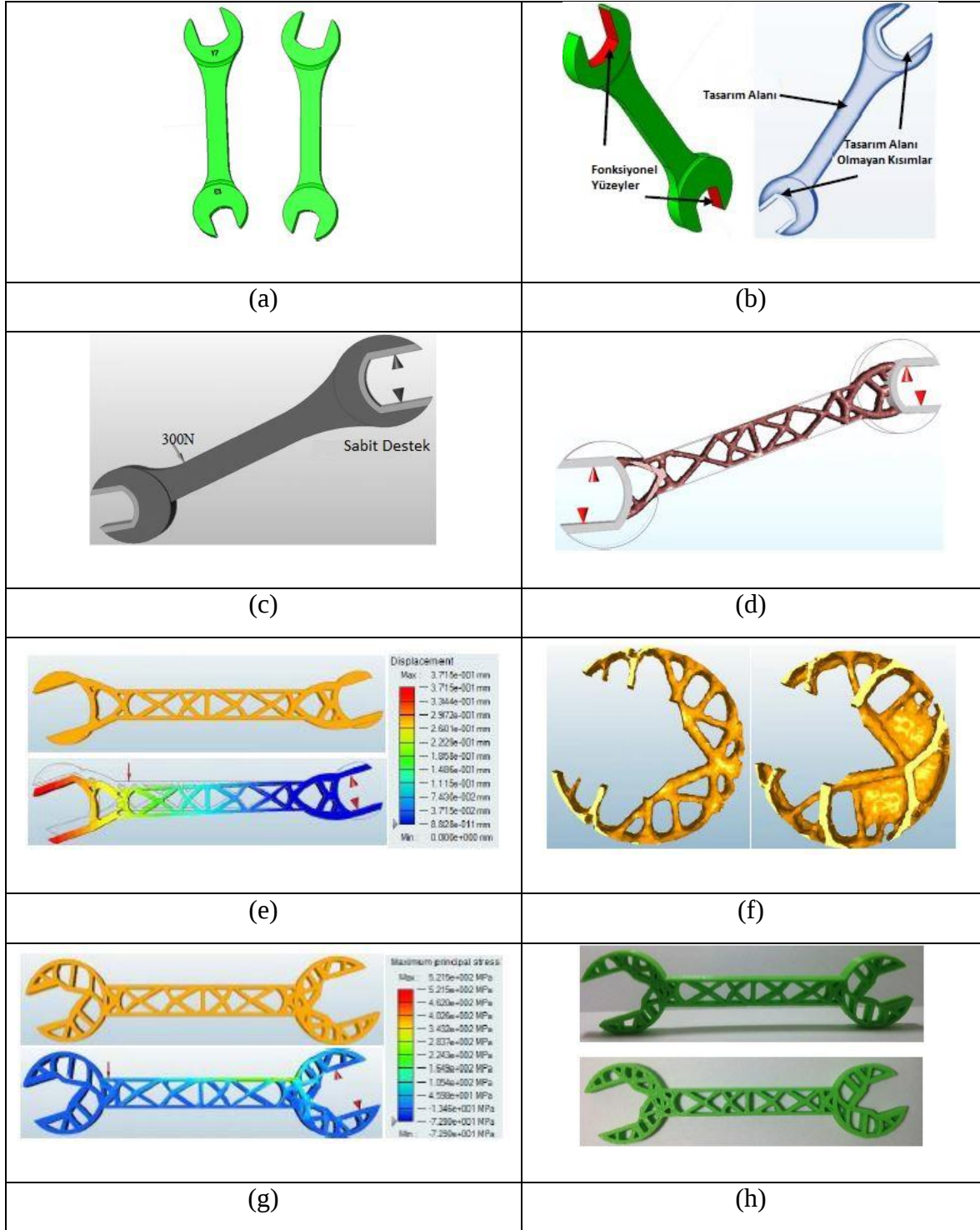
Deaton ve Grandhi (2014) topoloji optimizasyonunu, tasarım alanı içinde optimum malzeme ve optimum bağlantı düzeni olarak tanımlamıştır. Çalışmalarında 2000 yılından 2012'ye kadar sürekli yapılarının topoloji optimizasyonu çalışmalarını incelemişlerdir. Sonlu eleman tabanlı topoloji optimizasyonu ile ilgili yeni gelişmeler, iyileştirmeler ve uygulamalara odaklanmış, klasik yöntemlerin olgunlaşması, alanın kapsamının genişletilmesi ve multifizik problemleri için yeni yöntemlerin tanıtılması gibi konulara yoğunluk vermişlerdir. Ayrıca 4 farklı topoloji optimizasyonu yöntemi gözden geçirilmiştir. Bunlar yoğunluk temelli SIMP, sert öldürme yöntemi ve ESO, sınır koşullu yöntemler (seviye seti yöntemi) ve biyolojiden ilham almış olan hücresel bölünme kurallarına dayalı yeni bir yöntem olarak ifade edilmiştir [181].

Jain, Bankoti ve Saxena (2015) makalelerinde İzotropik Malzemelerin Ceza Kombinasyonu'nun (SIMP) aslında kullandığı cezalandırma şemasıyla veya gradyan tabanlı yöntemlerde 0-1 topolojisi evriminin temelini oluşturan güç hukuku yaklaşımıyla dile getirilebileceğini söylemişlerdir. Jain ve arkadaşlarına göre güç yasası yaklaşımı, bahsedilen güç üzerindeki basit koşullar sağlandığı sürece fiziken kabul edilebilmektedir. Örnek olarak cezalandırma katsayısının (p) 3'ten büyük olması ve Poisson oranının $1/3$ olmasını göstermişlerdir. Sonlu elemanlar ağını oluşturmak için ise ANSYS programını kullanmışlardır. Örnek olarak ise sabit dairesel deliğe sahip dirsekli bir kirişin topoloji optimizasyonu (Şekil 4.17.(a)), iki delikli bir braketin topoloji optimizasyonu (Şekil 4.17.(b)) ve yarım halka şekilli tasarım alanına sahip yapıda topoloji optimizasyonu (Şekil 4.17. (c)) çalışmaları yapmışlardır [214].



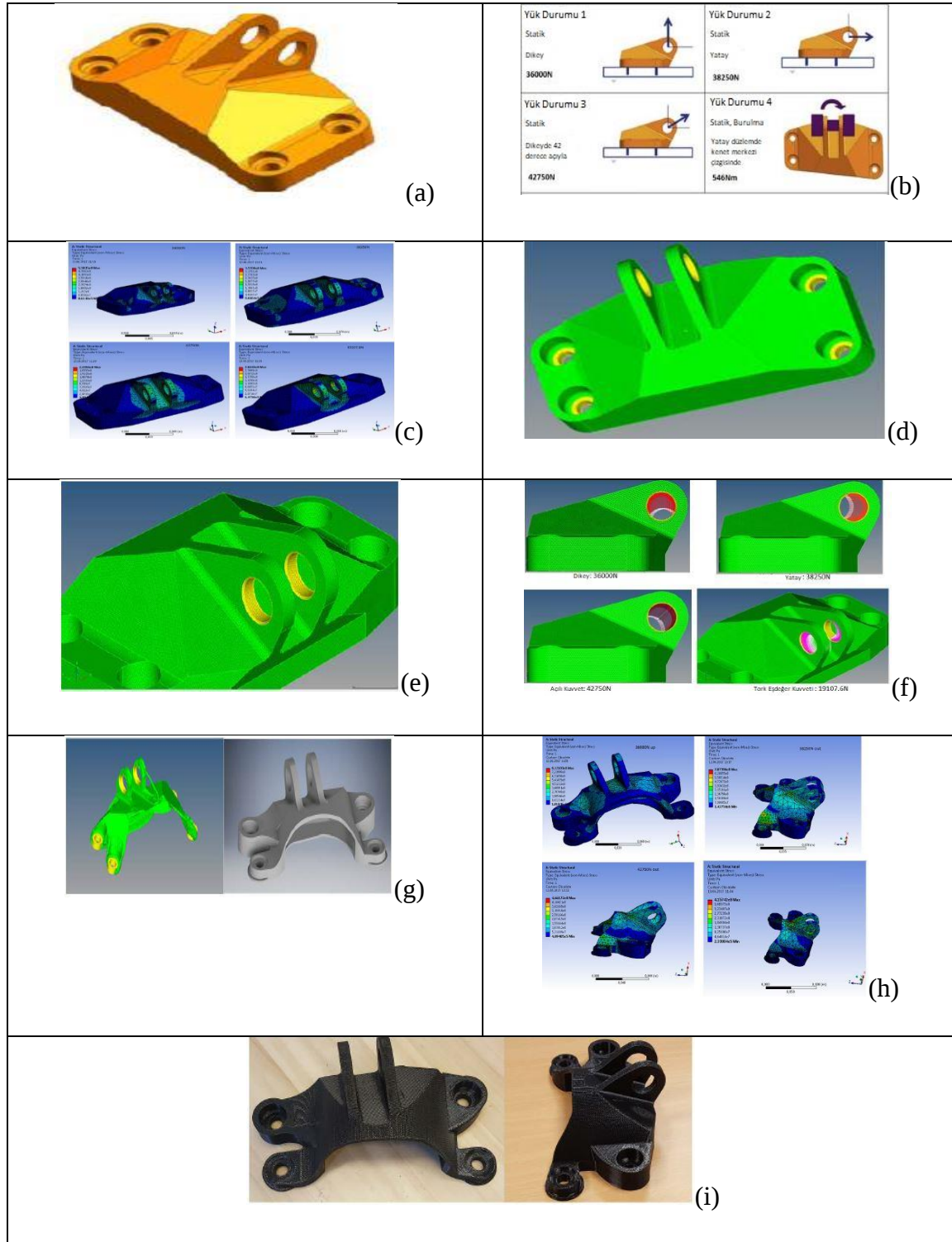
Şekil 4.17. Ele alınan örneklerin başlangıç tasarımları [214]

Nguyen ve Vignat (2017) eklemeli imalat teknolojilerindeki gelişmeler için, proses planlamasına gerek kalmadan ürünleri üretebilme, geleneksel üretim teknolojileri ile karşılaştırıldığında takımlamanın çıkarılması ifadelerini kullanmıştır. Bu teknolojilerin kullanımında yardımcı olan topoloji optimizasyonu, tasarımcının en az malzeme ile ürünün optimum yapısını oluşturmaya yardımcı olmaktadır, ancak bu koşullar gerçekleşirken ürünün mekanik özelliklerini de istenilen ölçülerde sağlanması amaçlanmaktadır. Nguyen ve Vignat da öncekilerin vurguladığı gibi topoloji optimizasyonu için, bir tasarım alanında en uygun malzeme dağılımını bulmayı amaçlamak olduğunu söylemişlerdir. Başka bir deyişle, tasarlanmış birim kısıtlamalarına tabi en aza indirgenmiş uyumluluk hedef fonksiyonunu optimize etmektedir. Malzemelerin dağılımı katı veya boş olarak öngörülen tasarım alanı ile sınırlandırılmıştır. Çalışmalarında iki ucu da açık olan bir İngiliz anahtarının inovatif tasarımını işlemişlerdir. Ürünün ağırlığı en aza indirmek istenirken, ürünün mekanik özelliklerinin 300N kuvvet ile bir cıvata açmak için uygun olması hedeflenmektedir. Program olarak Altair HyperWorks kullanılmıştır ve programda topoloji optimizasyonu yöntemi olarak SIMP kullanılmaktadır. Hedeflenen hacim azaltılması %50 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon uygulandıktan sonra elde edilen yapı yüzeyi çok pürüzlü olduğundan doğrudan üretim için kullanılamamaktadır. Bu nedenle, optimize edilmiş sonuca dayalı olarak CAD yazılımında anahtar modelinin yeniden tasarlanması gerekmektedir. Yeni tasarımın ağırlığı 0.04kg ve ilk modele kıyasla malzeme oranı 45.21% azaltılmıştır. Ancak, sonlu elemanlar analizi sonucu, 300N kuvvetle cıvata açıldığında anahtarın başının iyi bir durumda olmadığı görülmüştür. Oluşan bu sorunu çözmek için, topoloji optimizasyonu yaklaşımı kullanılmış ve iki anahtar kafası yeniden tasarlanmıştır. İngiliz anahtarının tasarlanmış yeni modeli ilk optimizasyondan daha yüksek dirence sahiptir. Son modelin ağırlığı 0.0465kg'dır ve malzeme kullanım yüzdesi orijinal modele kıyasla % 36,21 azalmıştır [80].



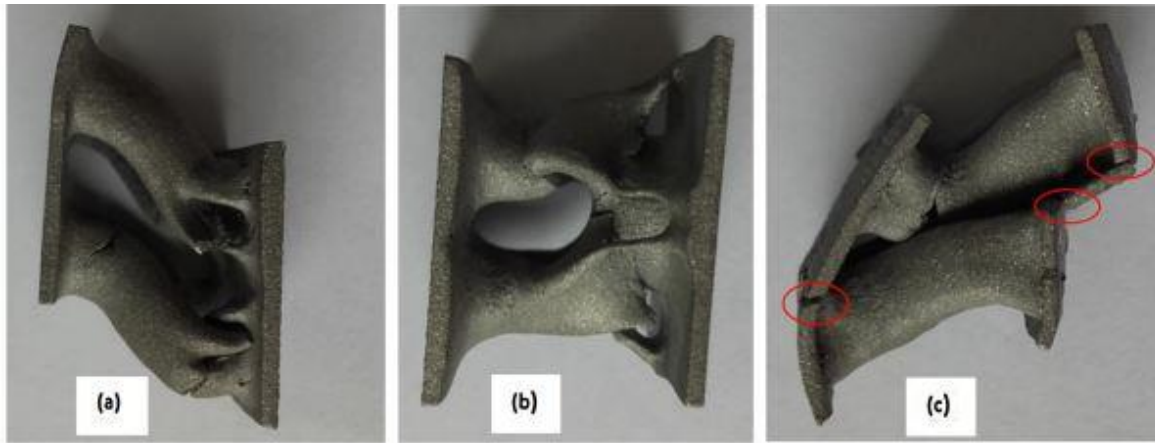
Şekil 4.18. İngiliz anahtarı üzerine bir topoloji optimizasyonu çalışması a) CAD tasarımı, b) fonksiyonel yüzeyleri, tasarım alanı ve tasarım alanı olmayan kısımları, c) uygulanan yükleri ve destek kısımları, d) SIMP yöntemi ile topoloji optimizasyonu sonucu, e) yeni modelin sonlu elemanlar analizi sonuçları, f) ucu açık kafalarının optimizasyonu, g) inovatif tasarımlı modelinin son hali ve h) 3 boyutlu yazıcılarla üretilmiş hali [80]

Gebisa ve Lemu (2017) topoloji optimizasyonu hakkında, tasarlanacak bir parçadaki malzeme dağıtımını optimize eden ve bunun için matematiksel araçlar kullanan bir optimizasyon yöntemidir ifadelerini kullanmıştır. Topoloji optimizasyonu ile ilgili daha önceki çalışmalar, karmaşık geometrilerin üretiminde sınırlamalar içeren konvansiyonel üretim tekniklerini dikkate almıştır. Ayrıca eklemeli imalat teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla, parçanın doğrudan üç boyutlu model verilerinden elde edilen verileriyle katman üzerine katmanını oluşturan teknoloji sayesinde, karmaşık şekil geometrilerini üretmenin artık bir sorun teşkil etmediğini de dile getirmişlerdir. Makalede, jet motoru braketinin topolojik olarak optimize edilmiş tasarımı ile hafifletilmesi üzerine bir vaka çalışması üzerinde durulmuş ve hafifletilmiş yapının eklemeli imalat ile üretimi yaklaşımına odaklanılmıştır. Topoloji optimizasyonu için kullanılan program Altair Hypermesh 14 Optistruct yazılımı olarak belirtilmiştir. Altair Hypermesh 14 Optistruct yazılımı topoloji optimizasyonu algoritması olarak SIMP yöntemini kullanmaktadır. Jet motoru braket Şekil 4.19.(a)'da gösterilmiştir. Malzeme olarak titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V kullanılmıştır ve 23° sıcaklığında 904 MPa akma dayanımına sahiptir. Minimum malzeme özellik boyutu 1,13 mm olarak tanımlanmıştır. Hedef fonksiyonu olarak ağırlığın minimuma indirilmesi gösterilmiştir ve bu oran en çok %30 olacak şekilde tanımlanmıştır. Braket üzerine uygulanan farklı yükleme koşullarına dayanabilmek için tasarlanmıştır (Şekil 4.19.(b)). Yapısal sonlu elemanlar analizi, parçadaki gerilim dağılımını görmek için orijinal braket üzerinde yapılmıştır. Şekil 4.19.(c)'de gösterilen kontur çizimleri, parçadaki tüm yük durumları için von Mises gerilim dağılımını göstermektedir. Kontur çiziminde mavi renkte gösterilen parçanın geniş alanları, performans üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu için aslında malzemeden uzaklaştırılabilecek elemanların kullanımını gösterdiği söylenebilmektedir. Topoloji optimizasyonunun ilk aşaması olarak, parçayı Şekil 4.19.(d)'de gösterildiği gibi tasarım (yeşil) ve tasarım dışı (sarı) boşluklara bölünmüştür. Ağ Şekil 4.19.(e)'de parça boyunca eşit ve kabul edilebilir malzeme dağılımı elde etmek için 0,25 mm eleman boyutu ile yapılmıştır. Yükler, parçaya Şekil 4.19.(f)'de gösterildiği gibi tasarım dışı alan olarak tanımlanan iki yatay delik yüzeyinde ayrı ayrı uygulanmaktadır. Gerilim ve yer değiştirme dağılımına bağlı olarak, yük veya yükü desteklemeye önemli ölçüde katkıda bulunmayan parçalar düzgün bir geometrik yüzey geride kalacak şekilde uzaklaştırılmış ve son modelleme için Autodesk Inventor Professional programı kullanılmıştır. (Şekil 4.19.(g)). Şekil 4.19.(h)'de gösterildiği gibi von Mises gerilmeleri malzemenin akma gerilmesinin altında gözlemlenmektedir. Son olarak parça eklemeli imalat yöntemlerinden eriyik yığma ile modelleme (FDM) kullanılarak imal edilmiştir (Şekil 4.19.(i)) [215].



Şekil 4.19. Jet motoru braketinin topoloji optimizasyonu (a) optimizasyon öncesi orijinal hali, (b) yük koşulları, (c) sonlu elemanlar analizi, (d) tasarım alanları ve tasarım dışı alanları, (e) ağ gösterimi, (f) üzerine uygulanan yükler, (g) topoloji optimizasyonu uygulanmış geometrisi (sol) ve yeniden modellenen son hali (sağ), (h) son tasarımının gerilim doğrulama kontur çizimleri ve (i) eklemeli imalatla üretilmiş son hali [215]

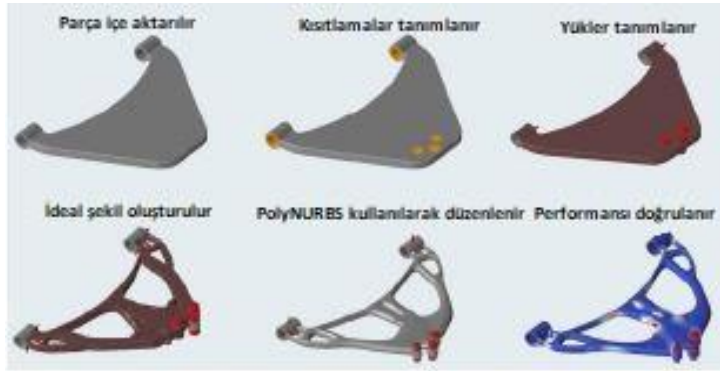
Saadlaoui, Milan, Rossi ve Chabrand (2017) yayınladıkları makalede klasik yöntemlerle karmaşık mekanik parçaların üretiminin zorluklarından bahsetmişken, eklemeli imalat yöntemlerinin yaygınlaşmasıyla tasarımcıların parçalar üzerinde daha rahat hareket edebildiklerini dile getirmişlerdir. Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat prosesinin birleşmesiyle ortaya çıkan parçaların günümüzde giderek yaygınlaştığını söylemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında topoloji optimizasyonu algoritmalarından SIMP yönteminin alt formülasyonlarından bazılarına değinilmiştir. Bunlar gerilim kısıtlı optimizasyon (SCO), sürekli uyumluluk optimizasyonu (CCO), ayrık uyumluluk optimizasyonu (DCO) olarak ifade edilmiştir. Bu üç özel formülasyona dayanarak, basınçlı yük uygulanan bir küp için Abaqus ve Optistruct yazılımlarını kullanarak topolojisi optimizasyonu incelemesinde bulunmuşlardır. CCO için Optistruct programı kullanılırken, SCO ve DCO için ise Abaqus programından yardım alınmıştır. Yöntemlerden ortaya çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. SCO, CCO ve DCO'dan elde edilen 3 farklı sonuçla beraber, eklemeli imalat yöntemlerinden olan seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle 3 farklı parça olarak üretilmiştir. Elde edilen numuneler testler sonucunda gerekli mekanik gerilim direncini gösterdiğinden, hacimdeki tasarruflar bir kriter alınarak karşılaştırılmıştır. Bu ölçüte dayanarak, Abaqus SCO'ya dayalı yaklaşım, ilk hacmin %74'ünü bulan en büyük hacim tasarrufu ile en başarılı performansı göstermiştir [216].



Resim 4.2. Sıkıştırma testlerinden sonra numuneler (a) Abaqus DCO, (b) Abaqus SCO, (c) Optistruct CCO [216]

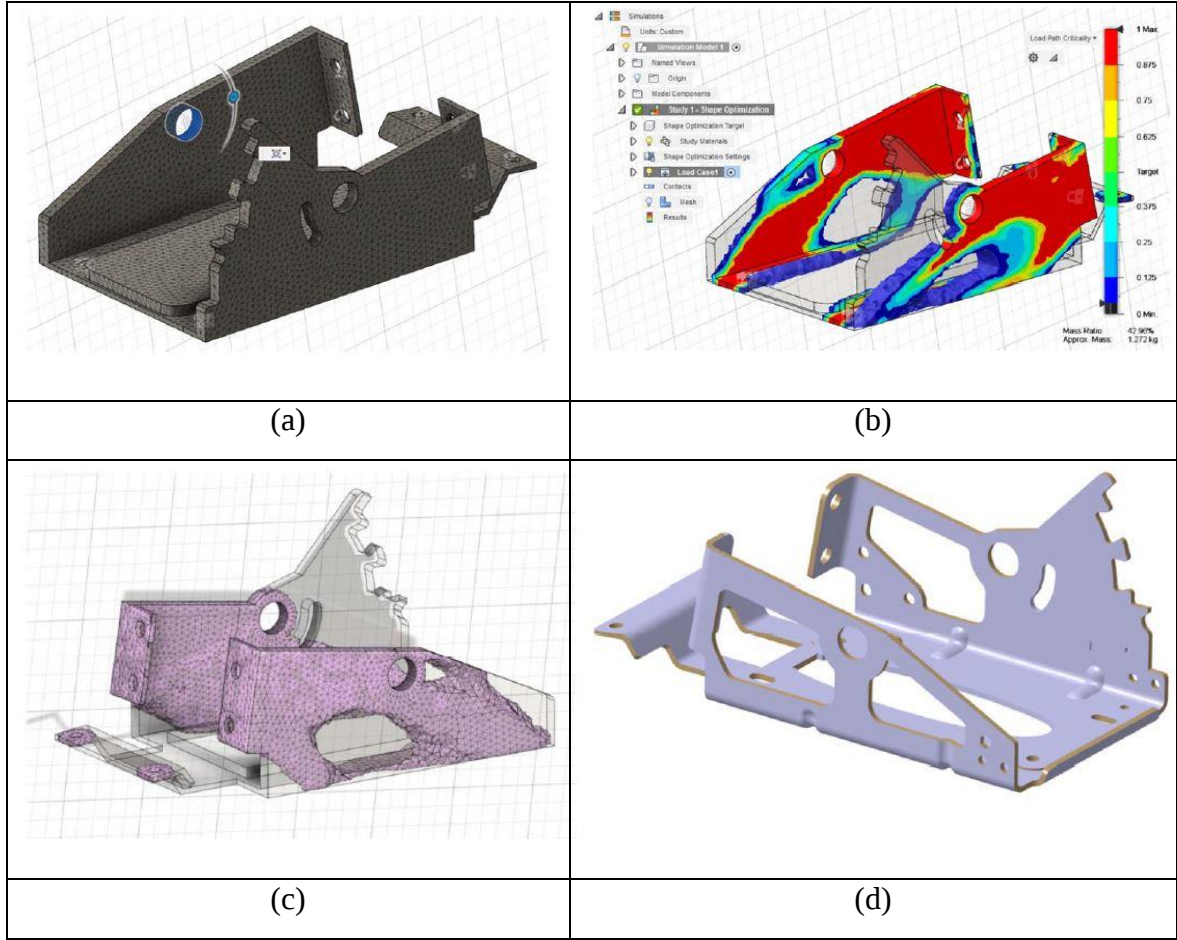
Top, Şahin ve Gökçe (2018) üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin kullanımının arttığından bahsederken, bu teknolojiler sayesinde üretim sürecinin kısaldığını ve karmaşık geometrilerin tek işlem basamağında rahatlıkla üretilebiliyor olmasının en büyük avantajları olarak ifade etmişlerdir. 3B yazıcı teknolojileri ile baskı almadan önce çeşitli optimizasyon

teknikleri ile hasar tahminleri yapılarak ürünlerin piyasaya çıkışının hızlandırıldığını ayrıca üretim sürecini kısalttığı için üretim maliyetini de düşürdüğünü söylemişlerdir. Topoloji optimizasyonu ile parçanın işlevini değiştirmeden daha az malzeme ile üretilmesi ve yapısal olarak en iyi forma dönüşmesinin amaçlandığını böylece parçanın ağırlığı azaltılıp, gücünün de artırıldığından bahsedip, bu sebeplerden ortaya çıkan yapıların uzay ve endüstri sektöründe daha çok kullanıldığına değinmişlerdir. Çalışmalarında örnek olarak salıncak kolunun topolojik optimizasyonunu işlerken program olarak SolidThinking Inspire yazılımını tercih etmişlerdir. SolidThinking Inspire programının kullandığı topoloji optimizasyonu yöntemi SIMP olarak tercih edilmiştir. Yük ve geometrik tanımlamaların ardından analiz süreci başlatılırken risk faktörlerini de göz önüne almışlardır [217].



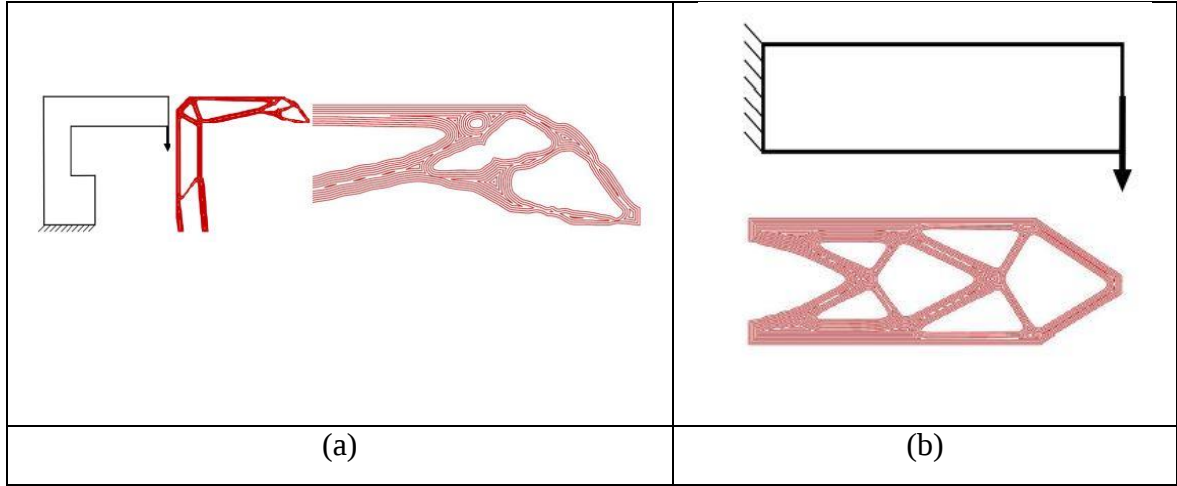
Şekil 4.20. Salıncak kolu modelinin evrim süreci [217]

Top, Gökçe ve Şahin (2019) çalışmalarında araçların el freni mekanizması için kullanılan braketin, eklemeli imalat teknolojileri baz alınarak, ağırlık hedefli topoloji optimizasyonu tanıtılmıştır. El freni braket elemanı modelinin AutoDesk Fusion 360 yazılımına alınması ile süreç başlatılmıştır. Optimizasyon sürecinde yapısal kısıtların tanıtılması yani hesaplama ağının oluşturulması, bağlantı yüzeylerinin belirlenmesi ve yüklerin geleceği bölgelerin tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Sisteme gelen burkulma momenti 500N olarak döndürme eksenini boyunca mekanizmanın bağlı olduğu delik içlerine uygunlanmıştır. Daha sonra 4 adet cıvata ile bağlanan delikler X, Y ve Z eksenlerinde sınırlandırılmıştır. Program üzerinde yapıda istenilen boşluk-doluluk oranı, istenilen minimum kalınlık, hassaslık, temas eden yüzeyler gibi özellikler de verilebilmektedir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra AutoDesk Fusion 360 programının kullandığı topoloji optimizasyonu yöntemi olan SIMP ile yapının iyileştirmesi tamamlanmaktadır [218].



Şekil 4.21. Seçilen braketin (a) sınır koşulları, (b) topoloji optimizasyonu aşaması, (c) optimizasyon sonucu, (d) elde edilen modeli [218]

Yaman (2019) çalışmasında tasarım ve üretim akışına verilen mekanik parçaların topoloji optimizasyonunu yapmış ve eklemeli imalat yöntemlerinden Eriyik Yığma Modellemeyi kullanan 3 boyutlu yazıcılarda doğrudan üretilebilmeleri için makine komutları üretmiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımının artmasıyla birlikte topoloji optimizasyonu yöntemlerinin uygulanabilirliğinin ortaya çıkmasından bahseden Yaman, ayrıca Eriyik Yığma Modelleme (FDM) yöntemi ile karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi için destek malzemesi konusundaki gelişmeleri sonucu yöntemin daha sıklıkla kullanılacağını öngörmüştür. Öncelikli olarak verilen parçanın tanımlanan koşullara göre topoloji optimizasyonunu tamamlayıp, sonrasında parçanın iç yapısı kabuklardan oluşacak şekilde üretim komutları oluşturulmuştur. Örneklerinde Grasshopper3D ve Rhinoceros3D programlarını, bu platform için sağlanan SIMP kaynakların güvenilir olmasından ötürü seçmiştir. İlk örnekte askıya benzeyen parçanın optimizasyon öncesi ve sonrası görüntülerini paylaşmışken ikinci örnekte ise ankastre giriş optimizasyonunu tercih etmiştir [82].



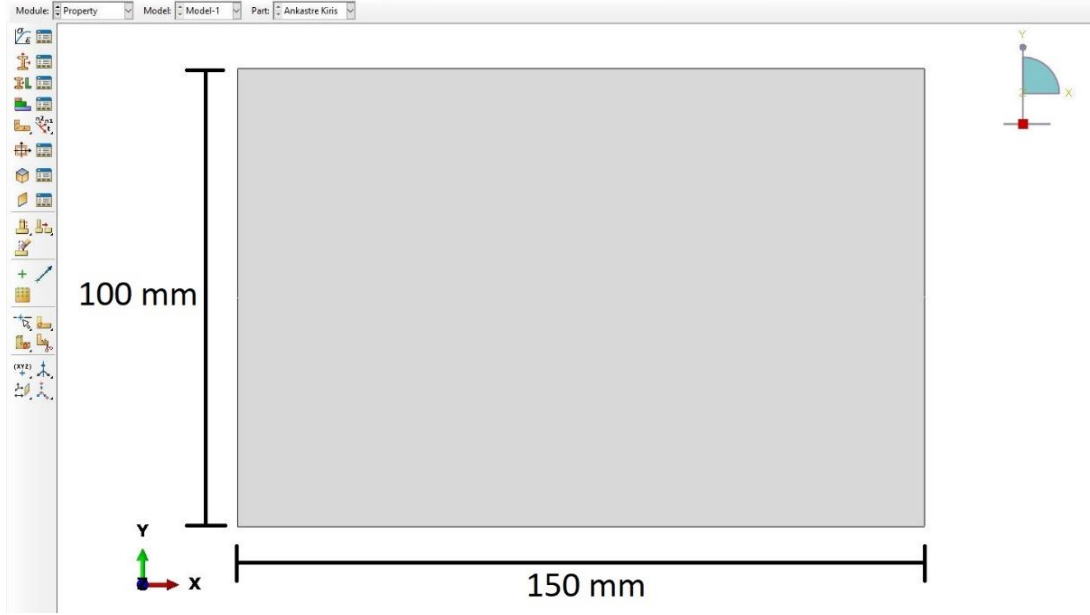
Şekil 4.22. Askıya benzer yapı ve ankastre kirişte SIMP yöntemi ile optimizasyon çalışmaları [82]

5. VAKA ÇALIŞMALARI

Bu çalışmanın önceki bölümlerinde, bazı topoloji optimizasyonu yöntemleri, zaman içinde bahsedilen topoloji optimizasyonu yöntemlerinin algoritmalarının gelişimleri ve bu algoritmaların uygulandığı farklı çalışmalar ve problemler gözden geçirilmiştir. Optimizasyon yöntemlerinin sayısı ve bu yöntemlerin uygulamaları arttıkça, performanslarını değerlendirmek için karşılaştırmalı çalışmaların yapılması yararlıdır. Karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha kolay çözülebilir bir hale getirilebilir, oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problem çözülebilir. Elde edilen sonuçlar çoğu kez problemin yaklaşık çözümüdür ve bazen doğrudan bazen de bir katsayı ile düzeltilerek kullanılır. Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir. Burada anlatılanlar yaklaşık olarak sonlu elemanlar analizinin bir tanımı olabilir. Sonlu elemanlar analizi yardımıyla uygulanacak olan topoloji optimizasyon algoritmalarından SIMP ve RAMP yöntemleri incelenmek üzere ele alınmış ve ilk önce çelik bir ankastre kiriş üzerinde 5 farklı hacim kısıtlaması altında gerilim enerjisi (SE) minimize edilecek şekilde optimizasyon uygulanmıştır. İkinci örnekte ise çelik bir şaft braketini üzerine aynı sayıda hacim kısıtlamasını aynı koşullarla Dassault Systemes firmasının Abaqus/CAE ve bu programın bünyesinde bulunan optimizasyon modülü olan TOSCA yazılımları kullanılarak iyileştirme amaçlanmıştır. İyileştirmeler sonrasında gereksiz malzemenin uzaklaştırılmasıyla elde edilen modeller yine Dassault Systemes firmasının bir başka yazılımı CATIA V5R21 yazılımıyla eklemeli imalat yöntemleriyle üretime uygun hale getirilmiştir.

5.1. Vaka 1 – Ankastre Kiriş Optimizasyon Çalışması

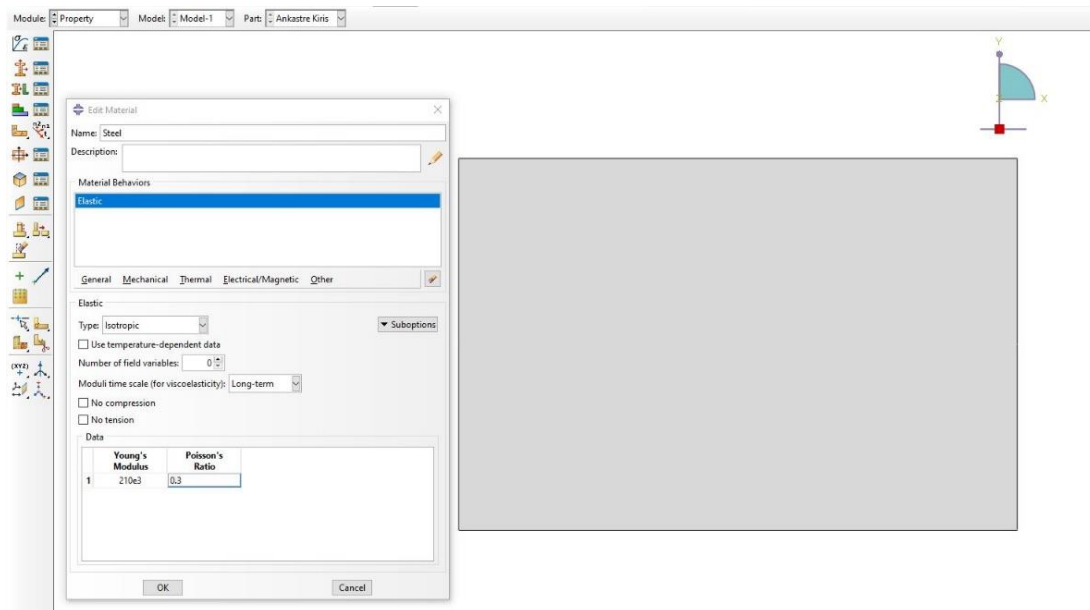
Çalışmada SIMP ve RAMP yöntemlerinin performansını değerlendirmek için ele alınan ilk vakada malzeme olarak çelik kullanılmış iki boyutlu tasarım alanına sahip bir ankastre kiriş üzerinde topoloji optimizasyonu çalışılmıştır. Vakanın modellenmesi Abaqus/CAE programının çizim kısmında gerçekleştirilmiştir. Kiriş Resim 5.1.'de gösterildiği gibi 100 mm genişliğe ve 150 mm uzunluğa sahiptir.



Resim 5.1. Ankastre kirişin tasarım alanı ölçüleri

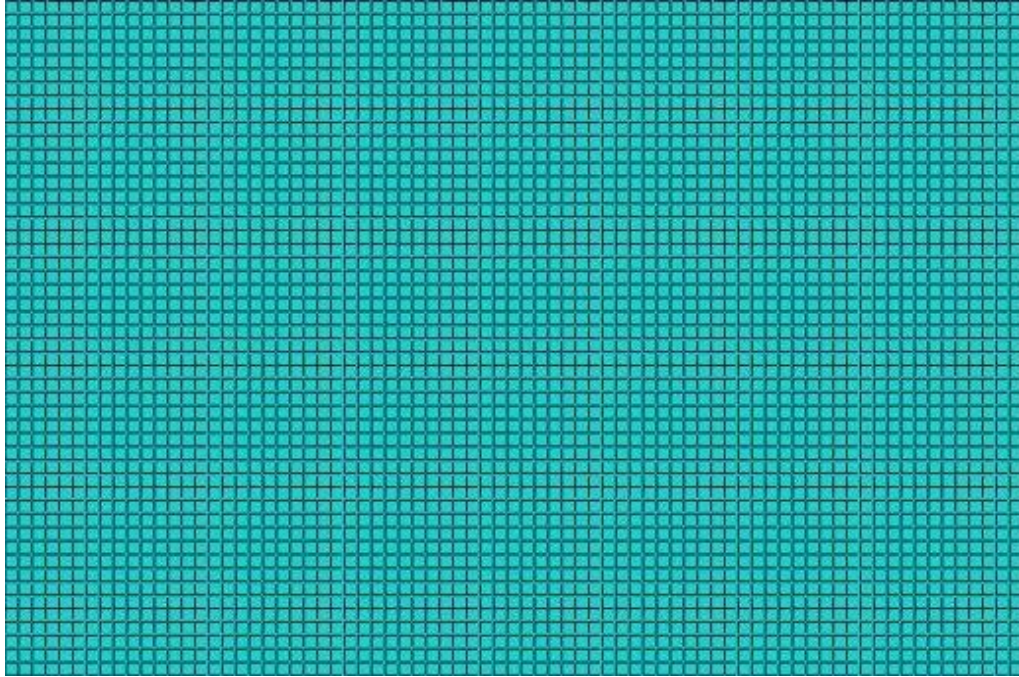
Yine Abaqus/CAE programı tercih edilerek parçanın yapısal analizi gerçekleştirilirken programın kendi bünyesinde bulunan ve optimizasyon çalışmalarında devreye giren Tosca modülü ile de parça üzerinde istenilen iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir.

Analiz için ilk önce malzemenin mekanik özellikleri “Materials” başlığında elastisite kısmında tanımlanmıştır. Seçilen malzeme çelik olup Young modülü değeri olarak 210 GPa girilirken, Poisson oranı için ise $\nu = 0.30$ kullanılmıştır (Resim 5.2.).



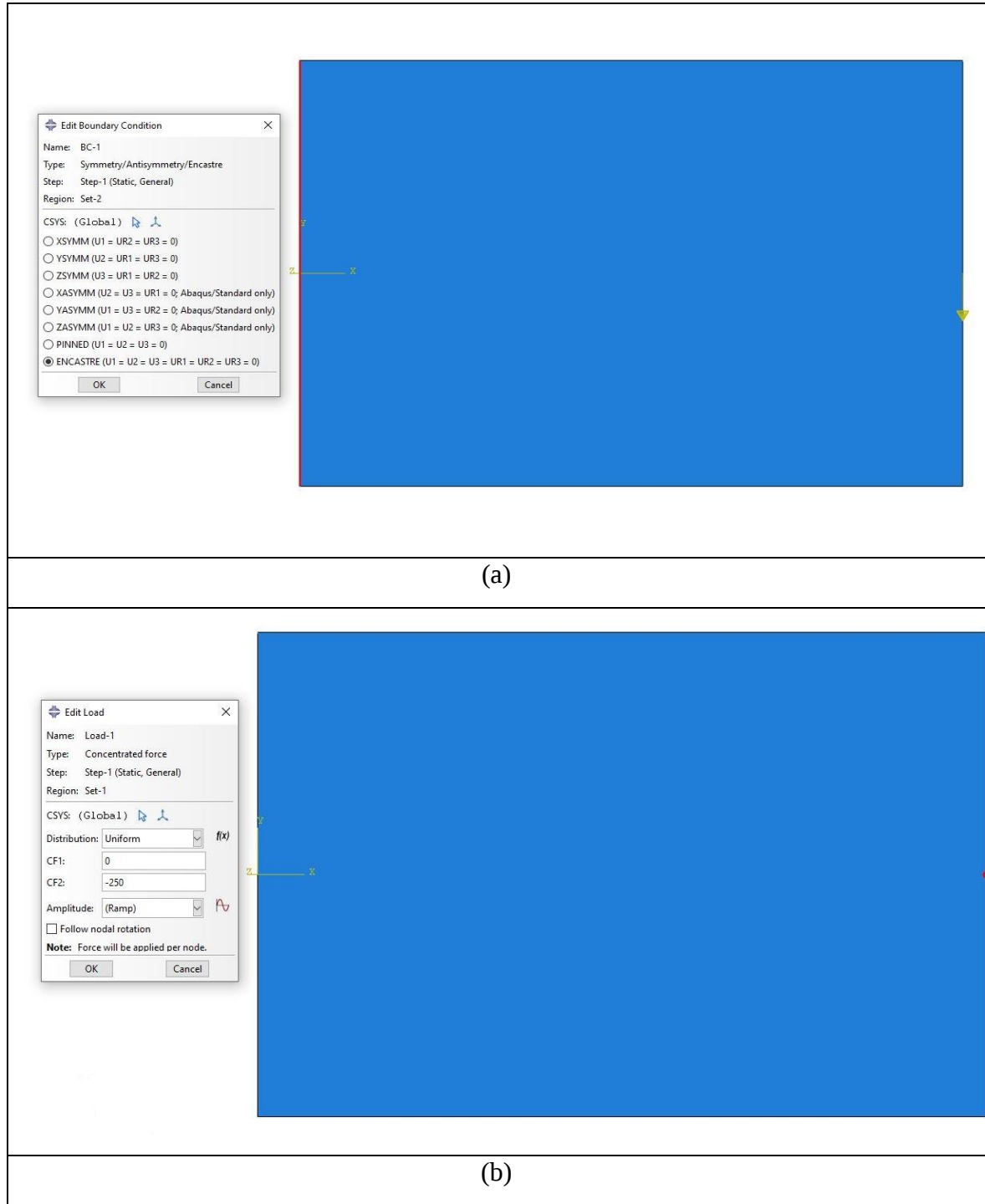
Resim 5.2. Ankastre kirişin mekanik özellikleri (Young modülü ve Poisson oranı)

Tanıtilan malzeme özelliklerini parçaya bölüm ataması ile aktarılmaktadır. Örnekteki ankastre kiriş tek parça olup ayrı özelliklere sahip bölümleri olmadığından Section Assignment ile parçanın tamamını homojen bir katı olarak seçilmektedir. Bu işlemin ardından mekanik özellikleri tanımlanmış parçaya uygulanacak sonlu elemanlar analizi için ağ girdileri belirlenmiştir. Sonlu eleman analizi gerilme analiz yöntemini kendine merkez olarak kabul etmektedir. Modelin bölüntülenmesinde eleman sayısının artması çözüm doğruluğu için daha iyi sonuçlar verebilmektedir, fakat çözümleme süresini arttırmaktadır. Bu bilgiler ışığında kiriş için seçilen ağ elemanı büyüklüğü 2 birim alınmıştır. Bu durumla beraber parçaya Resim 5.3.te gösterildiği üzere toplamda 3750 sonlu ağ elemanı atanmıştır. Modelleme yapılırken meshi oluşturan tüm node ve elementlerin oluşturulması program yönetimine bırakılmıştır.



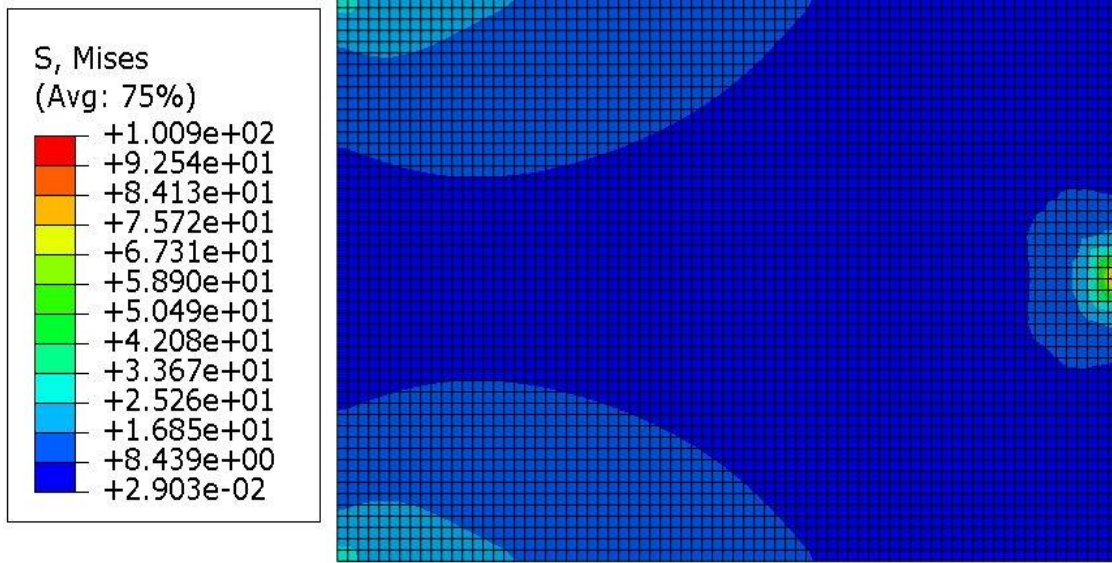
Resim 5.3. Ankastre kirişte sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuş çözüm ağı

Analiz tipi model ağacı altında bulunan Step başlığından seçilmektedir. Kiriş için incelenmesi hedeflenen tip genel ve statik bir analizdir. Bu adımlardan sonra kirişin sınır koşulları ve uygulanacak yük tanımlanmaktadır. Ankastre kirişin sol kenarından sabitlendiğini çizim bölgesinde seçtikten sonra sabit olacak kısımlarına ekrandaki pencereden ankastre özelliğini seçerek uygulanmıştır. Yük için ise sağ kenarının merkezinden 250 N aşağı yönlü olacak şekilde uygulanmıştır (Resim 5.4.).



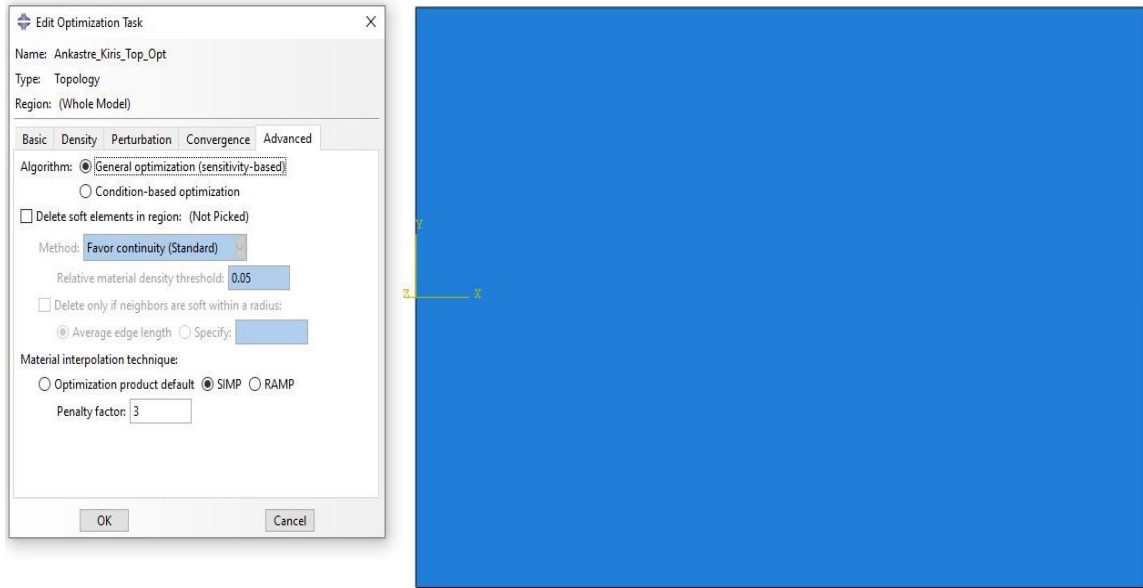
Resim 5.4. Sınır koşulları ve uygulanan yük

Veri girişini tamamladıktan sonra parçanın sonlu elemanlar analizini Abaqus/CAE üzerinden başlatıyoruz. Kirişte uygulanan yük sonrası oluşan von Mises gerilmeleri ve kirişin üzerindeki dağılımları analiz görevi üzerindeki sonuçlar kısmından incelenebilmektedir. Kirişteki en yüksek von Mises gerilmesinin kuvvetin uygulandığı noktadan olduğu Resim 5.5.'te gözlemlenebilmektedir.



Resim 5.5. Sonlu elemanlar analizi uygulanmasıyla ankastre kirişte gözlemlenen von Mises gerilmeleri

Ankastre kirişin sonlu elemanlar analizi tamamlanarak, kiriş optimizasyon görevi oluşturulmaya hazır hale gelmiştir. Parçada topoloji optimizasyonu algoritmalarından olan SIMP ve RAMP yöntemleri karşılaştırılması amaçlandığından ankastre kiriş her iki optimizasyon yönteminde de 5 farklı hacim oranına düşürülmüş ve bu optimizasyonlarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Cezalandırma katsayısı olarak 3 kabul edilmiştir.



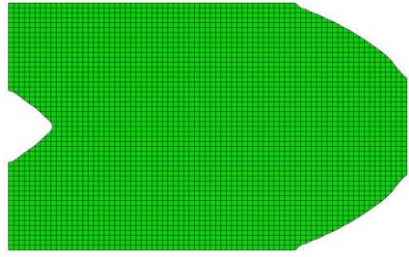
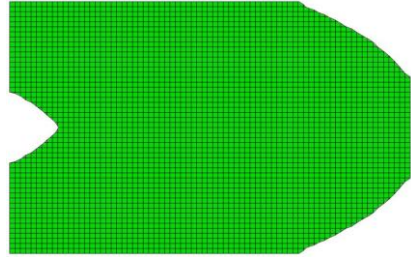
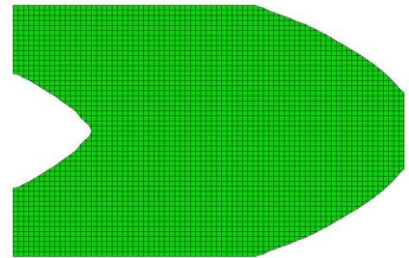
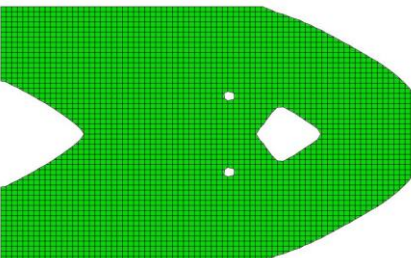
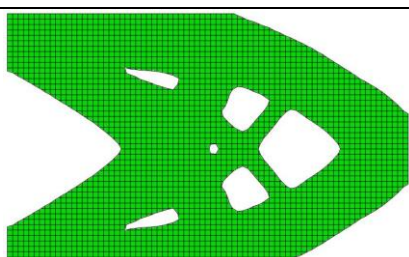
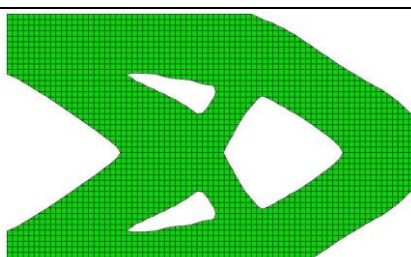
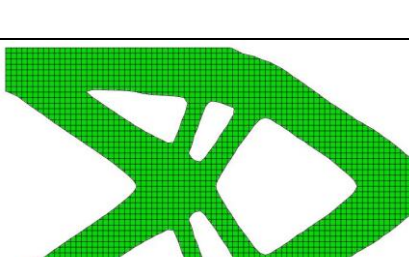
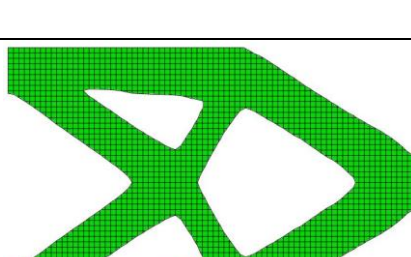
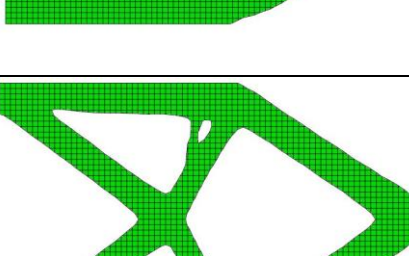
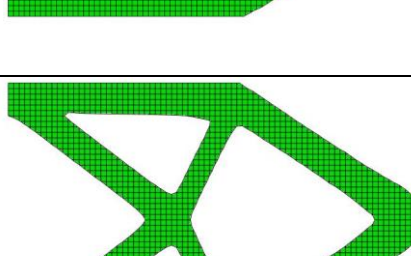
Resim 5.6. Topoloji optimizasyonu uygulanacak ankastre kirişte optimizasyon yönteminin seçimi ve cezalandırma katsayısının belirlenmesi

Tasarım değişkenleri olarak hacim ve gerinim enerjisi kullanılmıştır. Hedef fonksiyonunda da seçilen tasarım değişkeninin yani gerinim enerjisinin minimize edilmesi amaçlanmakta ve bu işlem sırasında parçanın hacminin kademeli olarak azaltılması istenmektedir. Kirişin yöntemlerle kıyaslanması için hacimsel olarak sırasıyla:

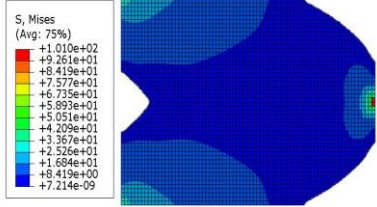
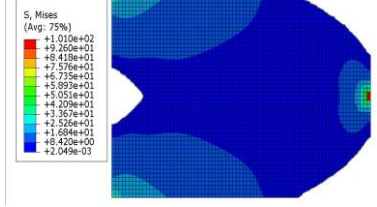
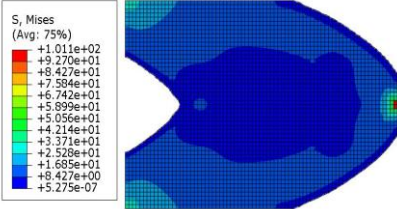
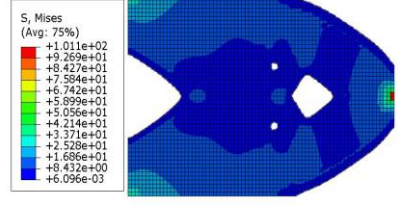
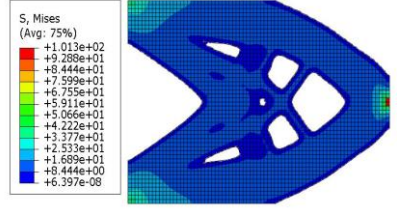
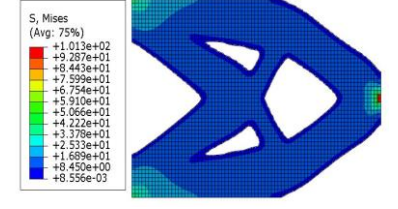
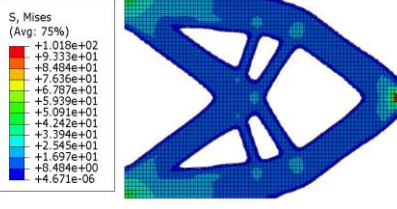
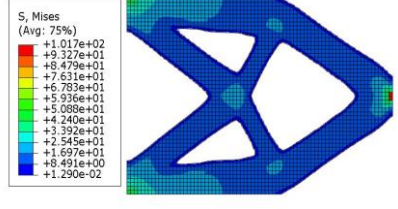
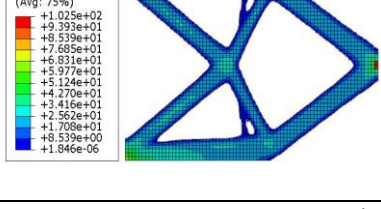
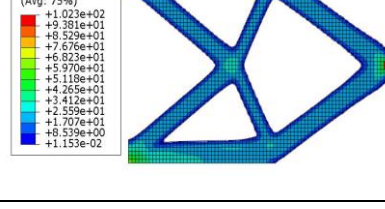
- %90
- %80
- %65
- %50
- %35

oranlarındaki kısıtlarla her iki algoritma için de gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonda tanımlanan değişkenler ve hedef fonksiyonları doğrultusunda elde edilen verilen aşağıda gösterilmiştir:

Çizelge 5.1. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış ankastre kirişte SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları

Kısıtlama	SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
%90		
%80		
%65		
%50		
%35		

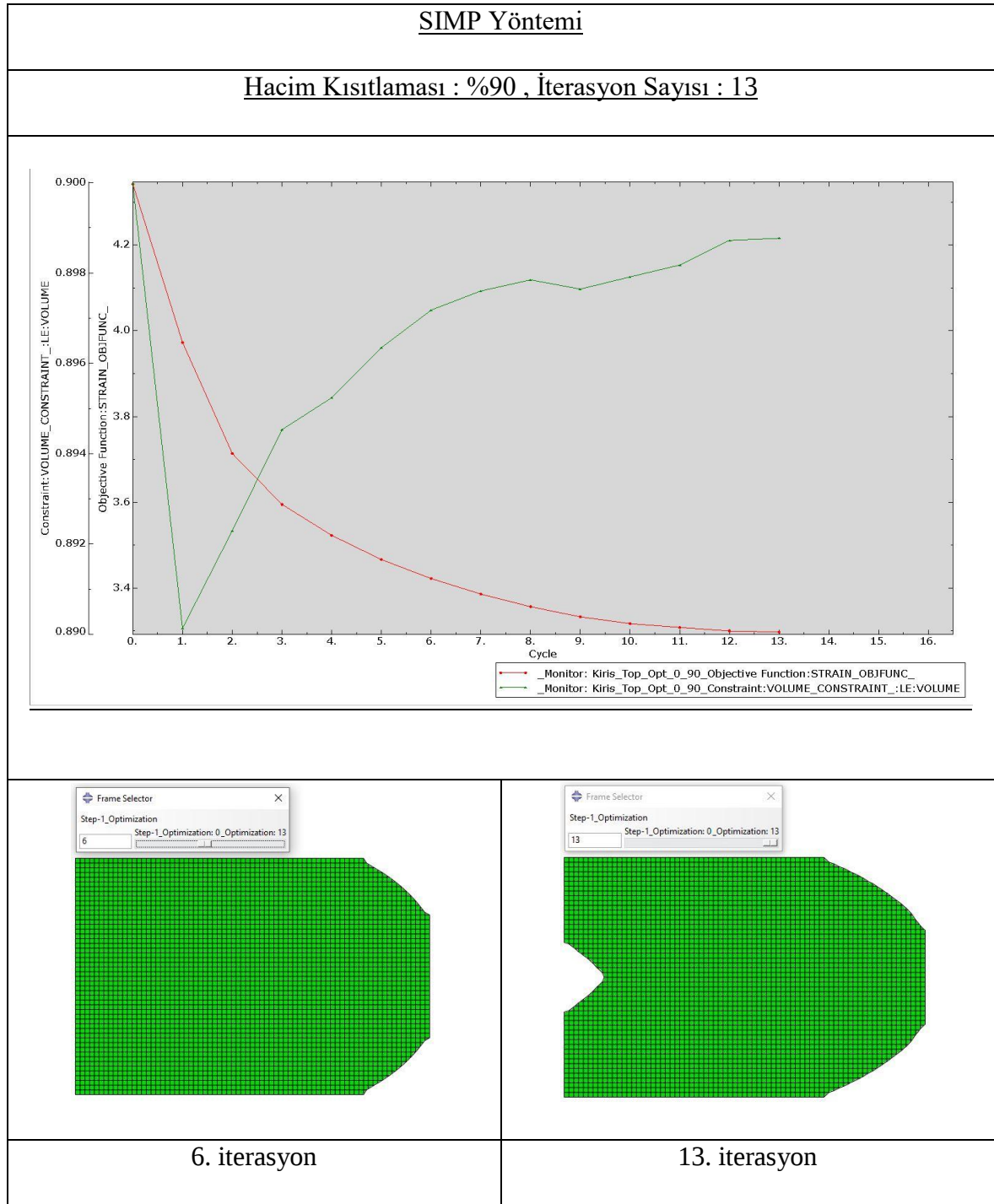
Çizelge 5.2. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış ankastre kirişte SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmeleri

SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
	
Hacim Kısıtlama : % 90	
	
Hacim Kısıtlama : % 80	
	
Hacim Kısıtlama : % 65	
	
Hacim Kısıtlama : % 50	
	
Hacim Kısıtlama : % 35	

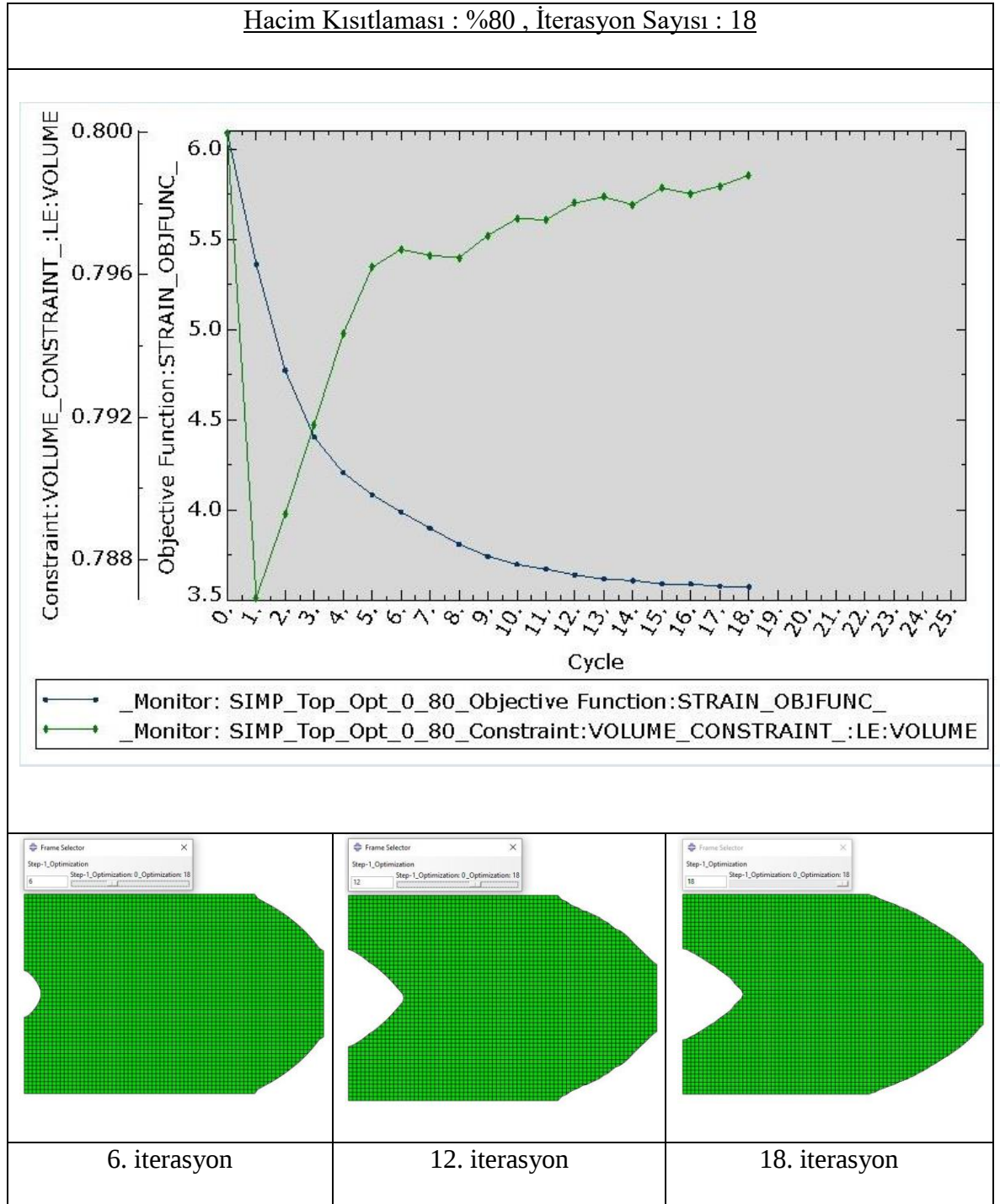
Ayrıca optimizasyon işlemi sırasında hedeflenen hacim kısıtlaması ve gerinim enerjisine ulaşma doğrultusunda iterasyon sayıları da değişmiştir. Hacim kısıtlaması başlangıç tasarımından %35'e düşürüldükçe iterasyon sayısının RAMP yönteminde arttığı SIMP yönteminde ise başlarda arttığı sonraki değerler için yakın sayılar aldığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca optimizasyon işlemi uygulanan 5 farklı hacim değişkeninde incelenen ankastre kirişin son ürünlerinde iki topoloji optimizasyonu algoritması için de tasarımsal farklılıklar gözlenmektedir. İlave olarak bölgelerde oluşan von Mises gerilmelerinin tablolarda farklı sonuçlarda elde edildiği gözlemlenmiştir.

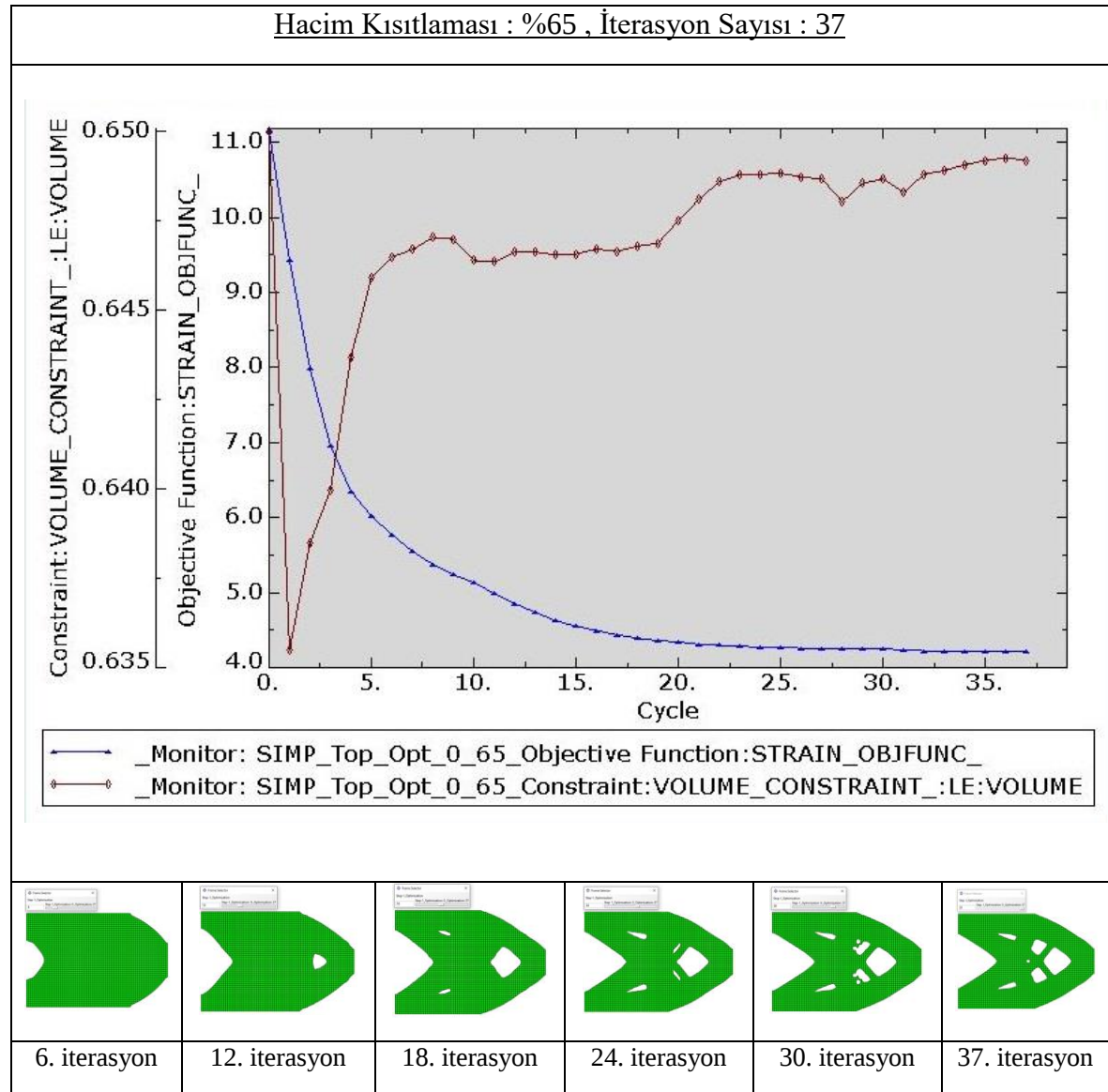
Çizelge 5.3. Farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



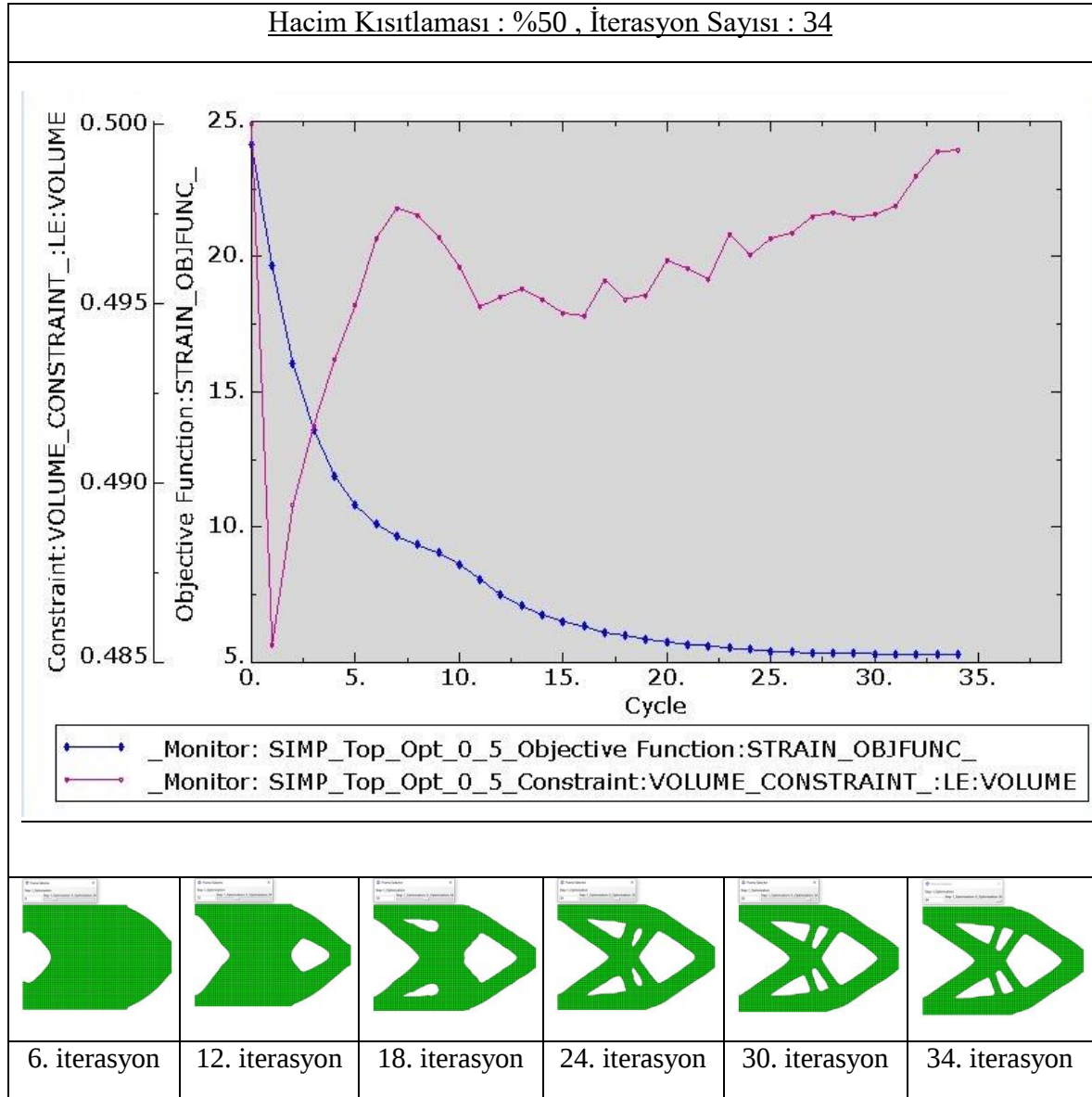
Çizelge 5.3. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



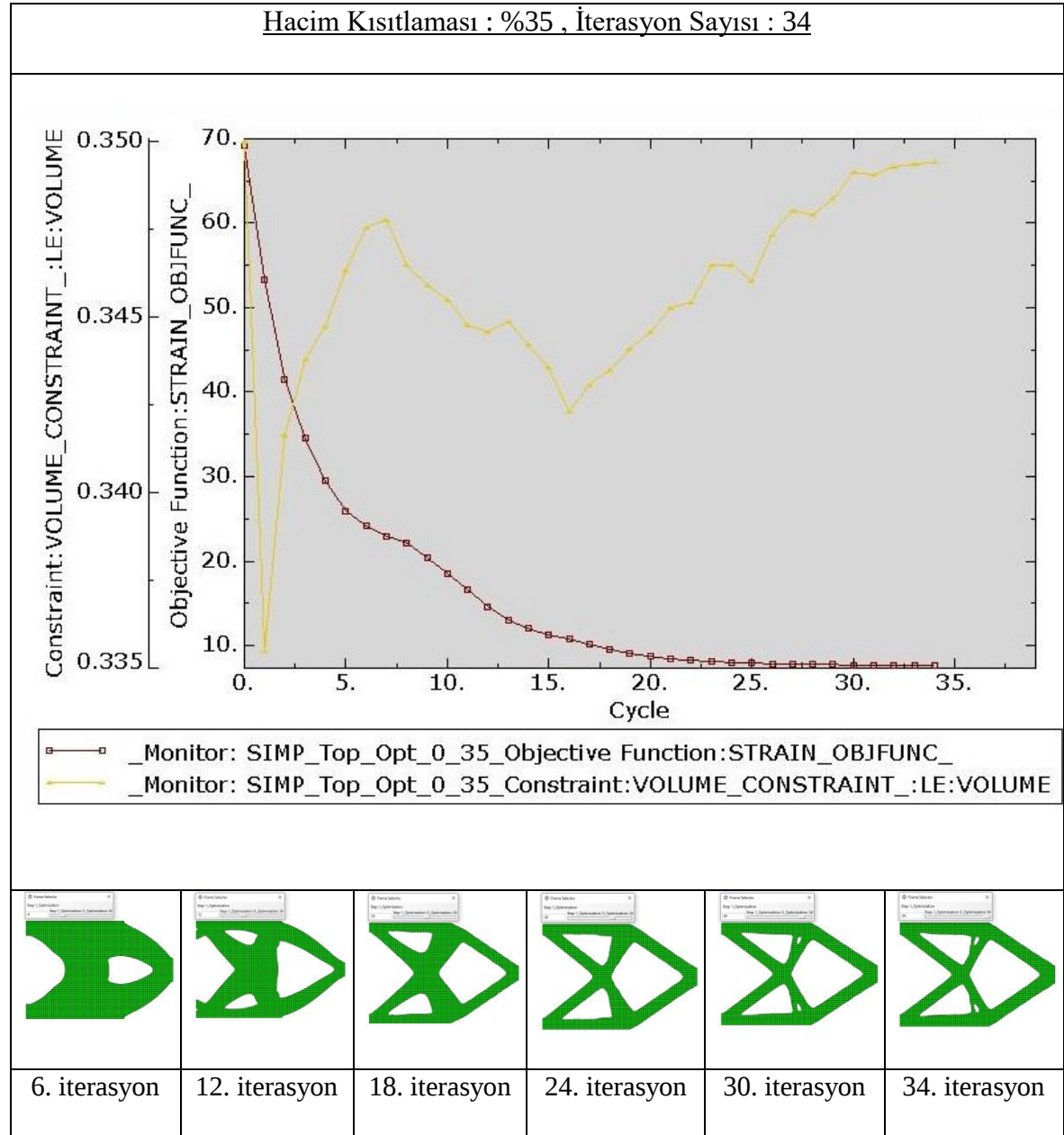
Çizelge 5.3. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



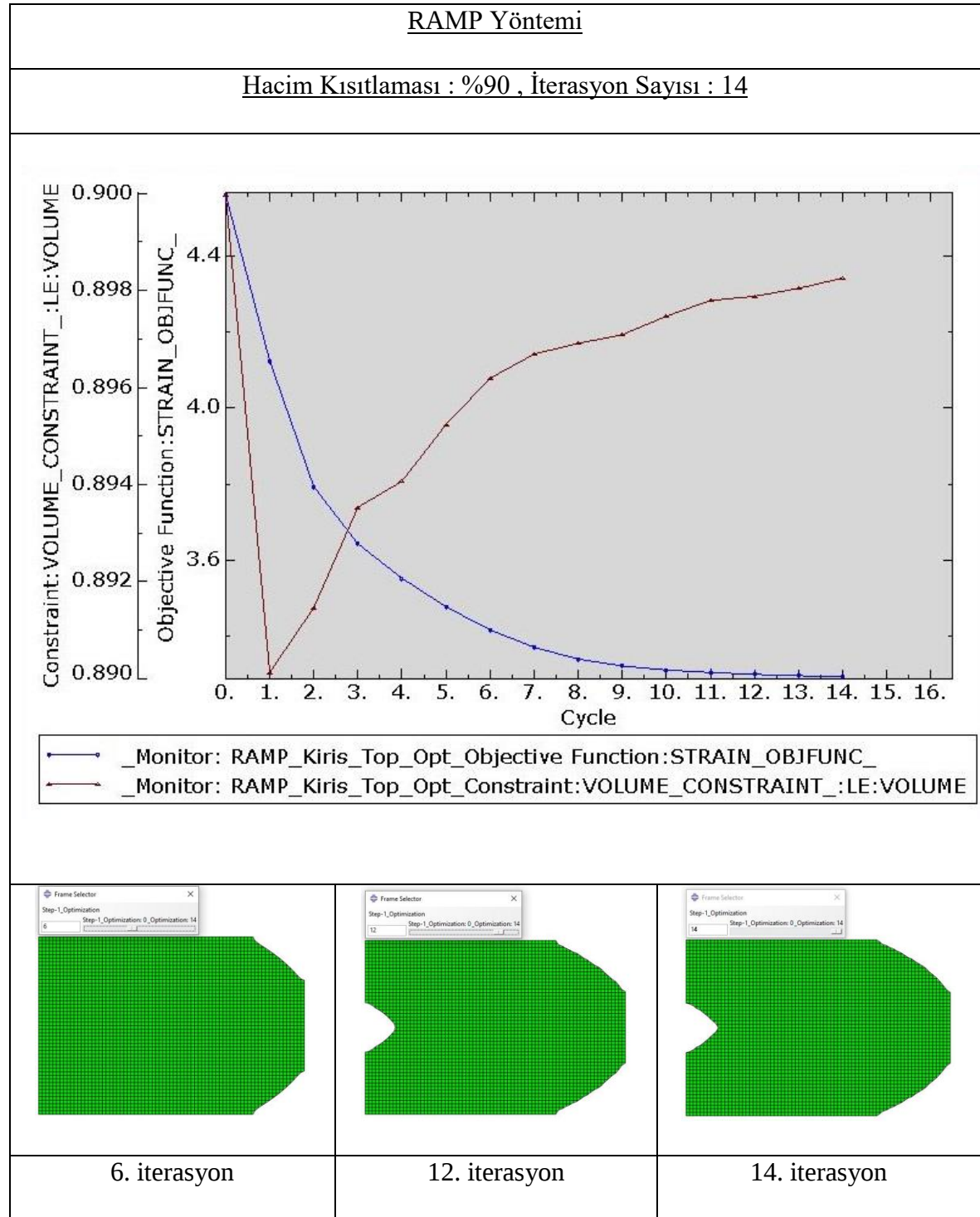
Çizelge 5.3. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



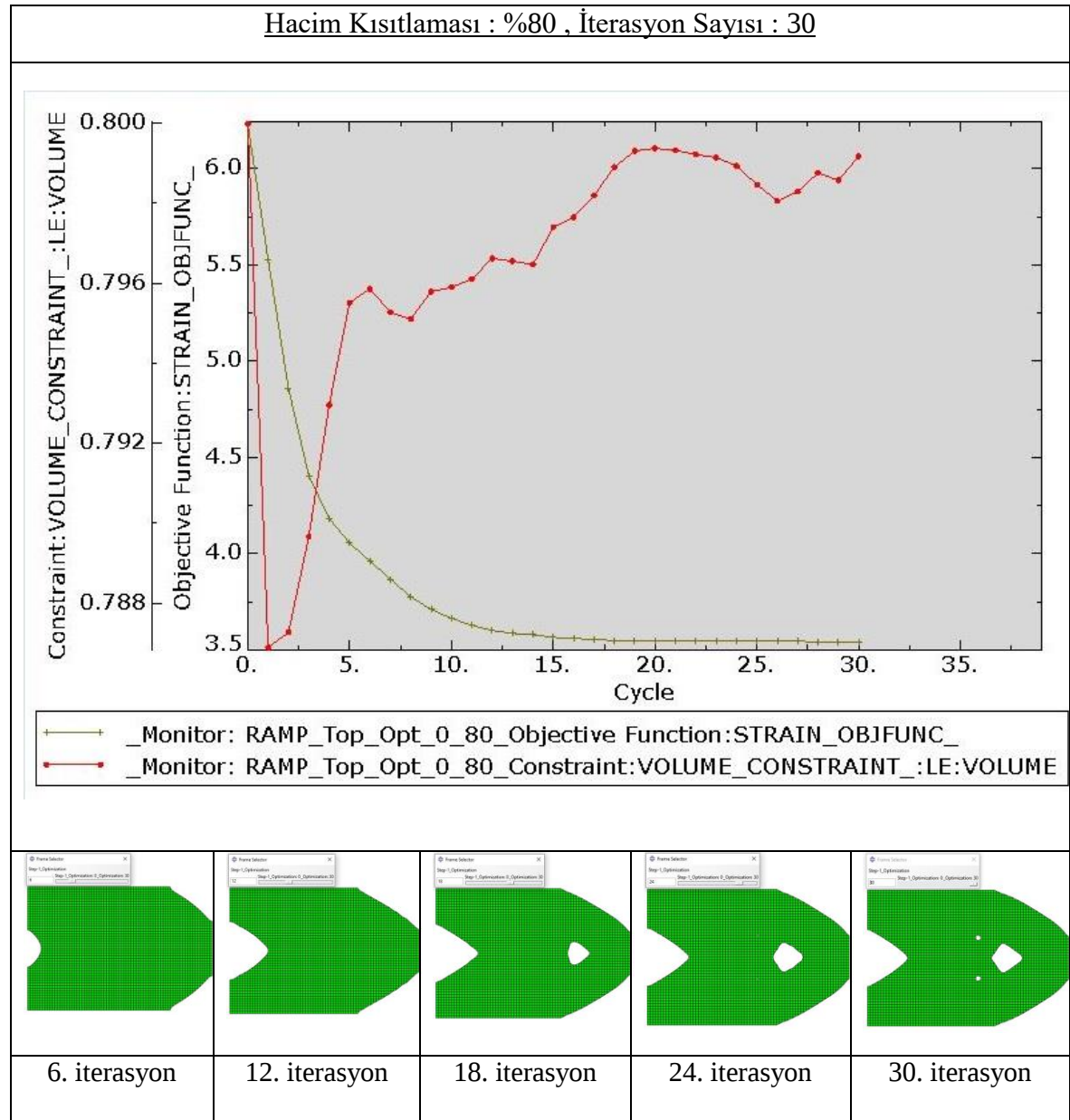
Çizelge 5.3. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



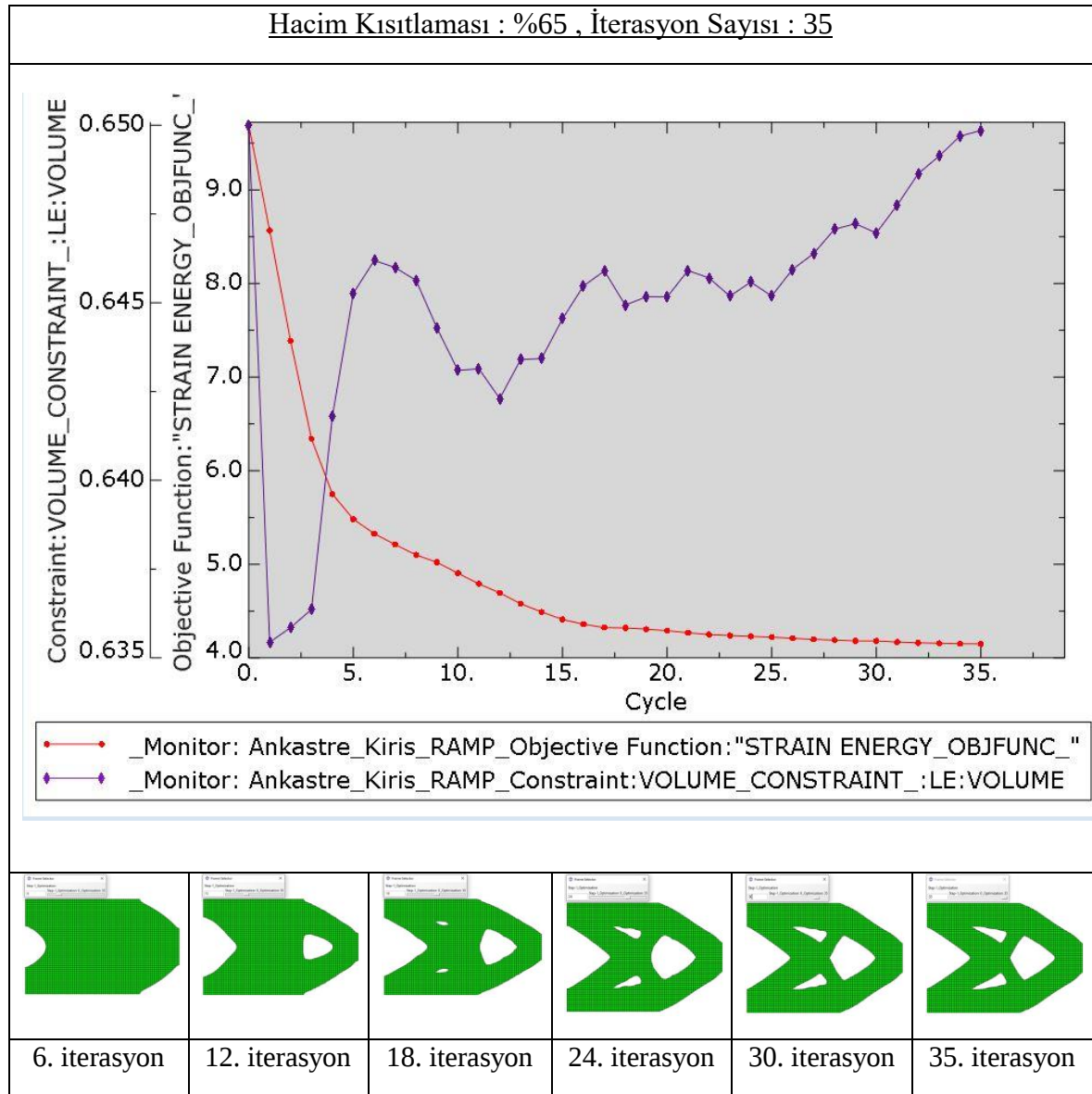
Çizelge 5.4. Farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



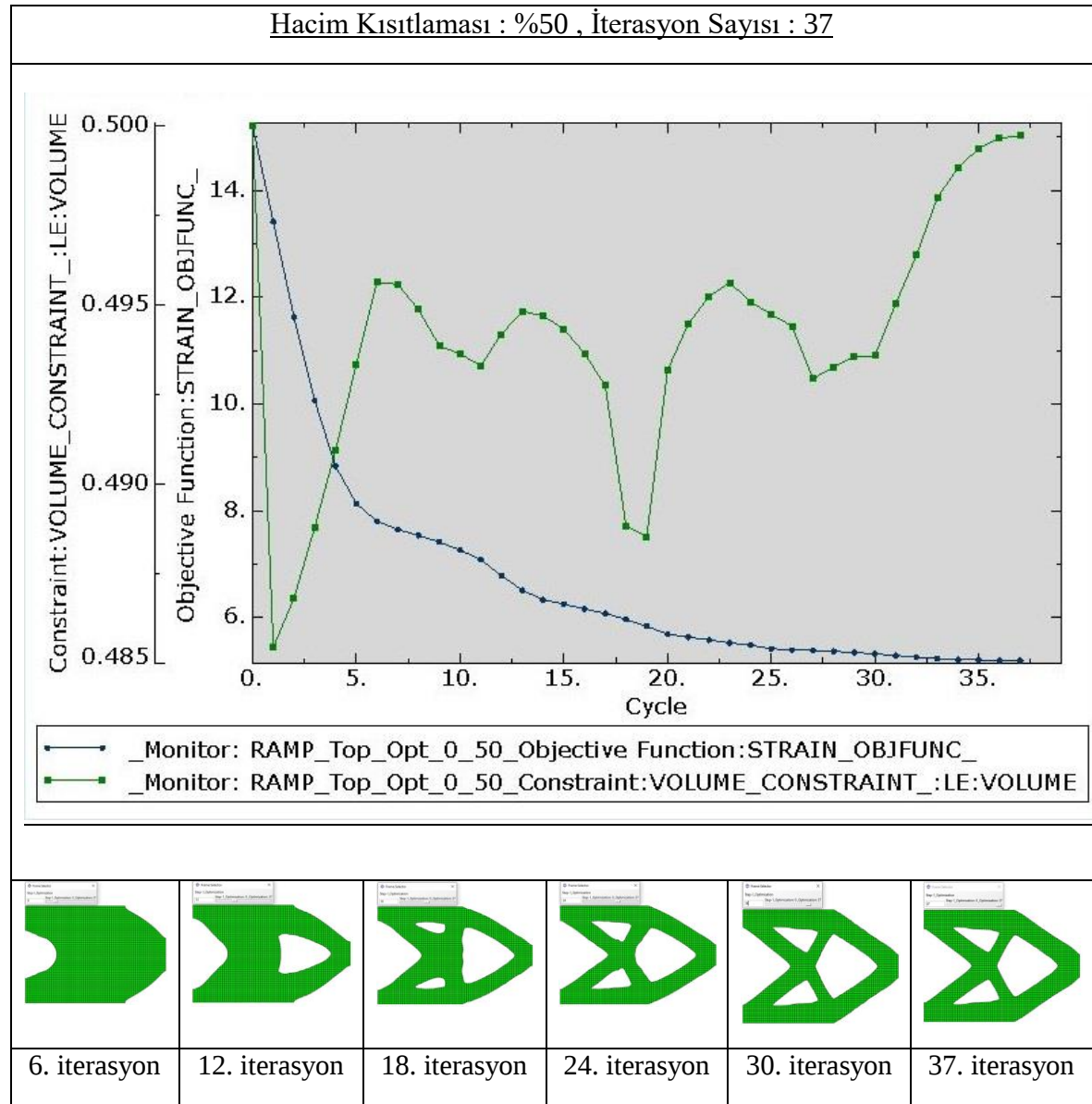
Çizelge 5.4. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



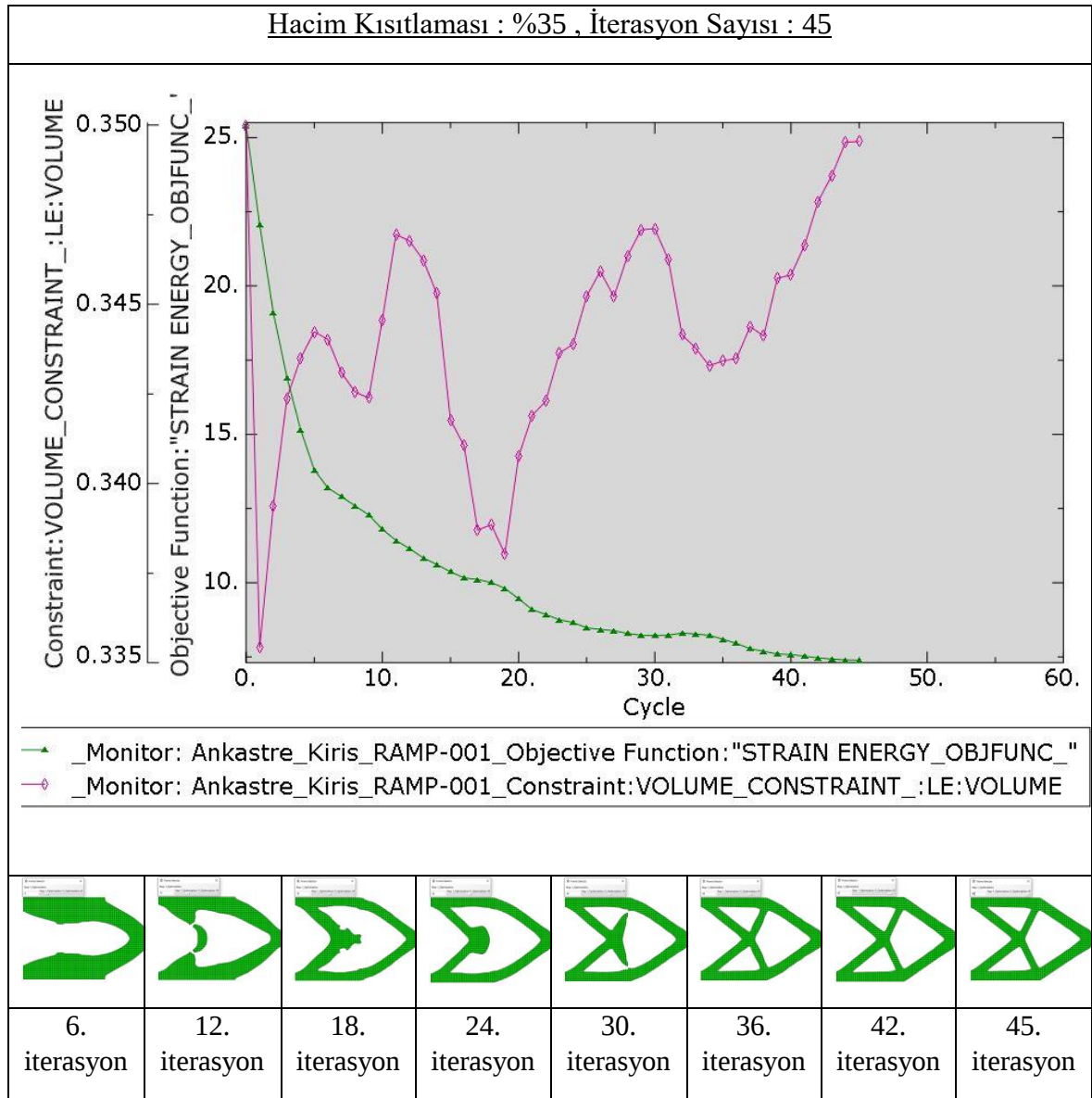
Çizelge 5.4. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



Çizelge 5.4. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi

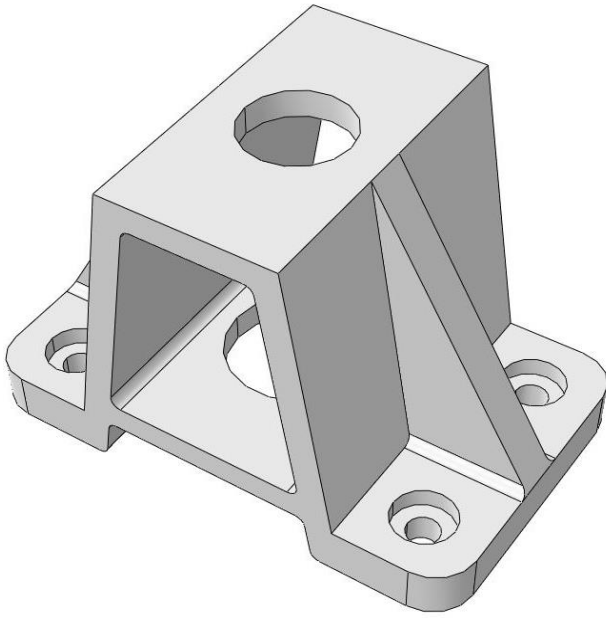


Çizelge 5.4. (devam) Farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi

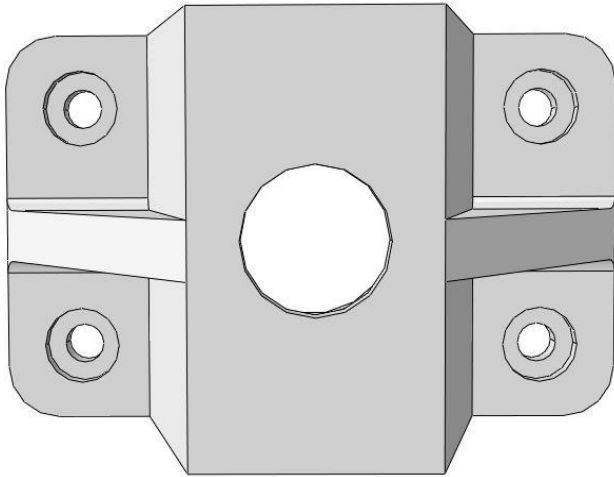


5.2. Vaka 2 – Braket Optimizasyonu Çalışması

SIMP ve RAMP yöntemlerinin performansını değerlendirmek için ele alınan ikinci vakada ise çelik malzeme kullanılan bir braket üzerinde topoloji optimizasyonu sonuçları karşılaştırılmıştır. Braketin sabitleme bölgeleri olarak cıvata bağlantılarının olduğu dört delik mevcuttur ve gelen burulma momentlerinin uygulandığı delik eksenini bulunmaktadır. Yapısal tasarımı gerçekleştirilecek olan braketin işlem görmeyen önceki hali Resim 4.2.1.de izometrik olarak ve Resim 4.2.2.de üstten gösterildiği gibidir.



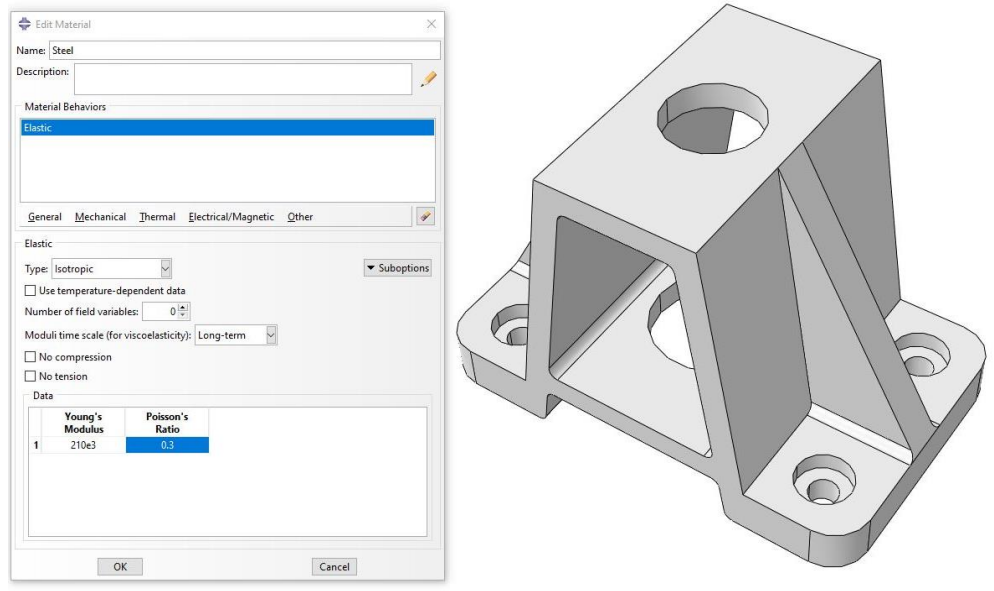
Resim 5.7. Vaka 2’de incelenen braketin izometrik görünümü



Resim 5.8. Vaka 2’de incelenen braketin üstten görünümü

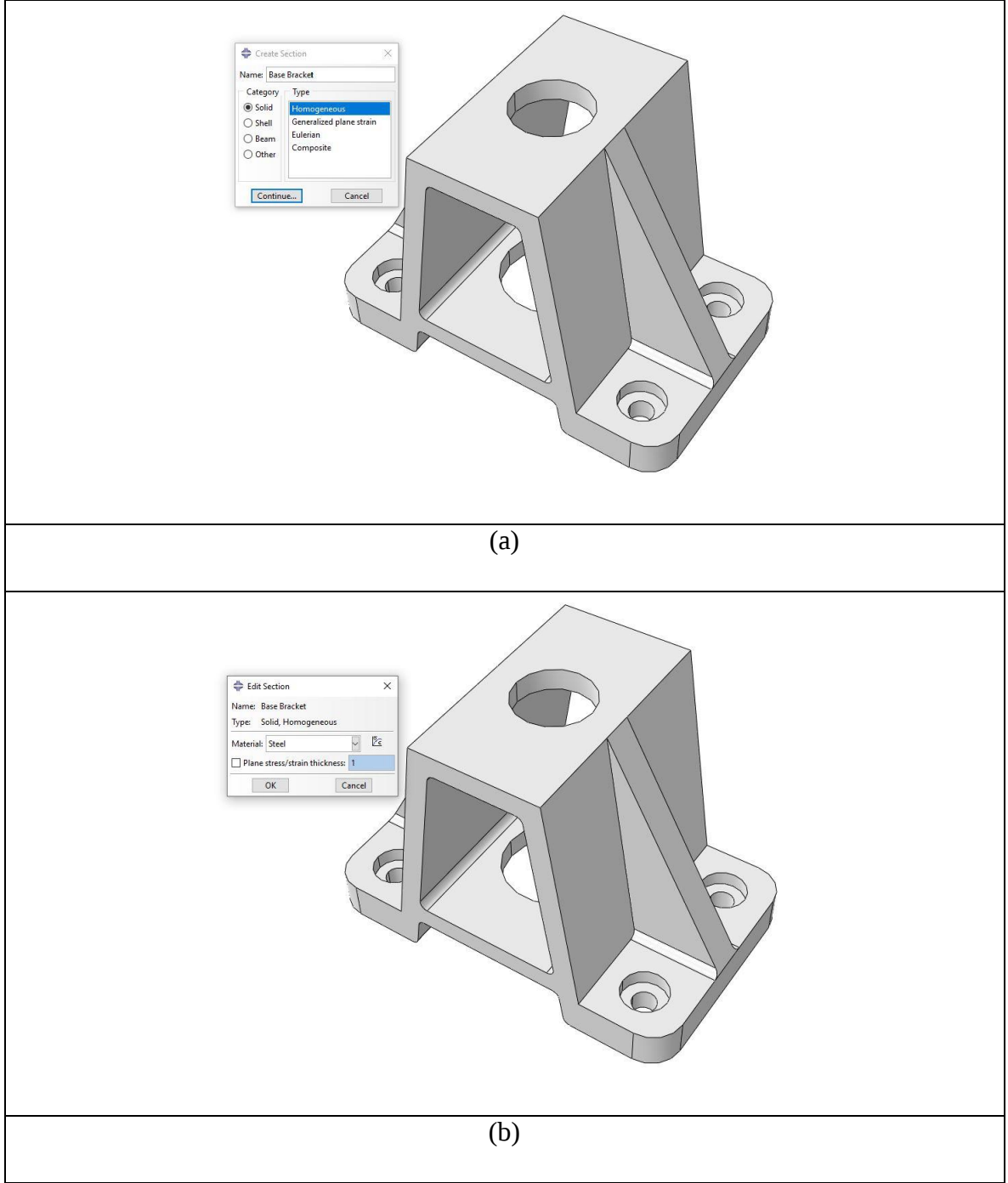
İlk vakada da olduğu gibi Abaqus/CAE programı tercih edilerek çözüm ağı oluşturulmuş ve sonlu elemanlar analizi yöntemi yardımıyla parçanın yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra programın bünyesinde bulunan TOSCA modülü ile de parça üzerinde istenilen iyileştirmeler 2 farklı topoloji optimizasyonu algoritması olan SIMP ve RAMP yöntemleriyle, 5 farklı hacim kısıtlama oranında hedef fonksiyonu olarak da braketin gerinim enerjisinin minimize edilmesi belirlenerek gerçekleştirilmiştir.

Braketin analizi için ilk önce gerekli olan malzeme bilgileri “Materials” başlığında elastisite kısmında girilmiştir. Tercih edilen malzeme ilk vakadakiyle aynı özelliklere sahip çelik olarak belirlenmiştir. Resim 4.2.3.te de görüldüğü gibi Young modülü değeri olarak 210 GPa girilirken, Poisson oranı için ise $\nu = 0.30$ değerleri kullanılmıştır.



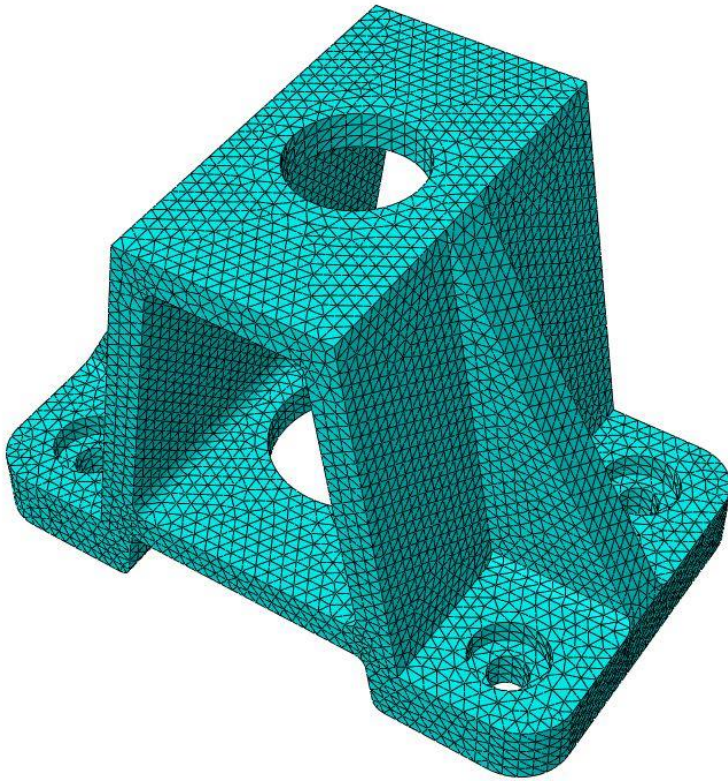
Resim 5.9. Çelik malzeme kullanılan braketin girilen mekanik özellik verileri (Young modülü ve Poisson oranı)

Malzemenin mekanik özellikleri, elastisite başlığı altında Young modülü ve Poisson oranı sekmelerine tanımlandıktan sonra, bu özelliklerin brakete atanması gerekmektedir. Brakette kullanılan malzemenin her yerine eş bir şekilde dağıldığı ve braketin kısımlara ayrılmamış ana bir gövdeden oluştuğu söylenebilmektedir. Bu brakete malzeme özelliklerinin aktarımı için model ağacı kısmında bulunan Section Assignment kullanılarak braket çizim bölgesinde seçilip, açılan pencerede seçilen bölümle ilgili homojen bir katı olduğu tercih edilerek istenilen malzeme özellikleri braketin bütün hacmine atanır.



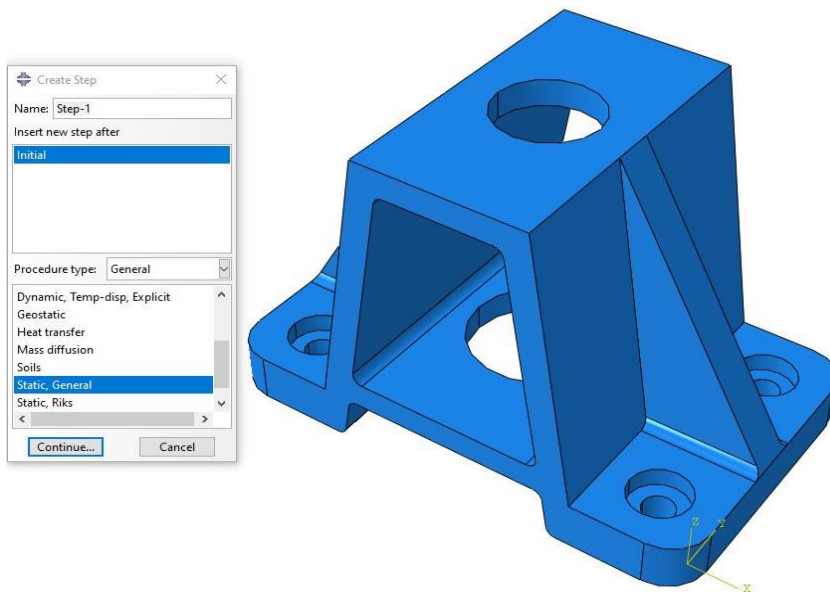
Resim 5.10. Braketin bölüm atamasının uygulanması

Atamanın yapılmasıyla braketin bütün hacminde mekanik özellikler tanımlanmıştır. Bunun sonucunda artık parçaya uygulanacak olan sonlu elemanlar analizi için ağ girdileri girilebilmektedir. Braketin daha detaylı incelenebilmesi için seçilen ağ elemanı büyüklüğü 0.1 birimdir. Buna ağ sınırı da denilmektedir. Tanımlanan ağ sınırı ile Resim 4.2.5.te gösterildiği üzere toplamda 86578 birim sonlu ağ elemanı atanmıştır. Bu elemanların tasarım alanında birleşmesiyle çözüm ağı elde edilmiştir.



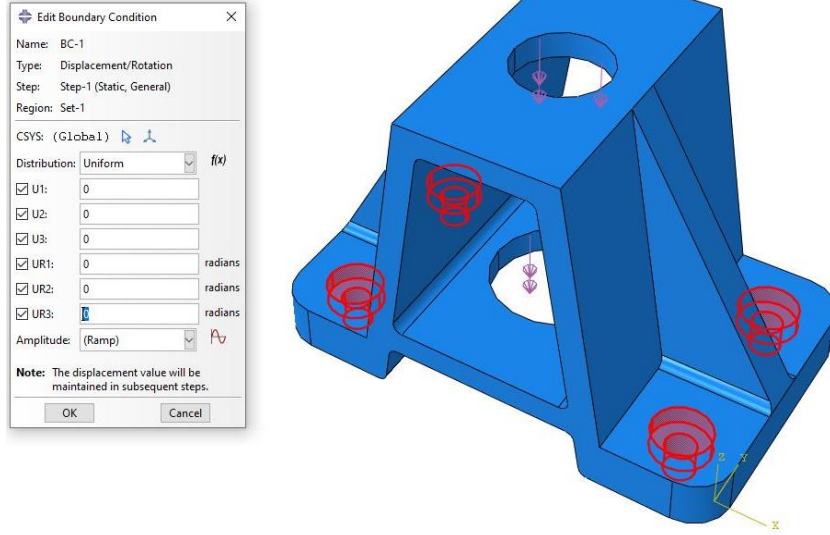
Resim 5.11. Braketin sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuş çözüm ağı

Ağ elemanlarının atanması sonucu oluşan çözüm ağından sonra, braket için uygulanacak analiz tipini belirlememiz gerekmektedir. Ankastre kirişte de seçtiğimiz gibi braket için de incelenmesi hedeflenen tip genel ve statik bir analizdir.



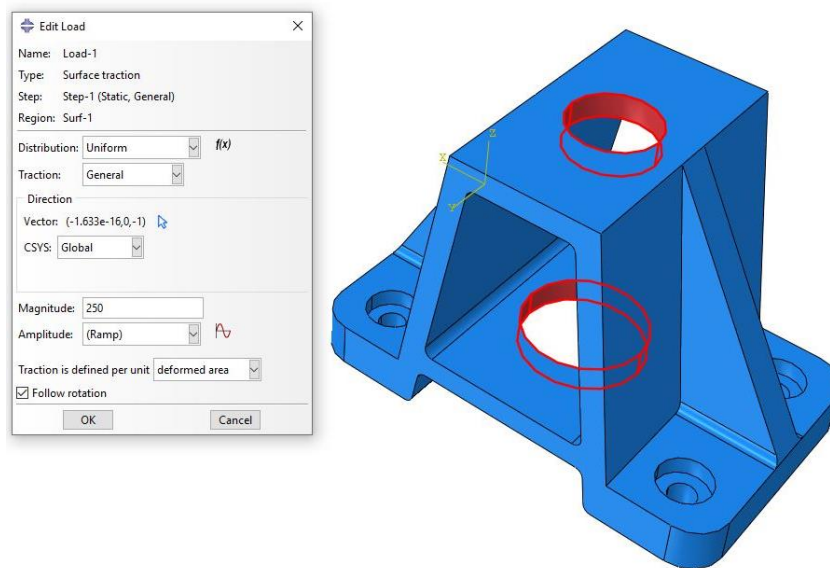
Resim 5.12. Brakete uygulanacak analiz tipinin seçimi

Analizin değişkenleri olan sınır koşulları ve yükler brakete tanımlanacaktır. Parça üzerine gelen kuvvet ve sabitleme bölgeleri seçilmiştir. Cıvata bağlantılarının olduğu dört delik, her yönden sınırlandırılmıştır.



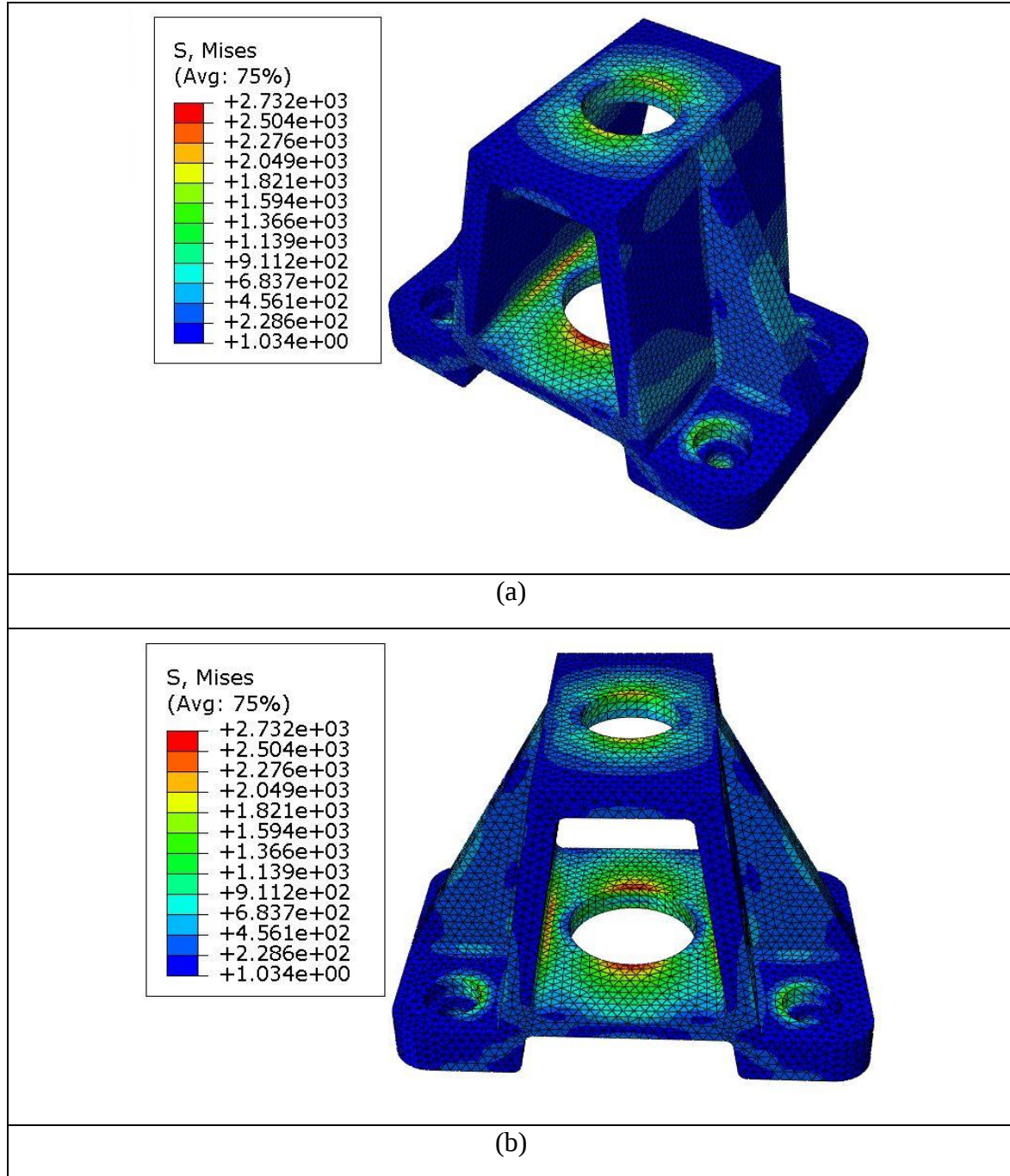
Resim 5.13. Braketin sınır koşulları

Yük ise braketin ortasında bulunan deliklerin ekseninden, sahip olduğu 2 delik için 250 N olarak aşağı yönlü uygulanmıştır. 250 N parça üzerinde Resim 4.2.8.de gösterilmiştir.



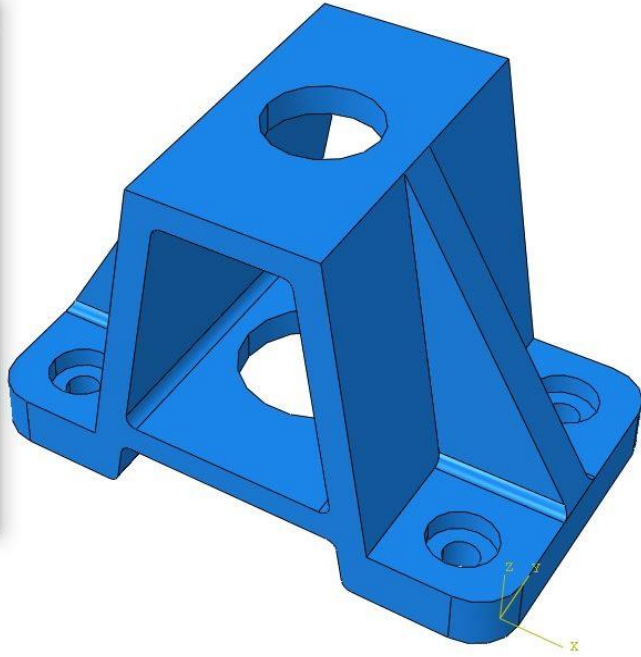
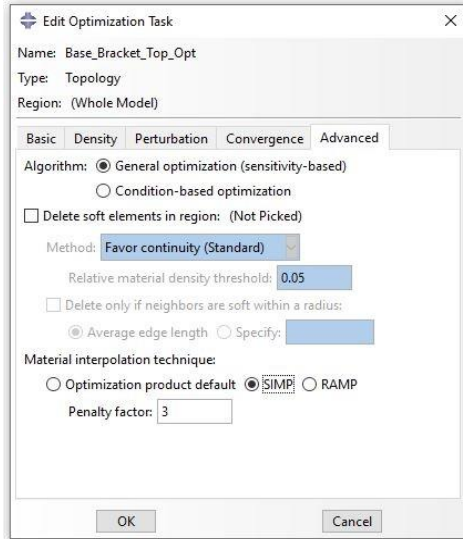
Resim 5.14. Brakete uygulanacak olan yükün tanımlanması

Sınır koşullarını ve yükünü tanımladığımız braketin sonlu elemanlar analizi incelenmek üzere başlatılmıştır. Analizin tamamlanmasıyla birlikte uygulanan yük sonrası oluşan von Mises gerilmeleri ve bu gerilmelerin braket üzerindeki dağılımları analiz görevi üzerindeki sonuçlar kısmından incelendiğinde Resim 4.2.9.daki sonuçlar gözlemlenmiştir.



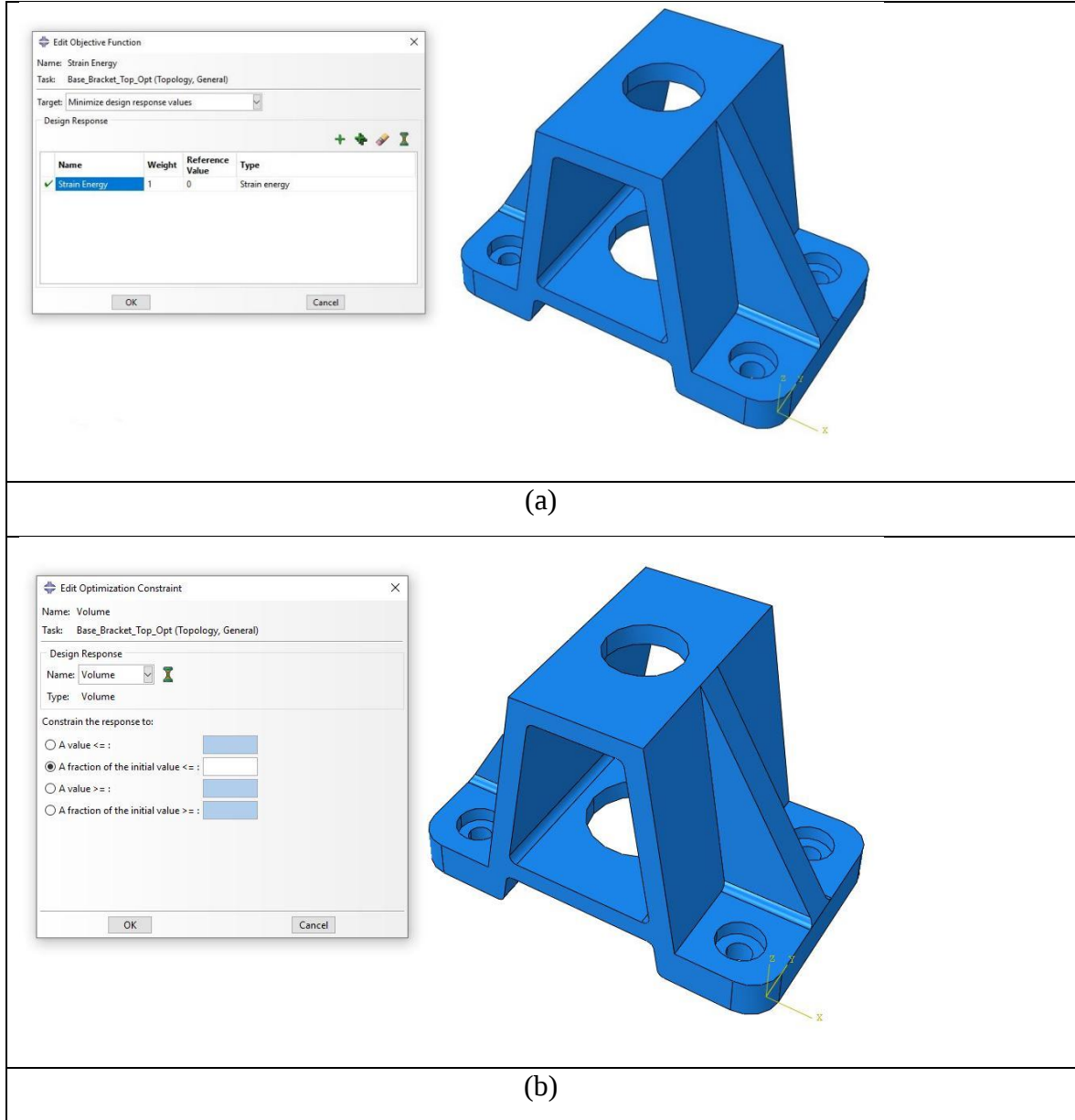
Resim 5.15. Sonlu elemanlar analizi uygulanmış braketten gözlemlenen von Mises gerilmelerinin; (a) izometrik görünümü (b) önden görünümü

Yükün uygulandığı kısımlarda ve etrafında, ayrıca sınır koşulu olarak tanımlanmış olan cıvata bağlantılarının olduğu dört deliğin etrafında von Mises gerilmelerinin daha çok olduğu analiz sonucunda elde edilmiştir. Bu bilgiler göz önünde bulundurularak braketten optimizasyon görevi oluşturulmaya hazır hale gelmiştir. Parçada ilk uygulamada ankastre kırışte yapıldığı gibi, topoloji optimizasyonu algoritmalarından olan SIMP ve RAMP yöntemlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Her iki optimizasyon yönteminde de hedef fonksiyonu olarak gerinim enerjisinin minimize işlemi uygulanırken parça 5 farklı hacim oranına düşürülmüş ve bu koşullarda optimizasyonlarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optimizasyonda kullanılacak cezalandırma katsayısı olarak 3 kabul edilmiştir.



Resim 5.16. Topoloji optimizasyonu uygulanacak braketten optimizasyon algoritmasının seçimi ve cezalandırma katsayısının belirlenmesi

Tasarım değişkenleri olarak yukarıda da bahsedildiği gibi hacim ve gerinim enerjisi kullanılmıştır. Hedef fonksiyonunda da seçilen tasarım değişkeninin yani braketin gerinim enerjisinin minimize edilmesi amaçlanmıştır, bu sırada ise parçanın hacminin kademeli olarak azaltılması istenmiştir.



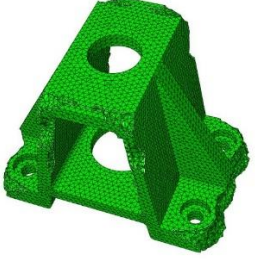
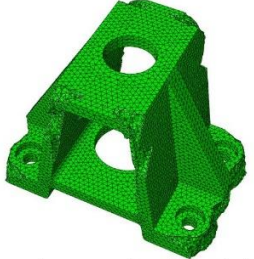
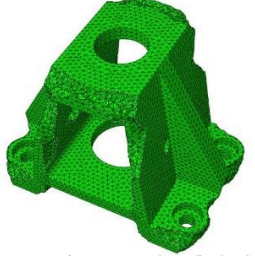
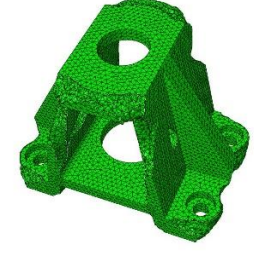
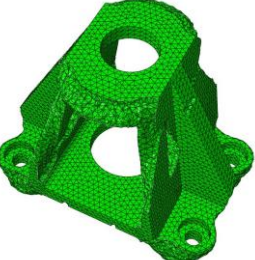
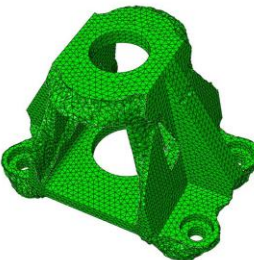
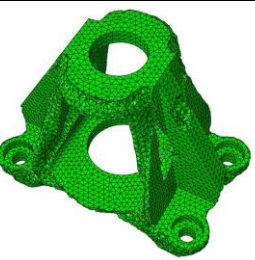
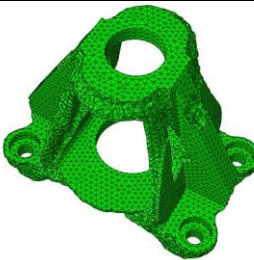
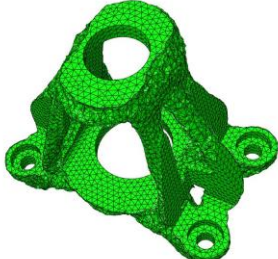
Resim 5.17. Brakette hedef fonksiyonu ve uygulanacak kısıtlamanın tanımlanması

Braketin SIMP ve RAMP algoritmalarıyla optimize işleminin kıyaslanması için hacimsel olarak sırasıyla:

- %90
- %80
- %65
- %50
- %35

incelenmiştir. Optimizasyonda tanımlanan değişkenler ve hedef fonksiyonları doğrultusunda elde edilen verilen aşağıda gösterilmiştir:

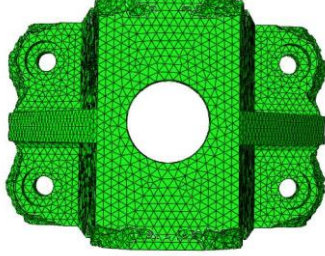
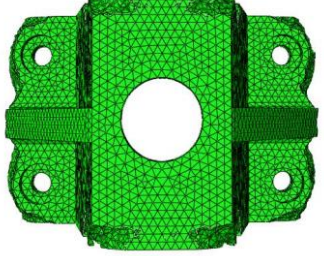
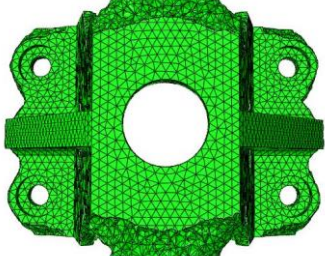
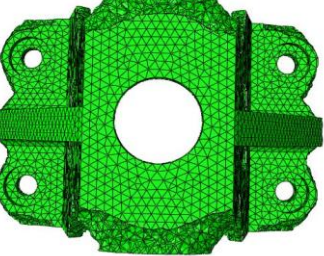
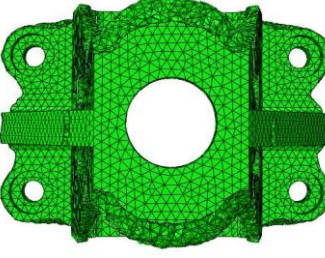
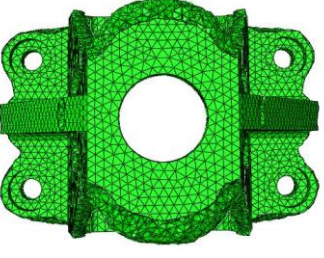
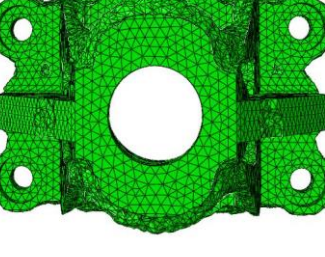
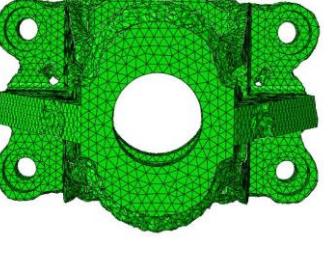
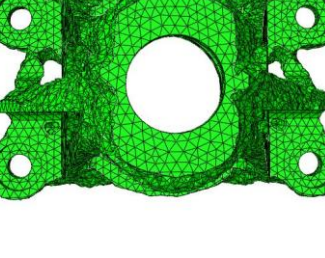
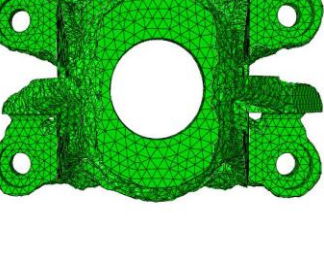
Çizelge 5.5. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketten SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının izotmetrik görüntüleri

Kısıtlama	SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
%90		
%80		
%65		
%50		
%35		

Çizelge 5.6. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketten SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin izometrik görüntüleri

SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
Hacim Kısıtlama : % 90	
Hacim Kısıtlama : % 80	
Hacim Kısıtlama : % 65	
Hacim Kısıtlama : % 50	
Hacim Kısıtlama : % 35	

Çizelge 5.7. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketten SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının üstten görünüşleri

Kısıtlama	SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
%90		
%80		
%65		
%50		
%35		

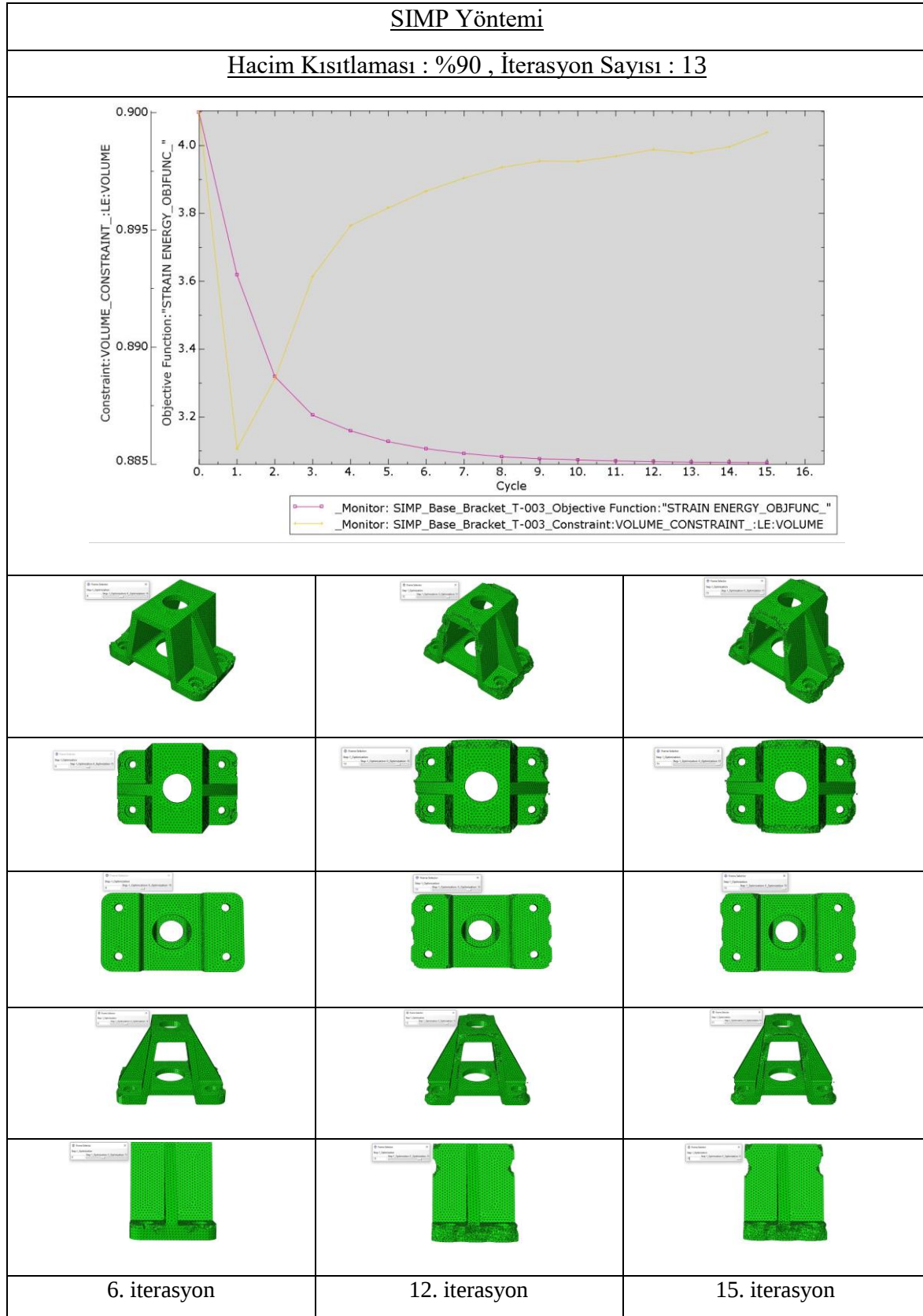
Çizelge 5.8. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış braketle SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin üstten görünüşleri

SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
Hacim Kısıtlama : % 90	
Hacim Kısıtlama : % 80	
Hacim Kısıtlama : % 65	
Hacim Kısıtlama : % 50	
Hacim Kısıtlama : % 35	

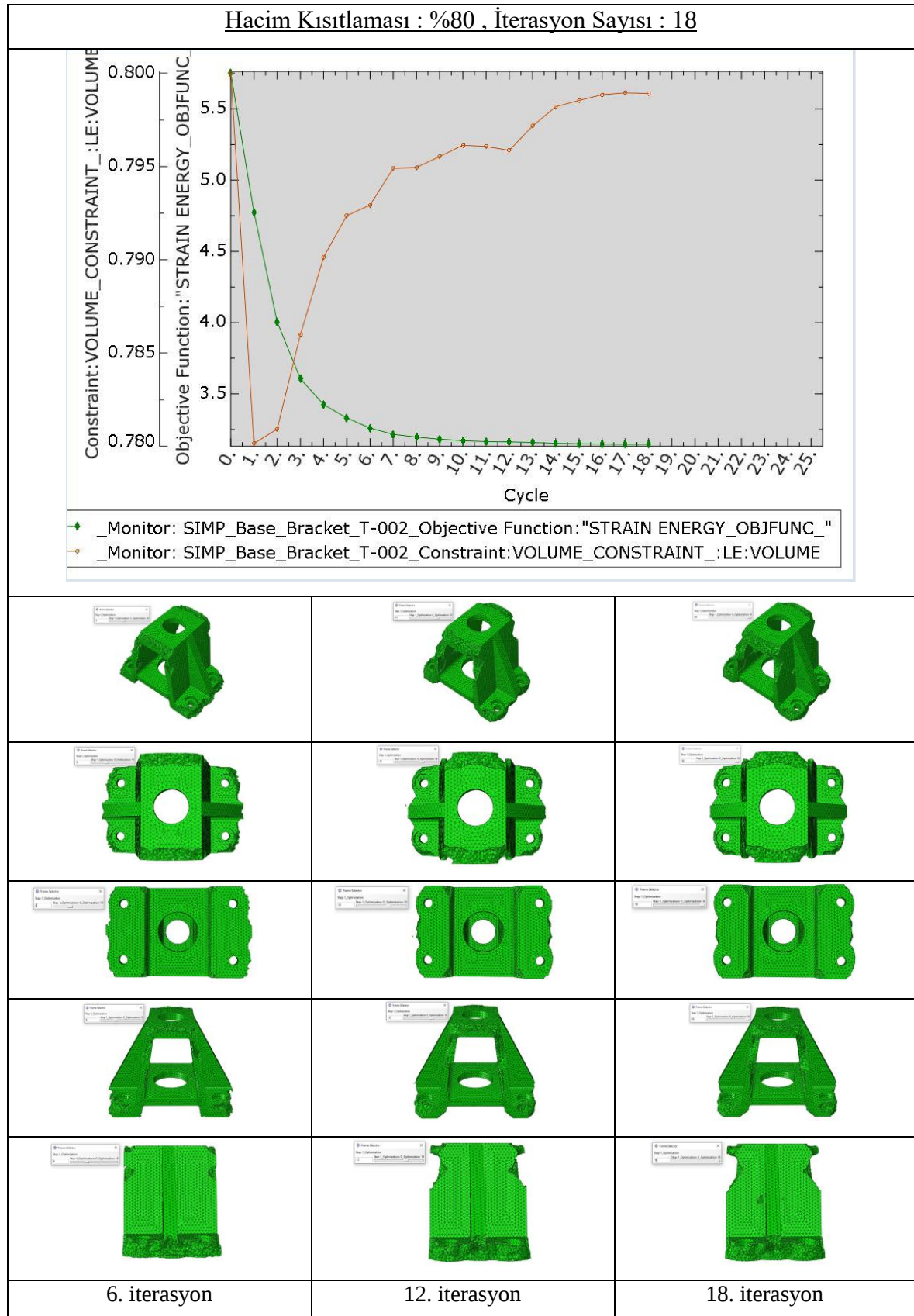
Braketin tasarım değişkenleri hesaba katılarak iyileştirme işlemi uygulanırken hedeflenen hacim kısıtlaması ve gerinim enerjisine ulaşma doğrultusunda iterasyon sayıları da değişmiştir. Hedef fonksiyonunun gerinim enerjisinin minimize edilmesi durumunda hacim kısıtlaması başlangıç tasarımından %35'e dūřürüldükçe iterasyon sayısının hem SIMP algoritmasında hem de RAMP algoritmasında arttığı gözlemlenmiştir.

SIMP ve RAMP uygulanan parçanın alt gövdesinde uygulanan iyileştirmeler sırasında oluşan farklılıklar alınan ekran görüntülerinde ortaya konulmuştur. Ayrıca von Mises gerilmelerinin oluştuğu bölgelerdeki en alt değerler ile üst sınır değerleri iki algoritma için de farklılık göstermiştir. Parçalardan uzaklaştırılacak elemanlar bu değerler doğrultusunda parçanın özelliğini kaybetmeden uzaklaşması sağlanmıştır. Hacim kısıtlaması %35'e doğru indikçe oluşan farklılıklar daha net gözlemlenmiştir.

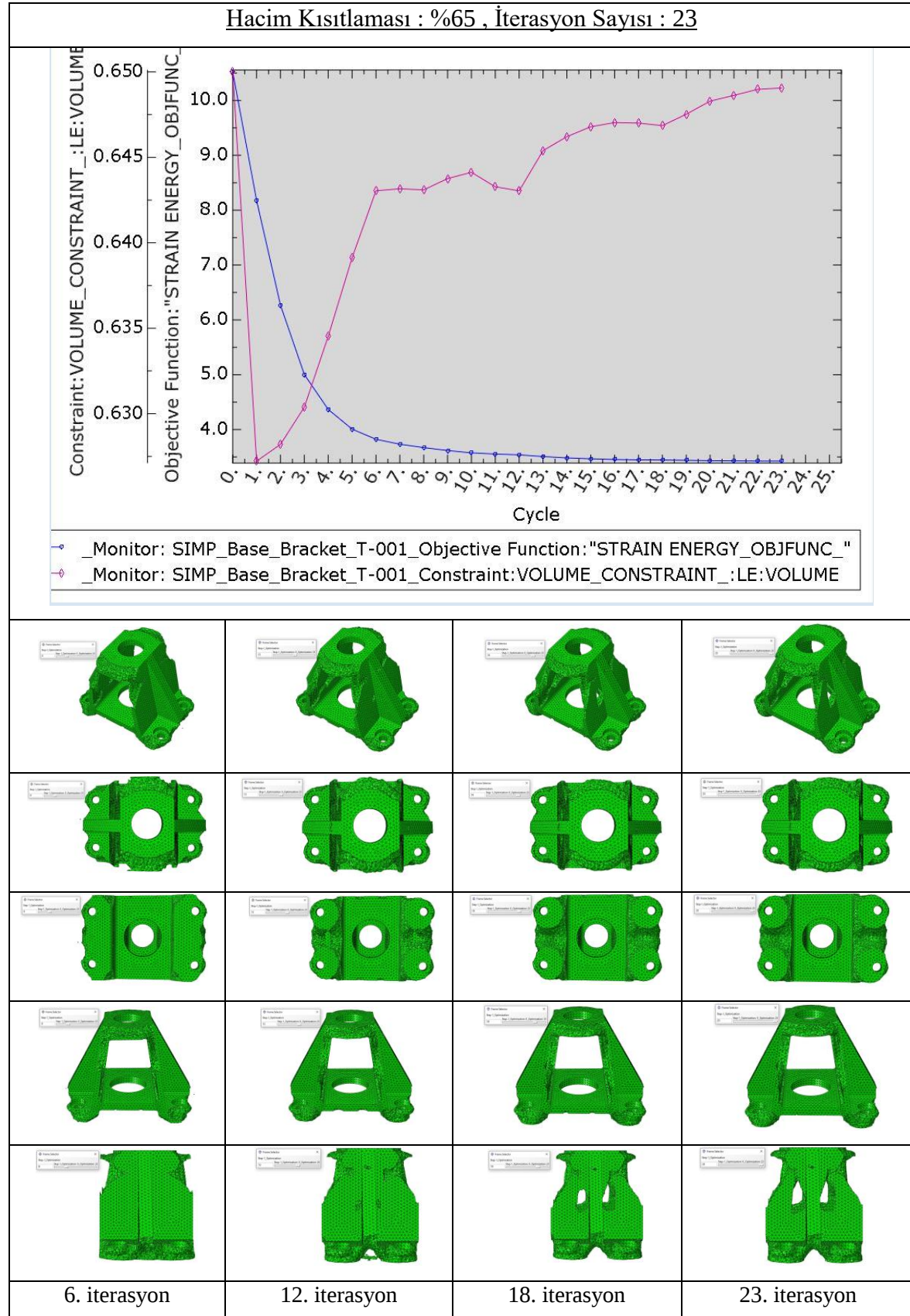
Çizelge 5.9. Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



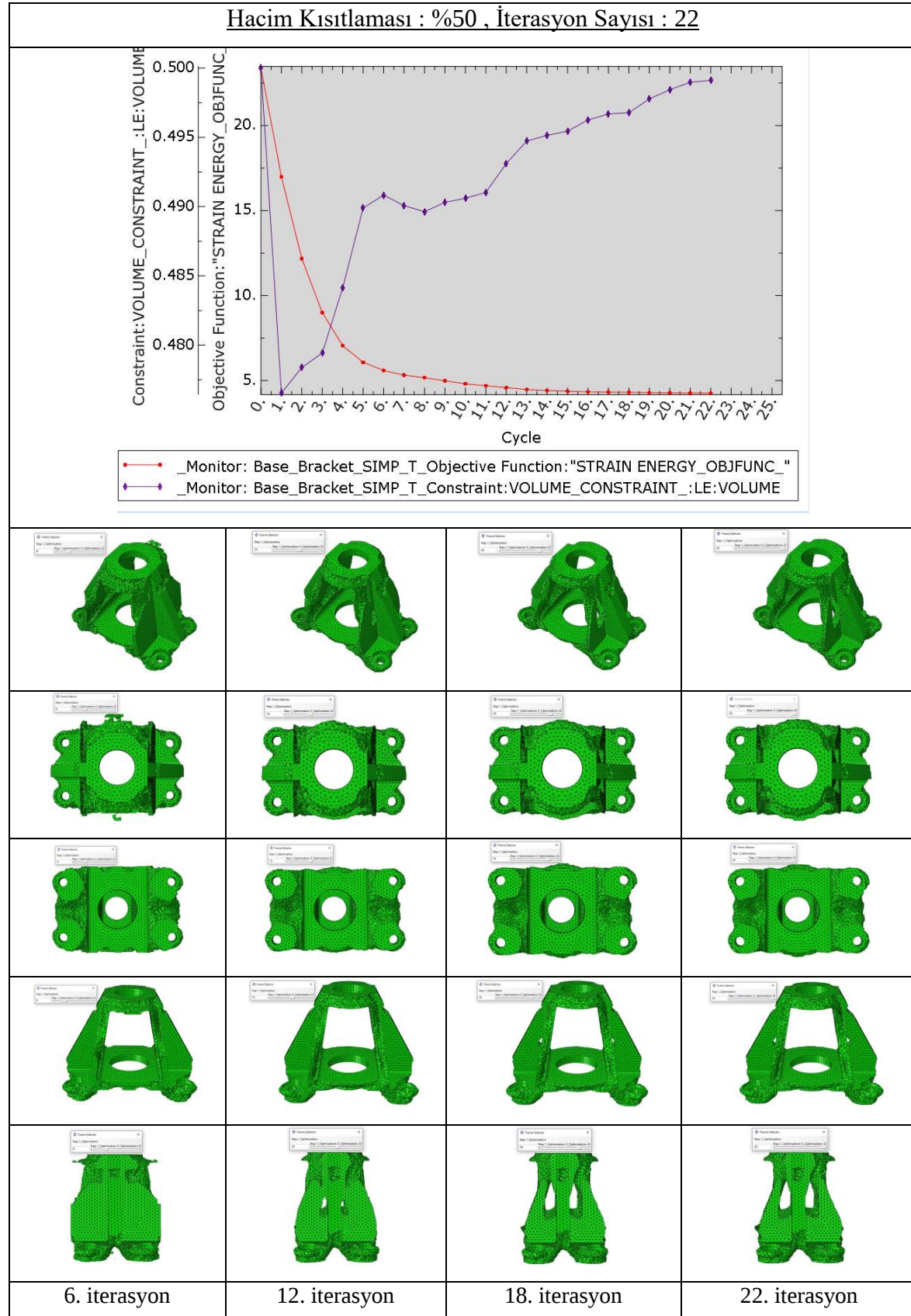
Çizelge 5.9. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



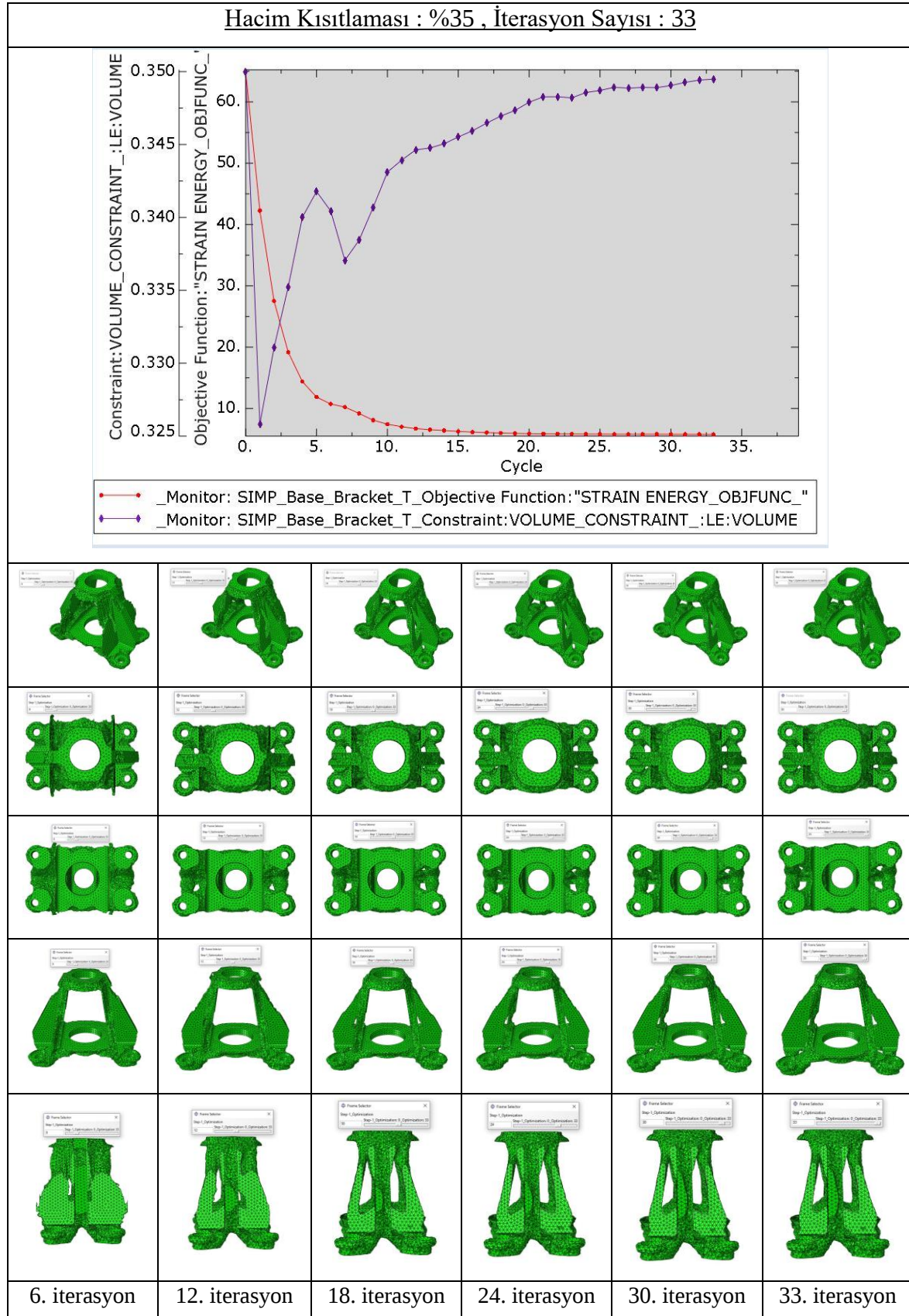
Çizelge 5.9. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



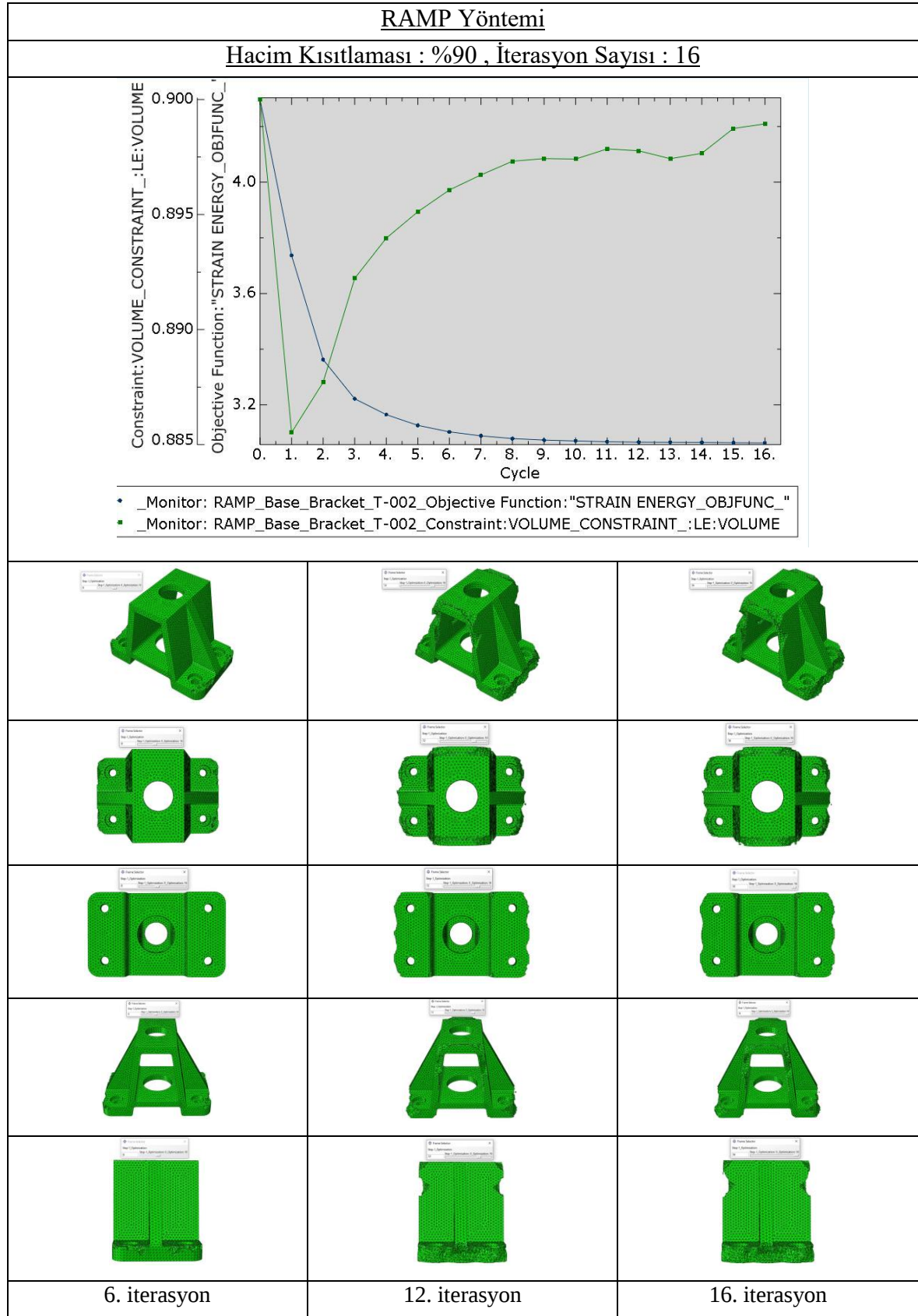
Çizelge 5.9. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



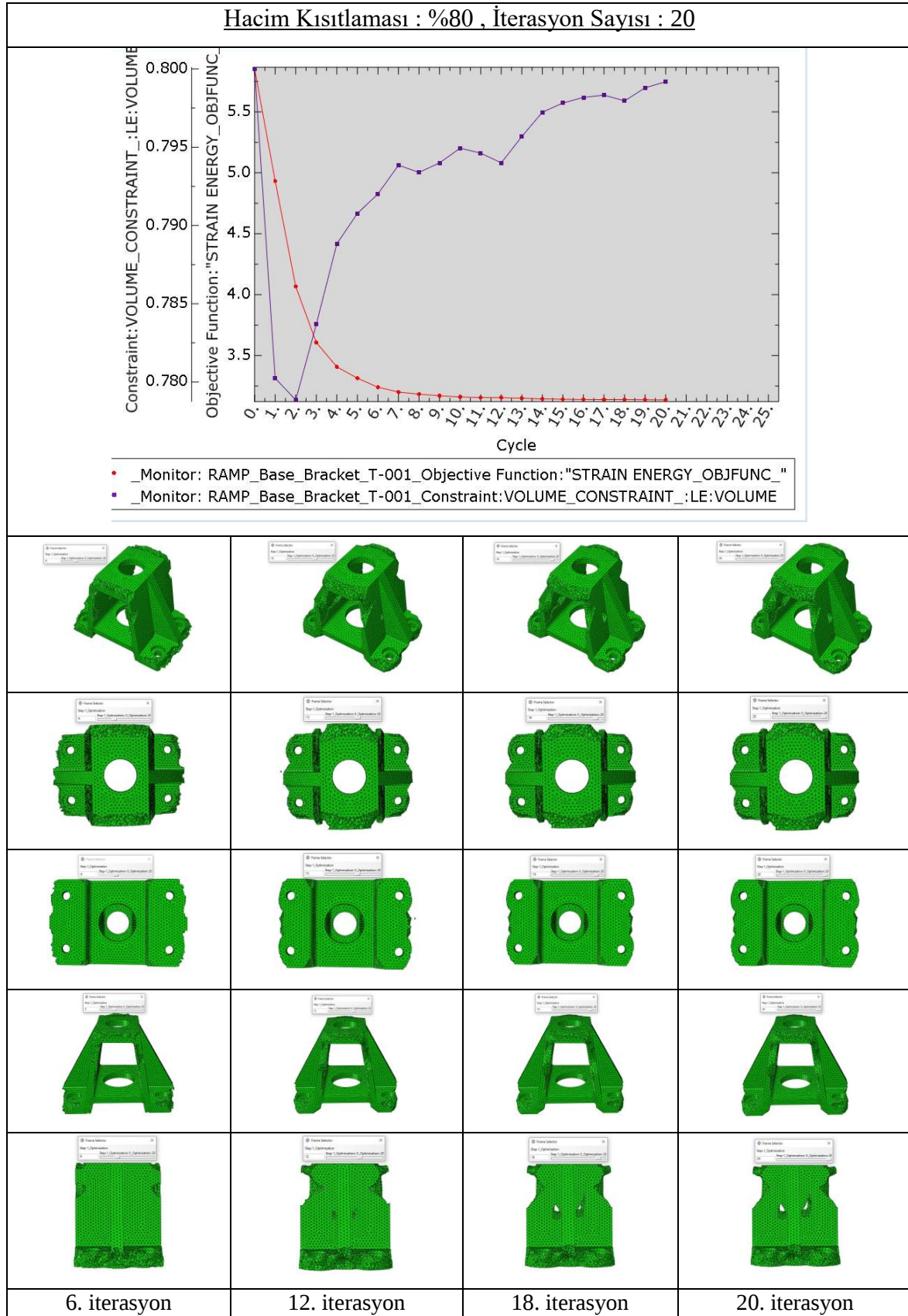
Çizelge 5.9. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



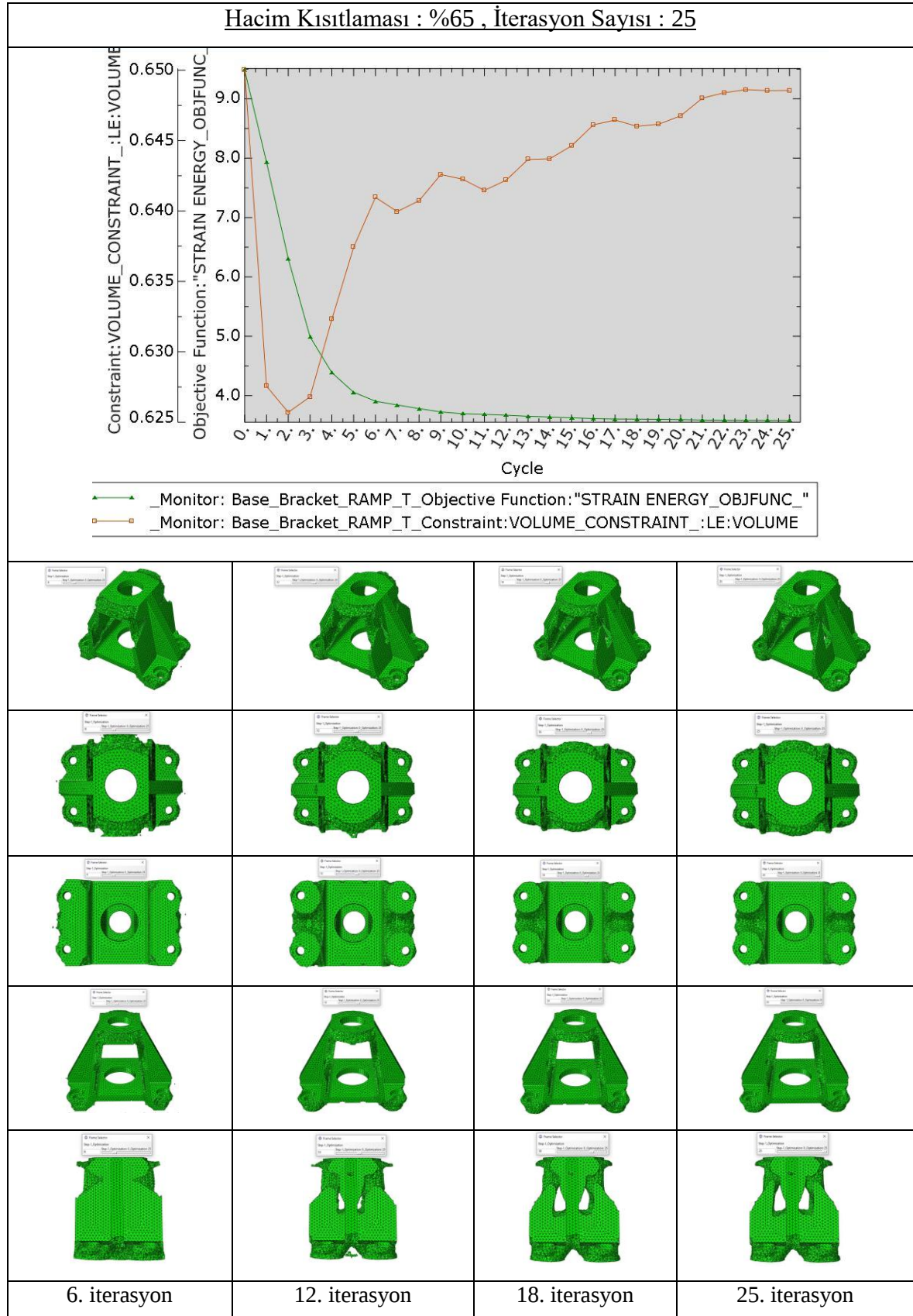
Çizelge 5.10. Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



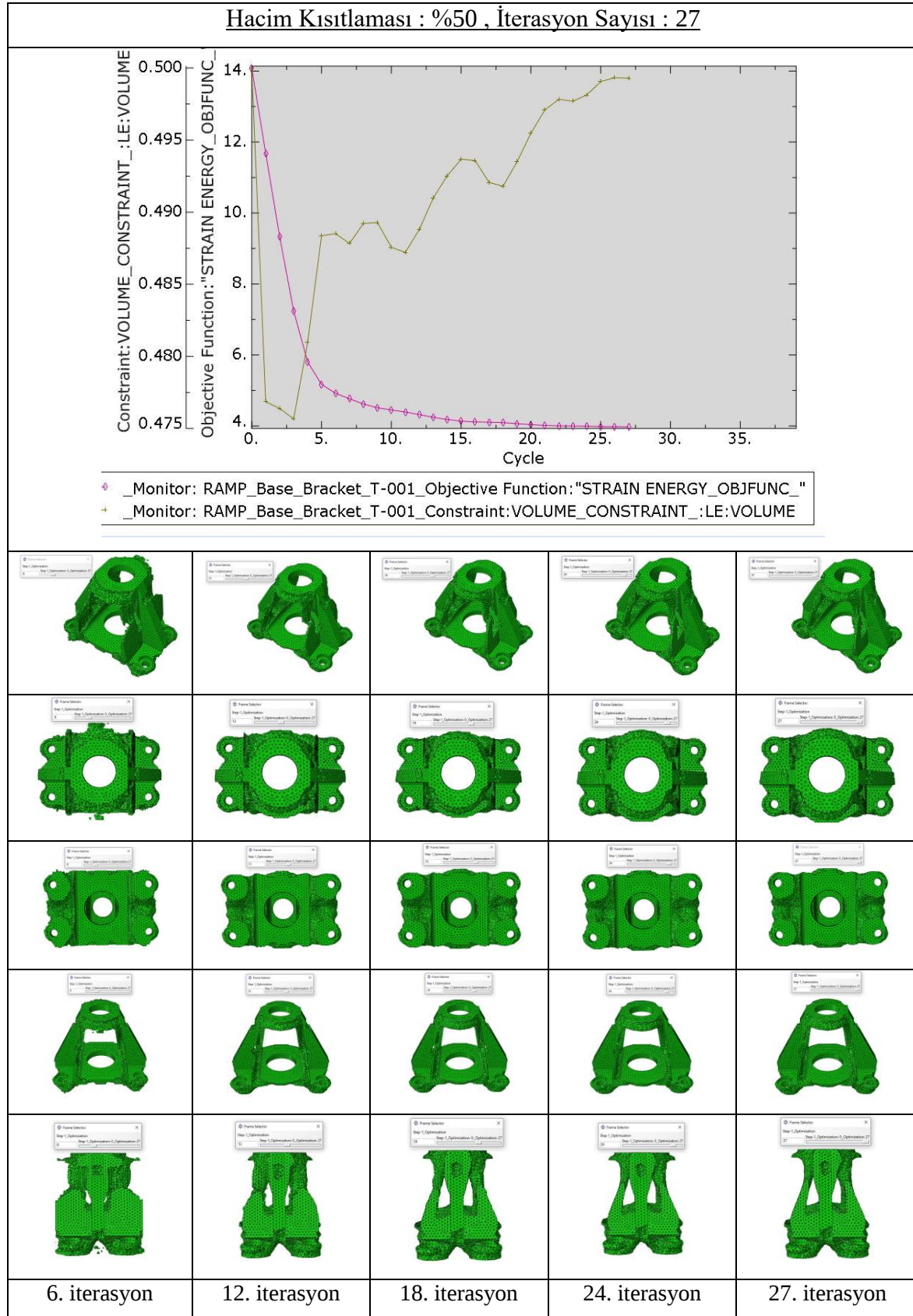
Çizelge 5.10. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



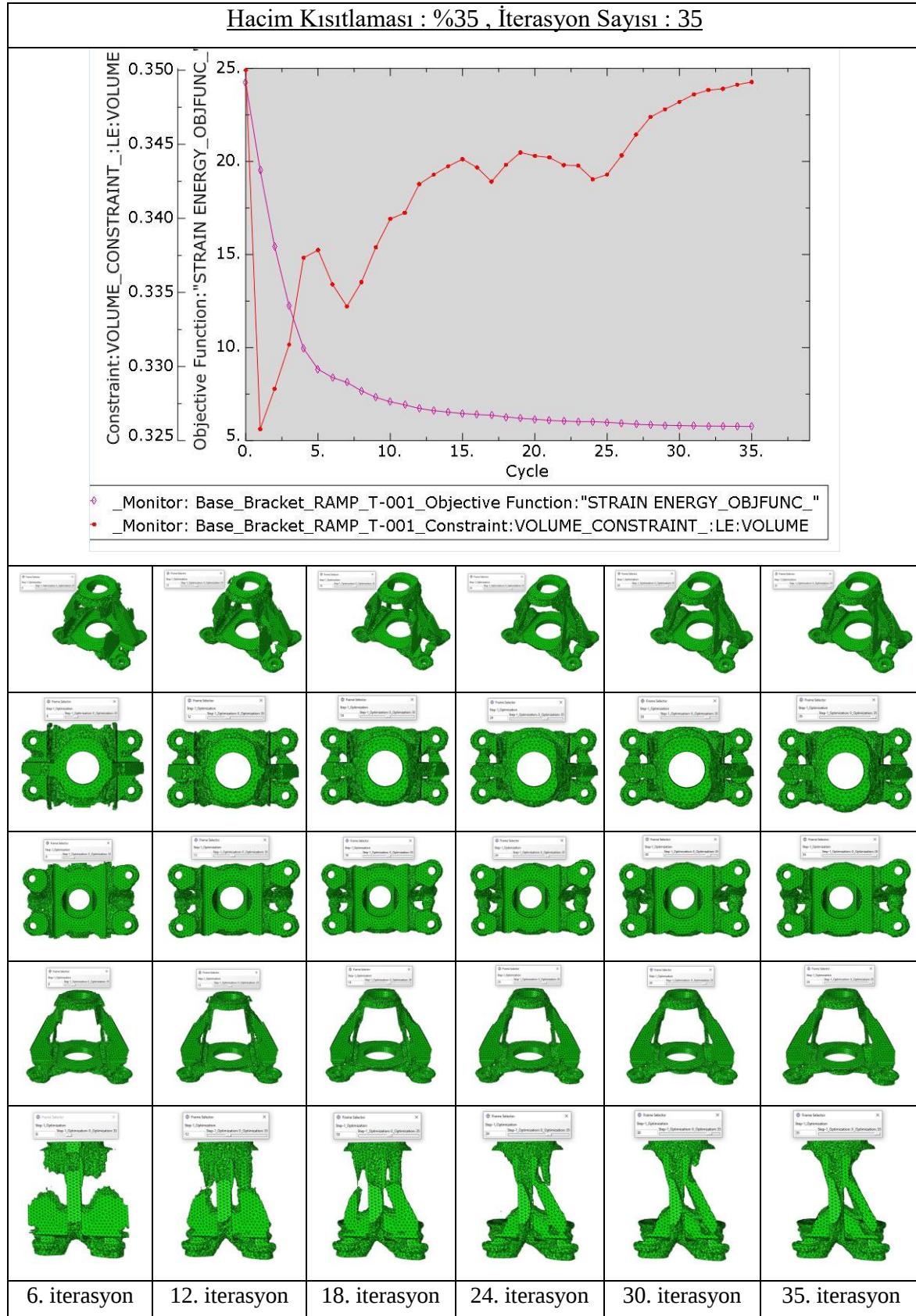
Çizelge 5.10. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



Çizelge 5.10. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi

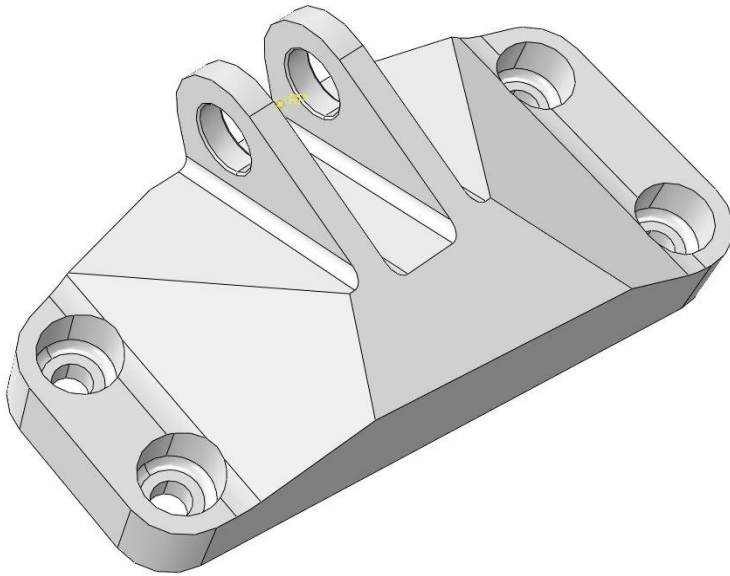


Çizelge 5.10. (devam) Brakete uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi

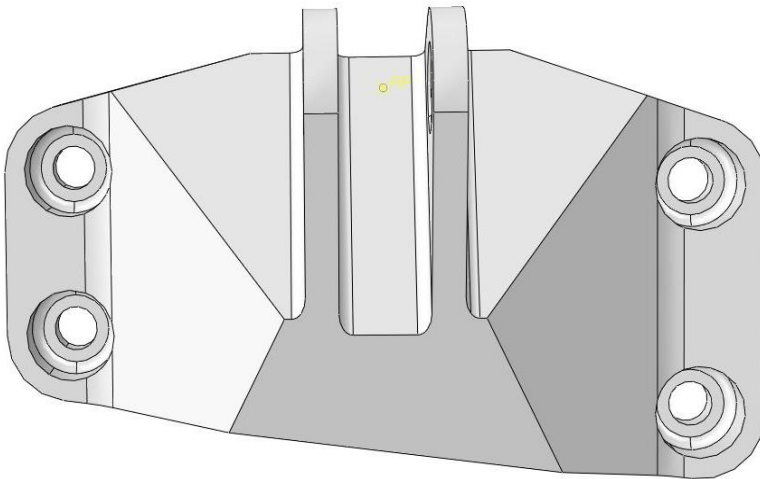


5.3. Vaka 3 – Jet Motoru Braketi Optimizasyonu Çalışması

Topoloji optimizasyonu algoritmalarının performans değerlendirmelerinin karşılaştırılması amacıyla incelenen 3. vakada jet motoru braketi ele alınmış ve 2 algoritma için de parça üzerinde belirlenmiş hedef fonksiyonu doğrultusunda kısıtlamalar göz önünde bulundurularak optimizasyon çalışmaları uygulanmıştır. Bir önceki vakada olduğu gibi jet motoru braketinde de sabitleme bölgesi olarak gövde üzerinde bulunan cıvata bağlantılarının olduğu 4 adet delik kullanılmış, gelen burulma momenti ise gövdenin üst kısmında bulun 2 deliğin eksenini üzerinden parçaya etki etmiştir.



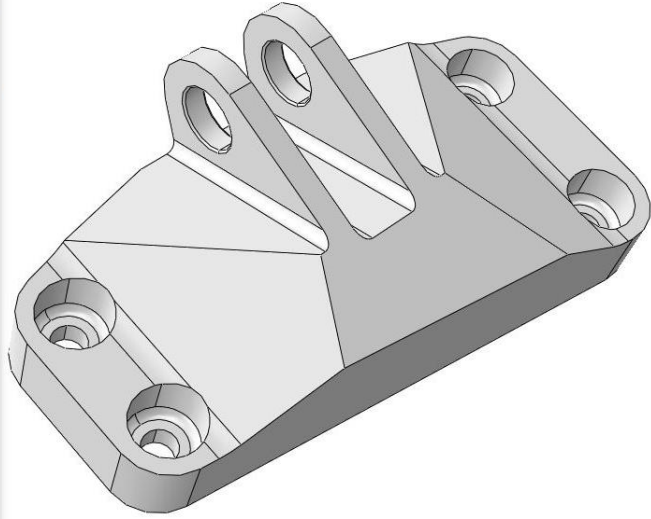
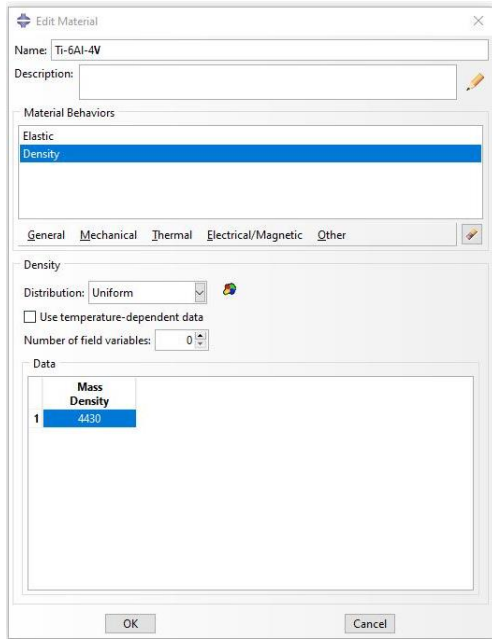
Resim 5.18. İncelenecek olan jet motoru braketinin izometrik görünümü



Resim 5.19. İncelenecek olan jet motoru braketinin üstten görünümü

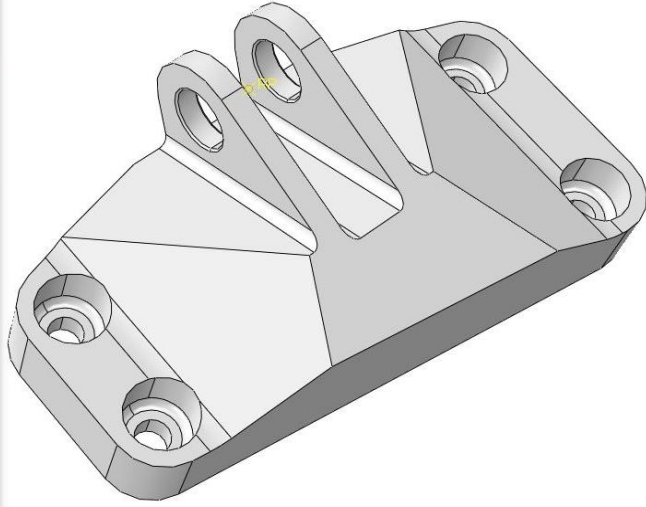
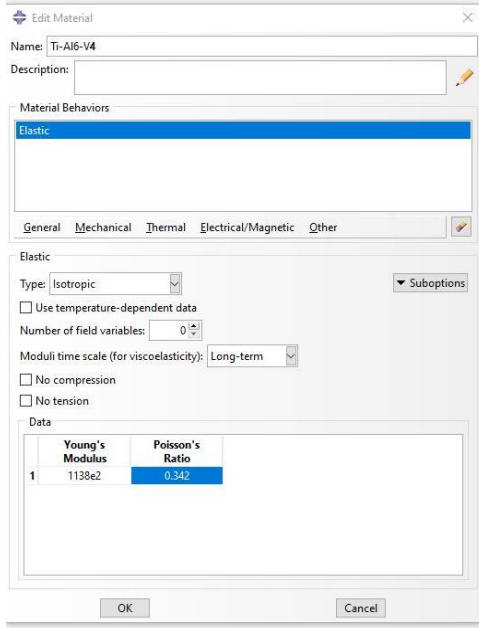
Önceki vakalarda olduğu gibi jet motoru braketini de yapısal analize tabii tutulup iyileştirilmesi için Abaqus/CAE programı ve TOSCA modülü tercih edilmiştir. 5 farklı hacim kısıtlamasında her bir kısıtlama için gerinim enerjisinin minimize edilmesi hedef fonksiyonu olarak belirlenip programın bünyesindeki Tosca modülü ile topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar da SIMP ve RAMP algoritmalarına göre incelenmiştir.

Jet motoru braketini için titanyum alaşımı malzeme tercih edilmiştir. Bu alaşım havacılık sektöründe yaygın olarak bilinen Ti-6Al-4V kısaltmasıyla bilinmektedir. %90'ına yakını titanyumdan oluşan alaşımda ayrıca yaklaşık %6 alüminyum, %4 vanadyum ve bunların yanında maksimum %0.25 oranında demir ve maksimum %0.2 oranında oksijen bulunmaktadır. Malzemenin yoğunluğu 4430 g/cm^3 'tür.



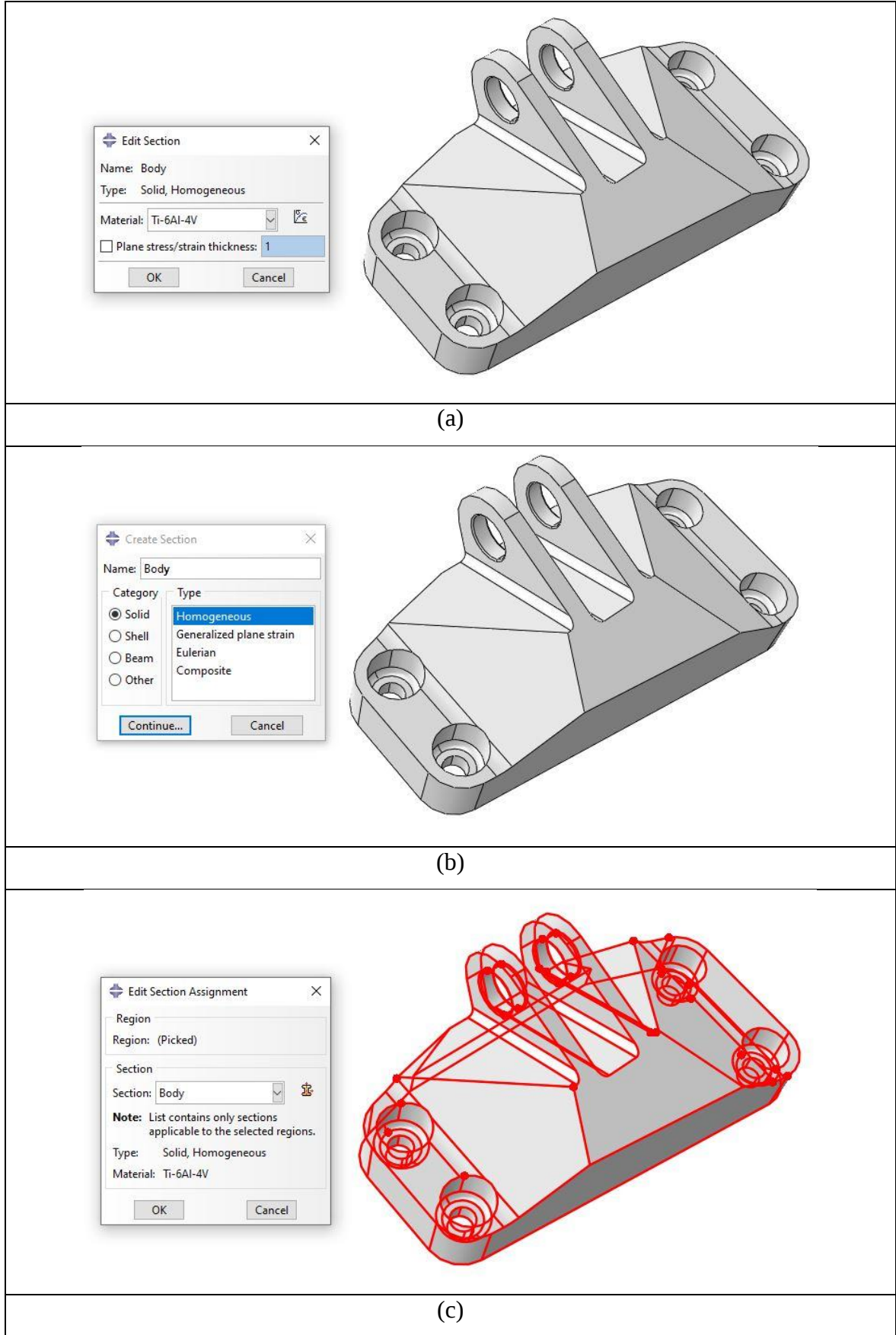
Resim 5.20. Titanyum alaşımı malzemenin yoğunluk verilerinin girilmesi

Model ağacında bulunan Materials başlığından, jet motoru braketinin malzeme bilgileri tanımlanmıştır. Ti-6Al-4V alaşımının yoğunluğu genel özellikler başlığı altında kütle yoğunluğu kısmında 4430 olarak girilmiştir (Resim 5.20.). Mekanik özellikleri ise Young modülü 113.8 GPa olarak, Poisson oranı ise $\nu = 0.342$ olacak şekilde tanımlanmıştır (Resim 5.21.).



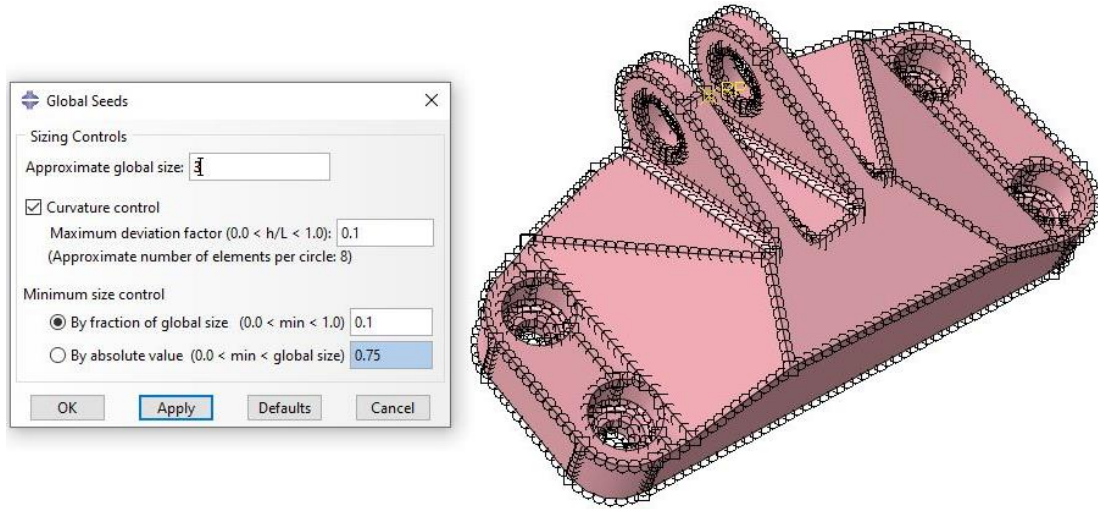
Resim 5.21. Titanyum alaşımlı malzemenin mekanik özelliklerinin tanımlanması

Tanımlanan malzeme özellikleri jet motoru braketine atanmalıdır. Bunun için model ağacından Section Assignment ile tasarım alanına sahip olduğumuz braketin malzemesinin her yerine eş bir şekilde dağıldığı ve bu braketin kısımlara ayrılmamış tek bir gövdeden oluştuğunu göz önünde bulundurularak ekrana gelen pencerede seçilen bölümle ilgili homojen bir katı olduğu tercih edilip istenilen malzeme özellikleri de braketin bütün hacmine atanmaktadır.

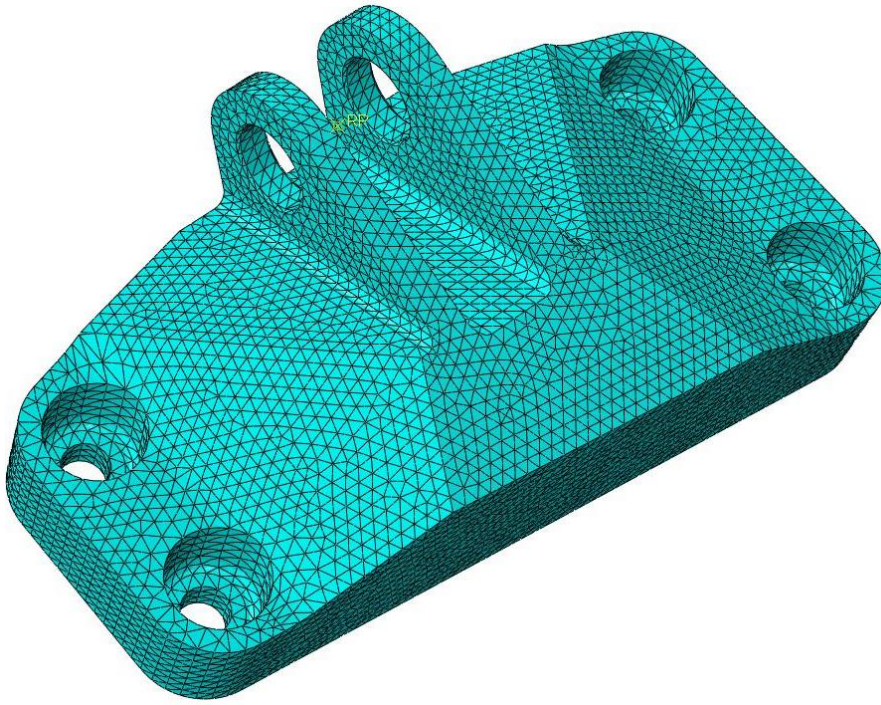


Resim 5.22. Jet motoru braketine kısım atamasının uygulanması

Jet motoru braketinde uygulanan kısım atamasından sonra braketin bütün hacminde malzemenin tarafımızca girilen özellikleri tanımlanmıştır. Bu işlemden sonra parçaya uygulanacak olan sonlu elemanlar analizi için gerekli olan ağ girdileri uygulanmaktadır. Braket için seçilen ağ elemanı büyüklüğü 3 birimdir. Bu veriler doğrultusunda programın parçaya atadığı ağ elemanı sayısı 107052'dir. Bu elemanların tasarım alanında girdiler doğrultusunda birleşmesiyle çözüm ağı elde edilmiştir.

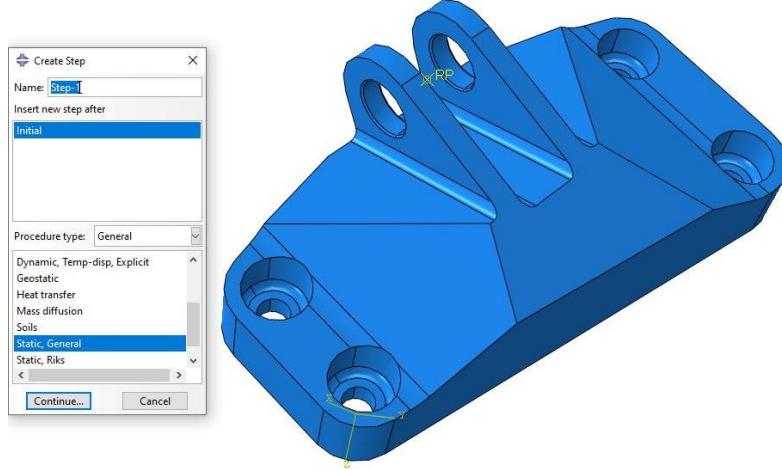


Resim 5.23. Jet motoru braketi için ağ elemanı büyüklüğü seçimi



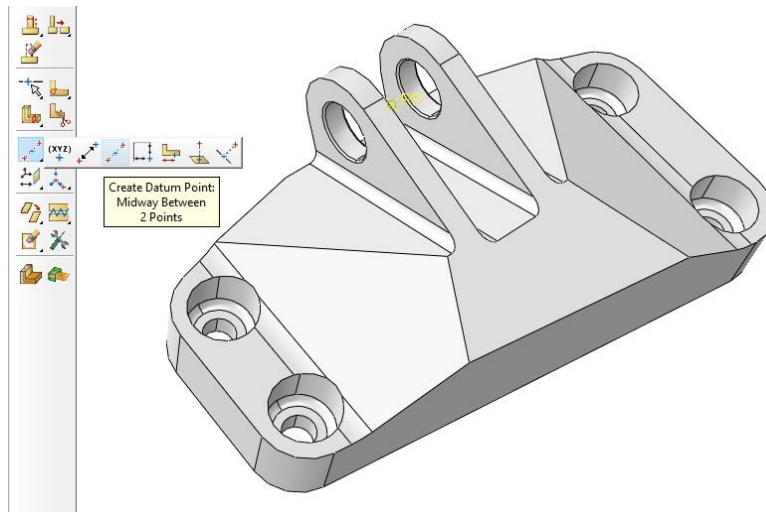
Resim 5.24. Jet motoru braketinin sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuş çözüm ağı

Jet motoru braketi için ağ elemanlarının atanması işleminden sonra parçaya uygulanacak analiz tipini model ağacından steps başlığından belirlemekteyiz. Önceki vakalarda olduğu gibi sonlu elemanlar analiziyle incelenmesini istediğimiz şey parçanın genel ve statik analizidir.



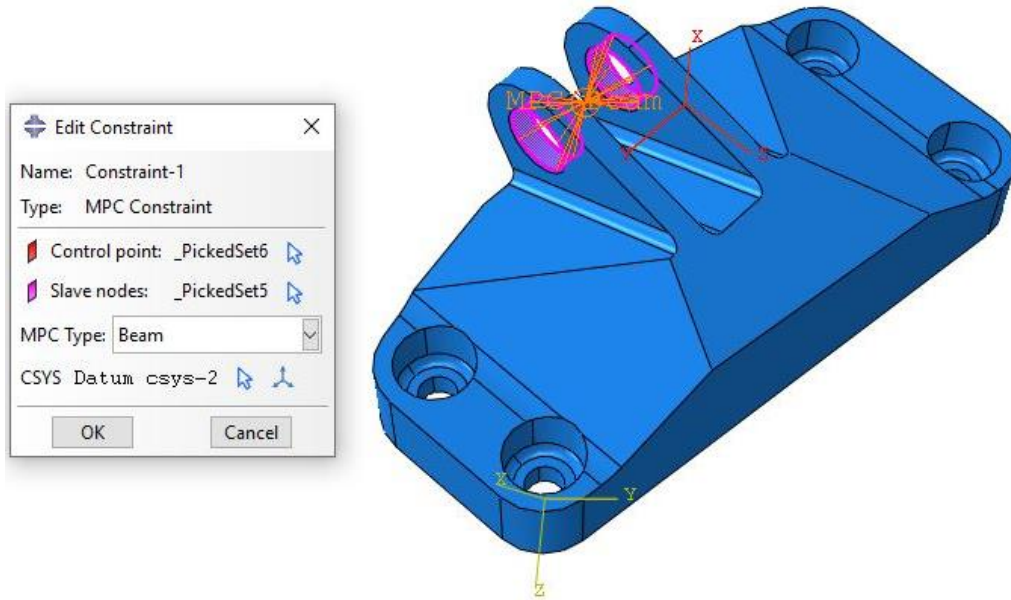
Resim 5.25. Jet motoru braketi için seçilen analiz tipi

Uygulanacak olan analizin seçilmesinden sonra braketle ilgili sınır koşulları ve yük olarak da moment tanımlanmaktadır. Önce parçaya uygulanacak moment için delikler arasında bir orta nokta olarak referans noktası atanmaktadır. Bunun için moment uygulanacak deliklerin en uzak iki ucundan noktalar seçilmektedir. Seçimin yapılmasıyla beraber noktaların arasında bir nokta oluşturulmaktadır. Sonrasında da bu noktanın referans noktası olduğunu tanımlayarak yükün uygulanması için uygun hale getirmekteyiz.



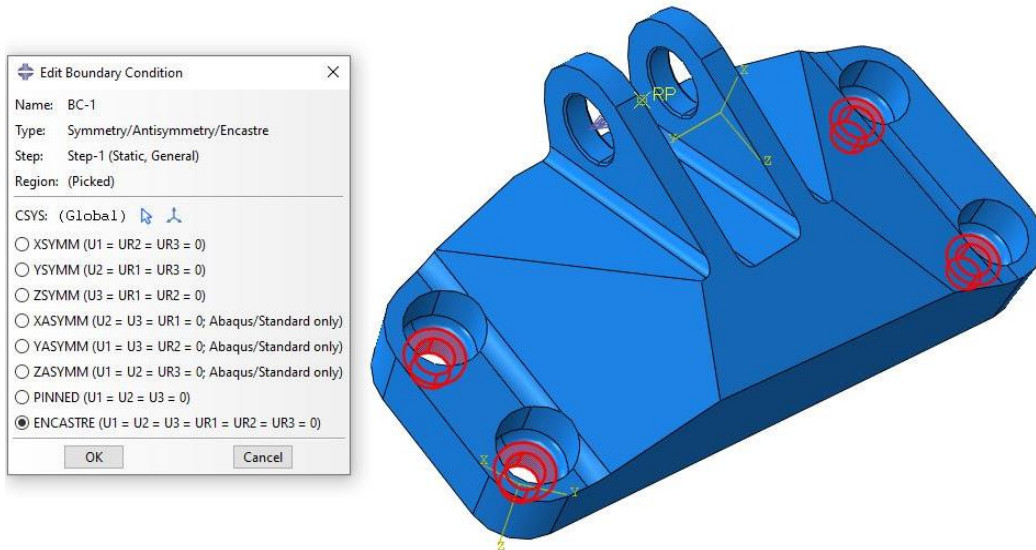
Resim 5.26. Uygulanacak moment için deliklerin ortasında referans noktası oluşturulması

Oluşturulan referans noktasıyla moment uygulanacak deliklerin ilişkilendirilmesi ise constraint başlığı altında yapılmaktadır. Referans noktası deliklerin iç yüzleriyle birlikte seçilerek belirtilen eksen takımı doğrultusunda bağlantılandırılmaktadır.



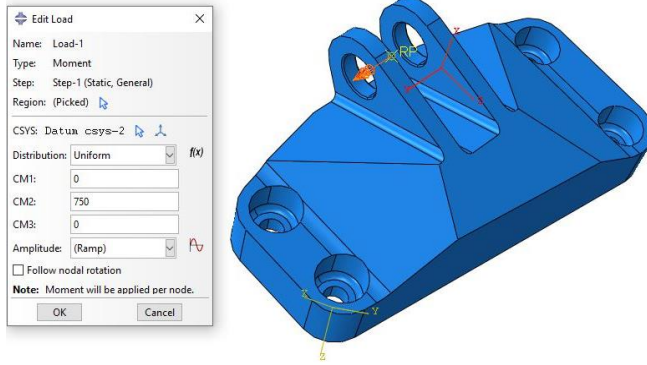
Resim 5.27. Yükleme yapılacak deliklerle referans noktasının ilişkilendirilmesi

Braketin sınır koşulları, gövdede bulunan cıvata bağlantılarının olduğu dört deliğin sabitlenmesi olarak ifade edilebilmektedir. Bu dört delik her yönden sınırlandırılmıştır. Sınırlandırma Resim 5.28.de gösterilmiştir.



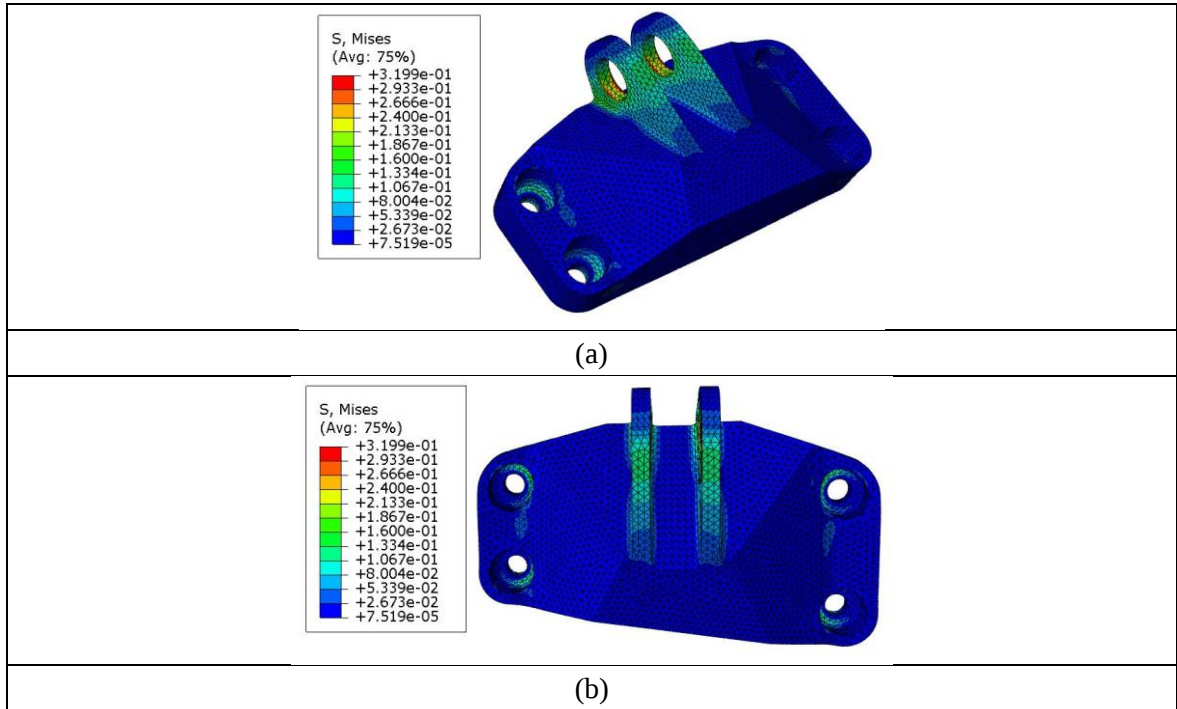
Resim 5.28. Jet motoru braketinin sınır koşulları

Sınır koşullarının tanımlanmasından sonra braketin üst gövdesinde bulunan deliklerin ekseninde oluşturulmuş referans noktası üzerinden 2 delik için moment 750 N olarak sol yönlü uygulanmıştır.



Resim 5.29. Yükün moment olarak jet motoru braketine uygulanması

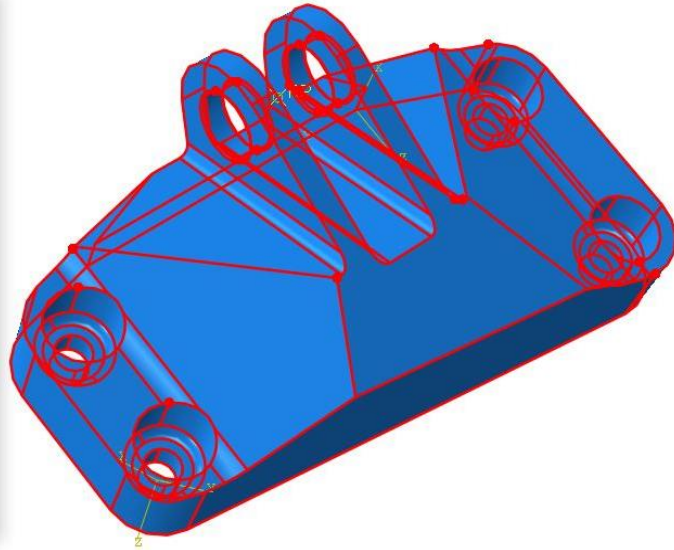
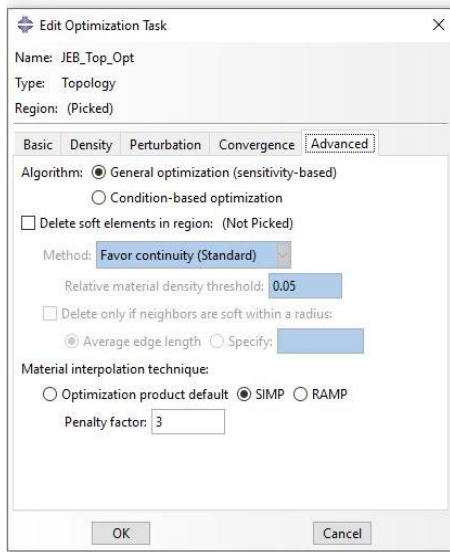
Jet motoru braketinin gerekli verilerin girilmesiyle beraber, sonlu elemanlar analizi parça için incelenmek üzere çalıştırılmıştır. Analizin tamamlanmasıyla birlikte uygulanan moment sonrası oluşan von Mises gerilmeleri ve bu gerilmelerin jet motoru braketi üzerindeki dağılımları Resim 5.30.da gözlemlenmiştir.



Resim 5.30. Sonlu elemanlar analizi uygulanmış jet motoru braketinde gözlemlenen von Mises gerilmelerinin; (a) izometrik görünümü (b) üstten görünümü

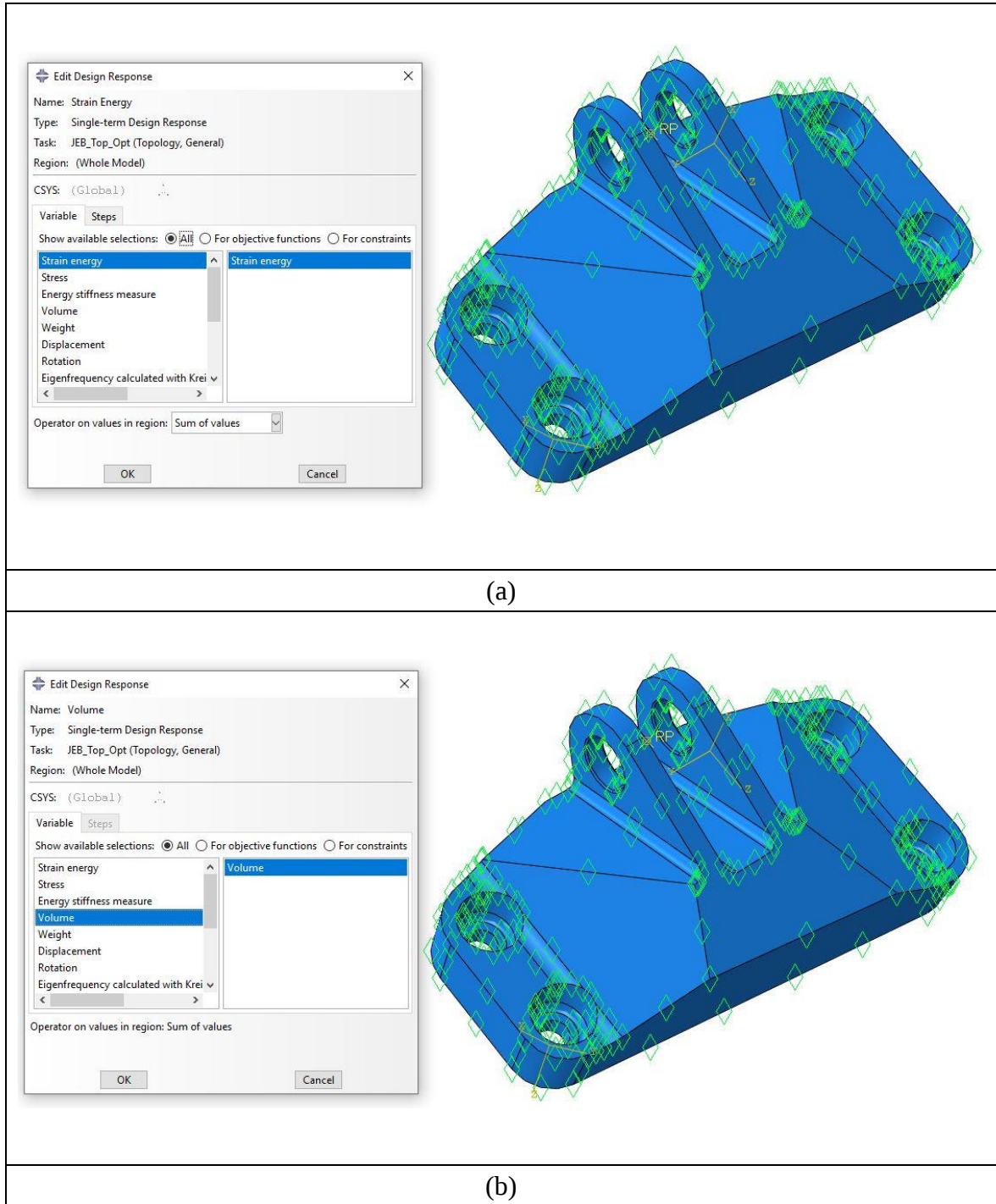
Analiz sonuçları incelendiğinde momentin etkisiyle oluşan gerilmelerin yükün uygulandığı deliklerin etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca cıvata bağlantılarının bulunduğu sınır koşulları olarak tanımlanmış dört deliğin de içe doğru olan kısımlarında yükün etkisine bağlı olarak gerilmeler oluşmuştur.

Elde edilen veriler ışığında optimizasyon sürecine başlamaya hazır hale gelinmiştir. Çalışmada bulunan diğer vakalardaki gibi jet motoru braketinin iyileştirmesi sonuçlarının Abaqus/CAE programının bünyesinde bulunan TOSCA modülü ile topoloji optimizasyonu algoritmalarından SIMP ve RAMP yöntemleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Her iki optimizasyon yönteminde de hedef fonksiyonu olarak gerinim enerjisinin minimize işlemi uygulanırken parça 5 farklı hacim oranına düşürülmüş ve bu koşullarda optimizasyonlarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optimizasyonda kullanılacak cezalandırma katsayısı olarak 3 kabul edilmiştir.

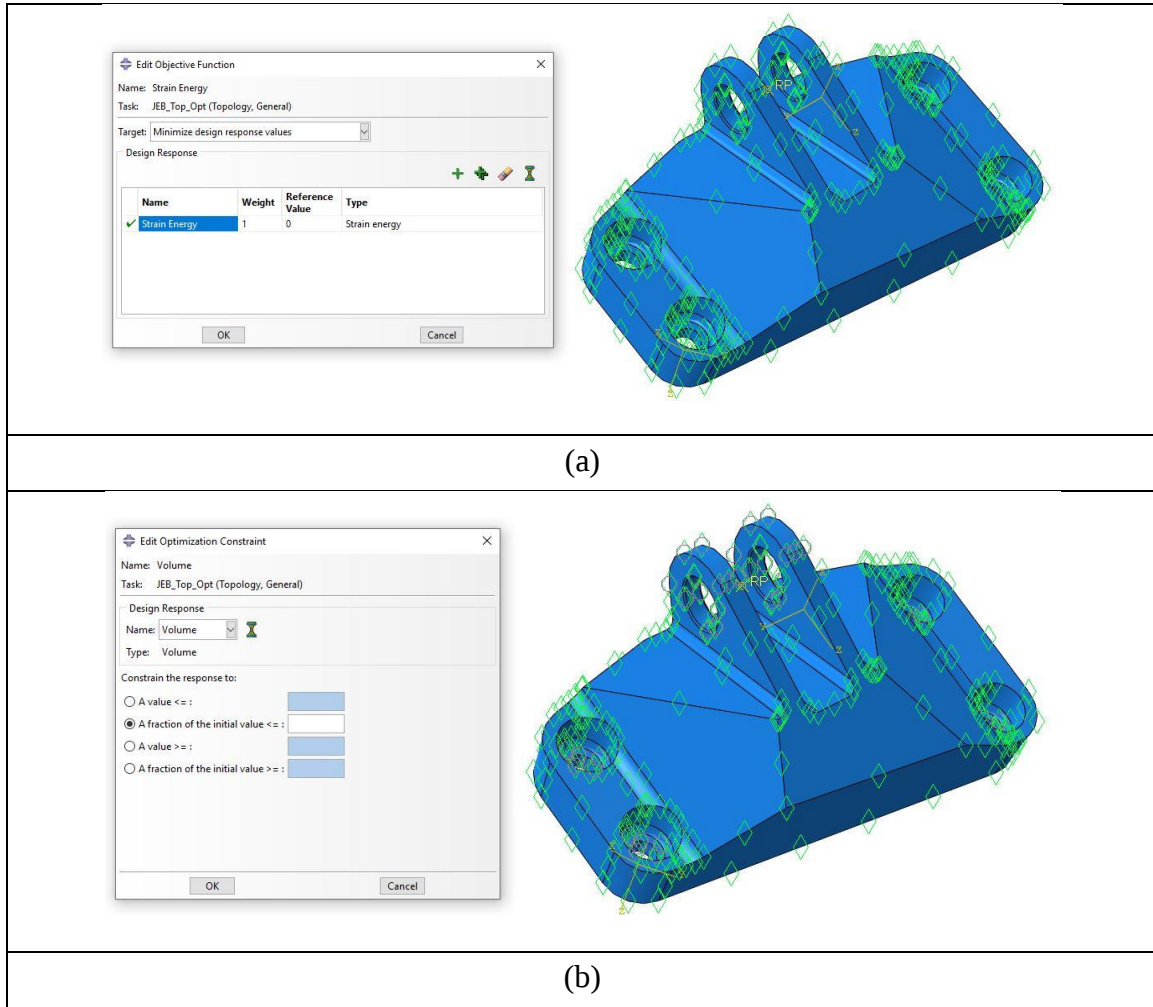


Resim 5.31 Topoloji optimizasyonu uygulanacak jet motoru braketinde optimizasyon algoritmasının seçimi ve cezalandırma katsayısının belirlenmesi

Tasarım değişkenleri olarak hacim ve gerinim enerjisi kullanılırken, hedef fonksiyonu için ise braketin gerinim enerjisinin minimize edilmesi amaçlanmıştır, bu sırada da parçanın hacminin kademeli olarak azaltılması hedeflenmiştir.



Resim 5.32. Jet motoru braketinin tasarım değişkenleri; (a) gerinim enerjisi, (b) hacim



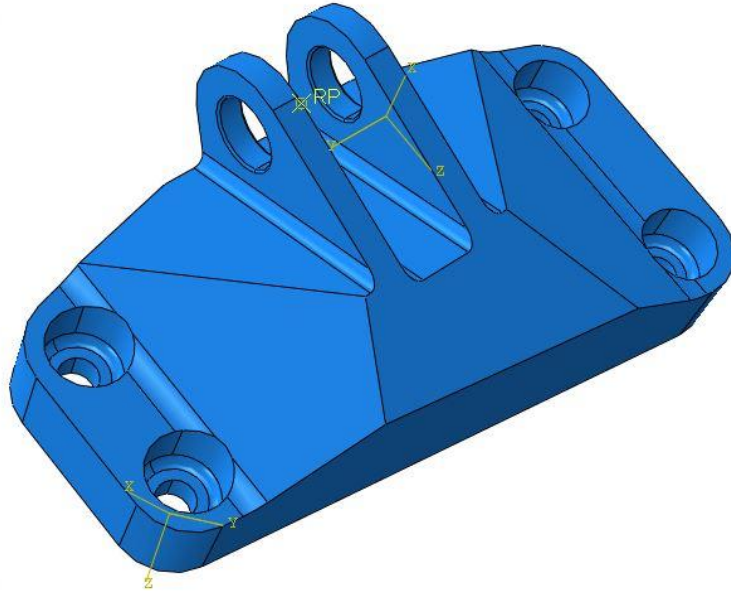
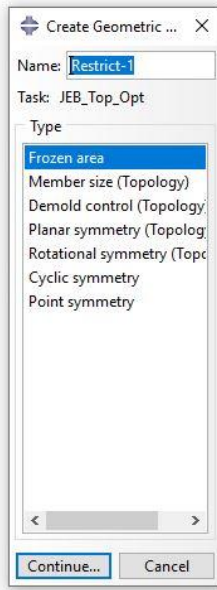
Resim 5.33. Jet motoru braketinin hedef fonksiyonu ve uygulanacak kısıtlamanın tanımlanması

Jet motoru braketinde SIMP ve RAMP algoritmalarıyla optimize işleminin kıyaslanması için hacimsel olarak sırasıyla:

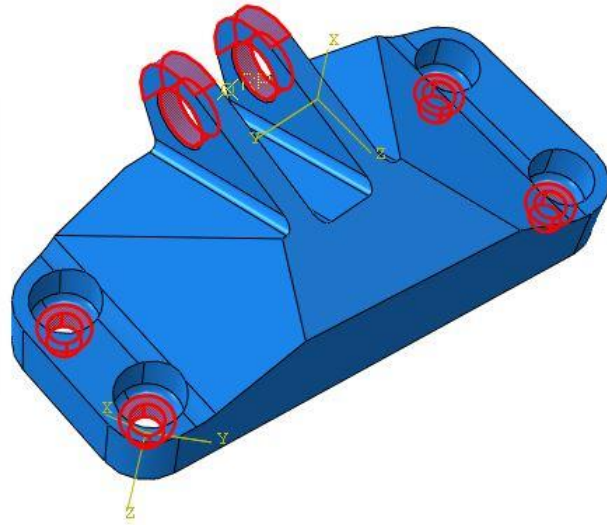
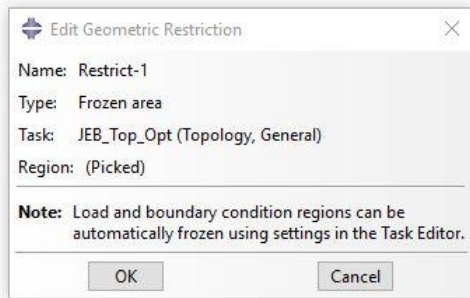
- %90
- %80
- %65
- %50
- %35

incelenmiştir.

Ayrıca iyileştirme için parçadan uzaklaştırılacak olan bölümlerin uygulanacak yük ve sınır koşulları bölgelerinden olmaması için geometrik kısıtlama tanımlanmıştır (Resim 5.34.).



(a)

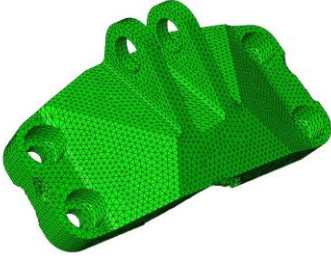
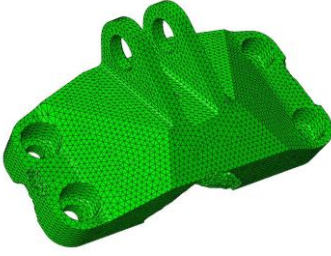
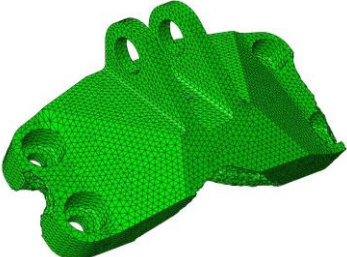
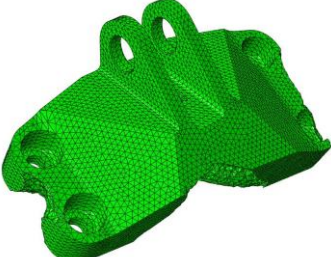
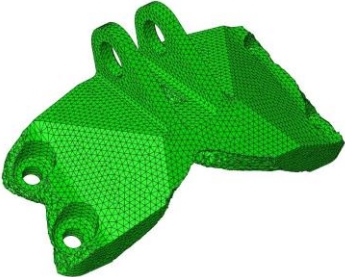
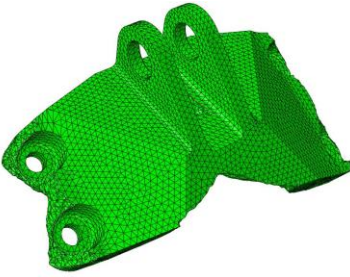
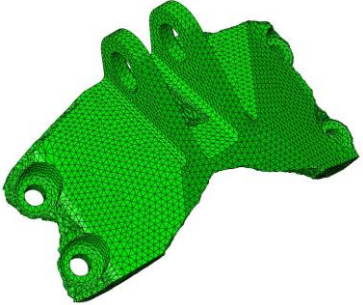
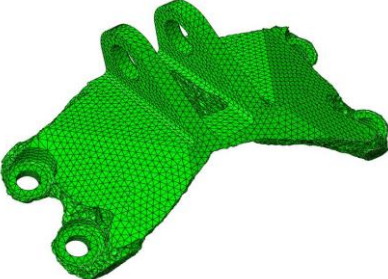
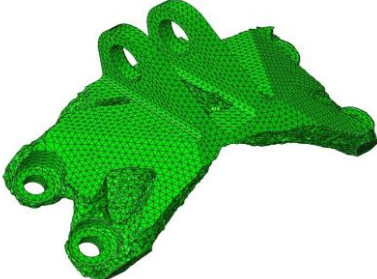


(b)

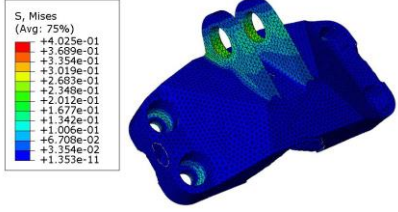
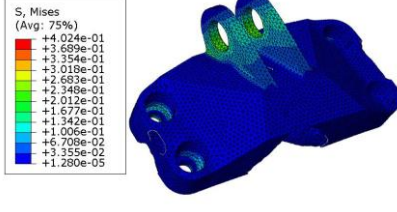
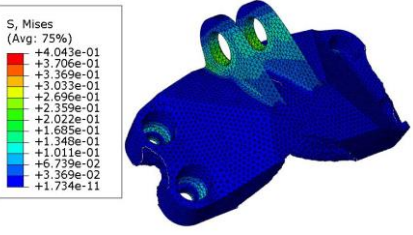
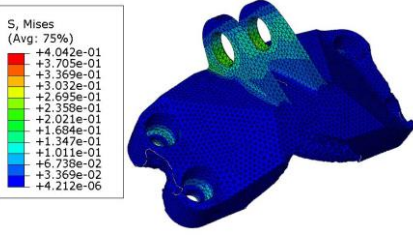
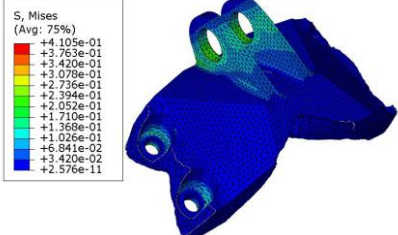
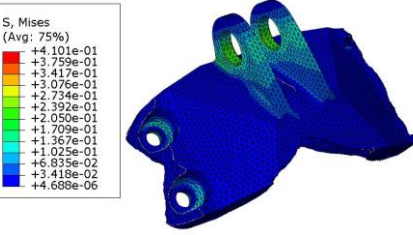
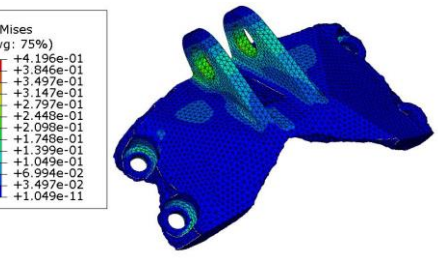
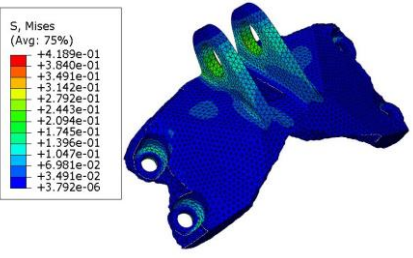
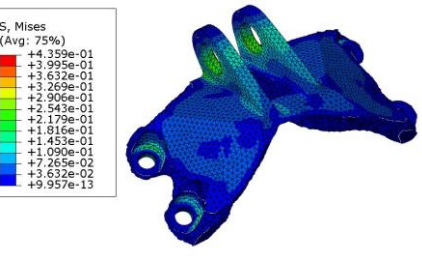
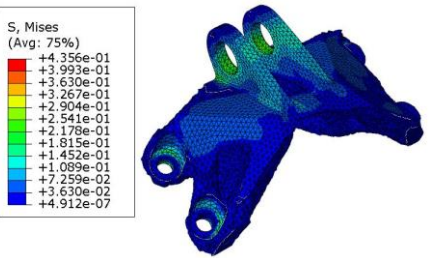
Resim 5.34. Jet motoru braketinde optimizasyon işlemi sırasında hacim boşaltılması istenilmeyen alanlarının tanımlanması

Optimizasyonda tanımlanan değişkenler ve hedef fonksiyonları doğrultusunda elde edilen verilen aşağıda gösterilmiştir:

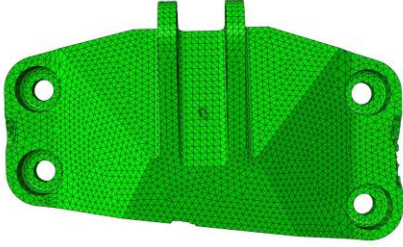
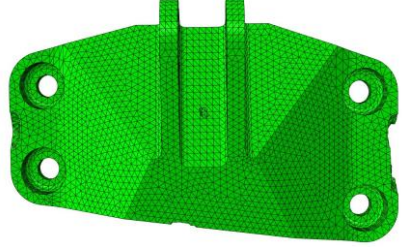
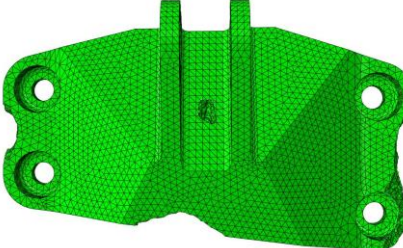
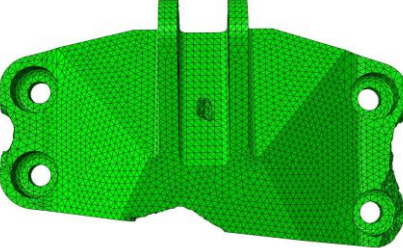
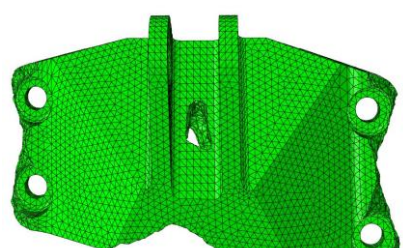
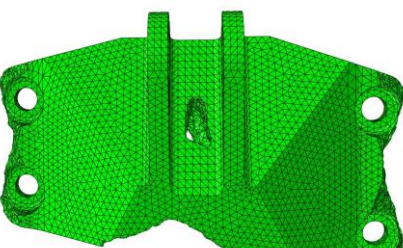
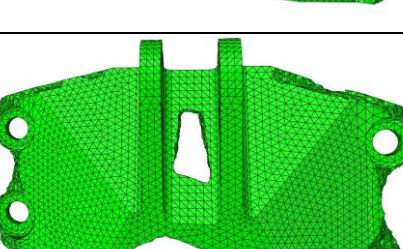
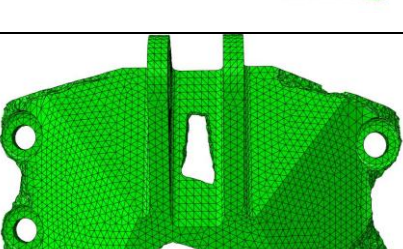
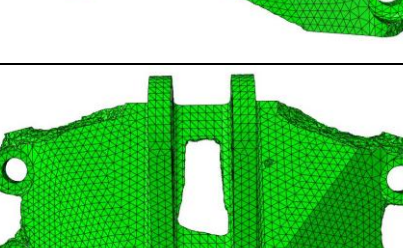
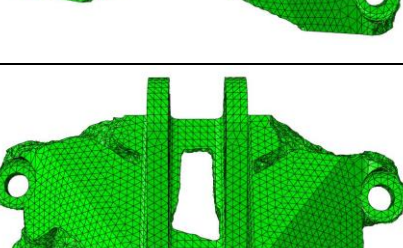
Çizelge 5.11. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının izotmetrik görüntüleri

Kısıtlama	SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
%90		
%80		
%65		
%50		
%35		

Çizelge 5.12. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin izotmetrik görüntüleri

SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
	
Hacim Kısıtlama : % 90	
	
Hacim Kısıtlama : % 80	
	
Hacim Kısıtlama : % 65	
	
Hacim Kısıtlama : % 50	
	
Hacim Kısıtlama : % 35	

Çizelge 5.13. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının üstten görünümü

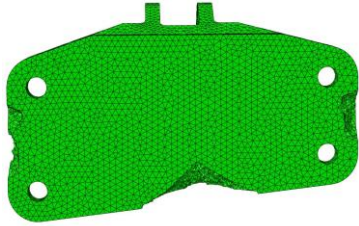
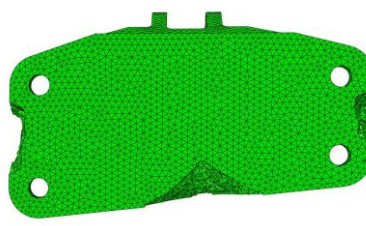
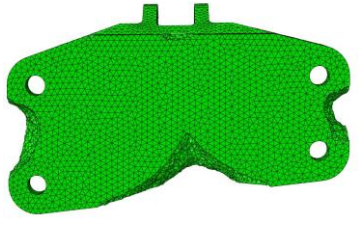
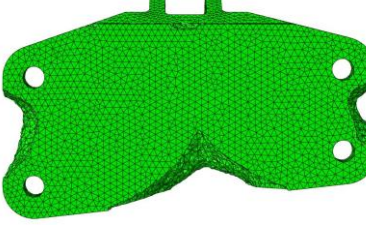
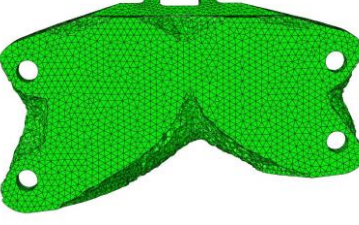
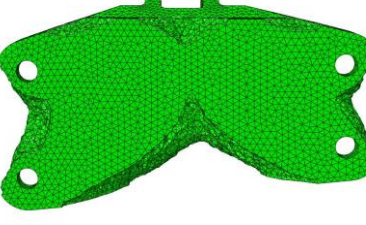
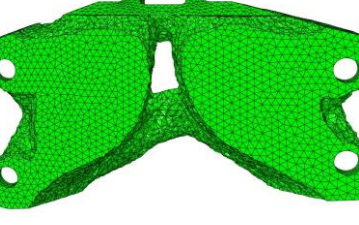
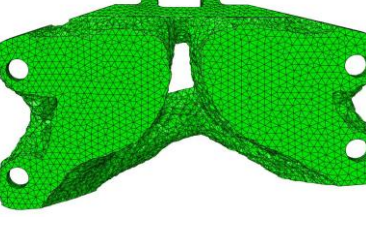
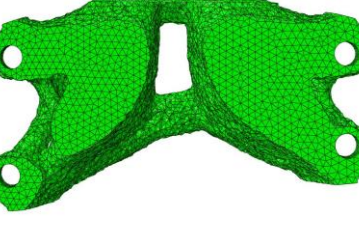
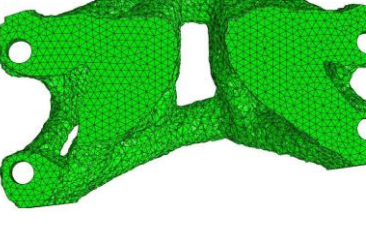
Kısıtlama	SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
%90		
%80		
%65		
%50		
%35		

Çizelge 5.14. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin üstten görünüşleri

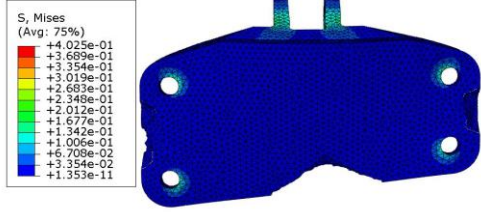
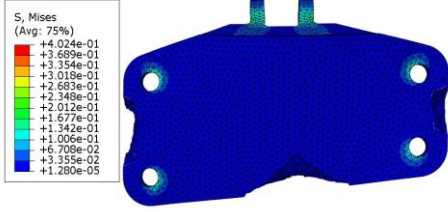
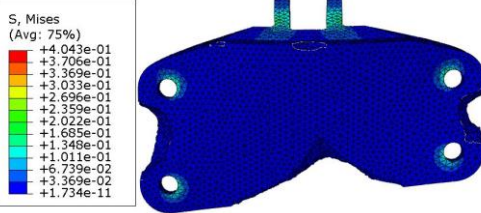
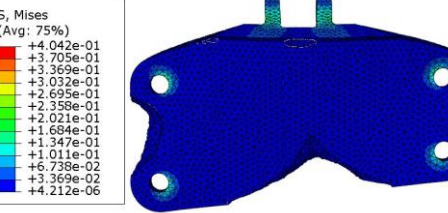
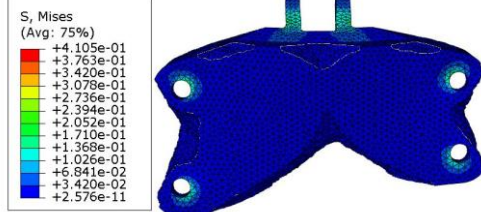
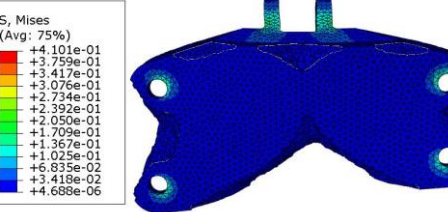
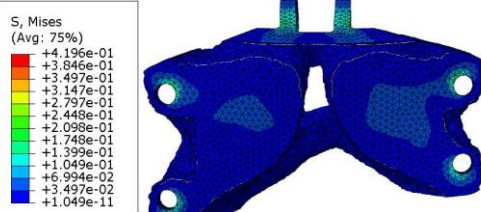
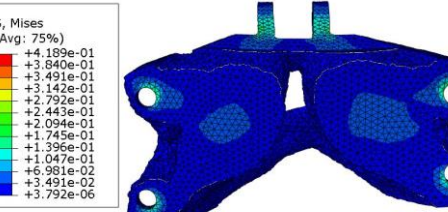
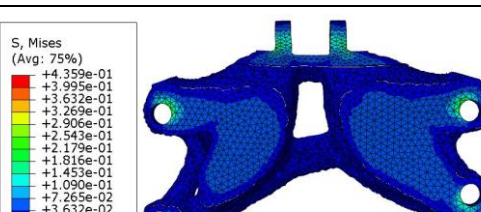
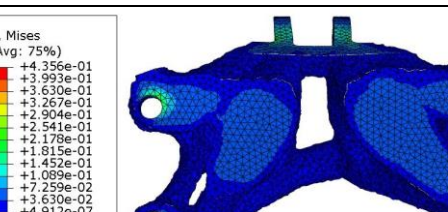
SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
Hacim Kısıtlama : % 90	
Hacim Kısıtlama : % 80	
Hacim Kısıtlama : % 65	
Hacim Kısıtlama : % 50	
Hacim Kısıtlama : % 35	

Diğer vakalara oranla jet motoru braketi optimizasyonu çalışmasında daha az farklılık oluşmuştur. Ancak von Mises gerilmeleri incelendiğinde alt sınırdaki ortaya çıkmış olan tablo değerleri farkı parçanın alt değer gerinim yüklemesinin gövde üzerinde değişiklik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.

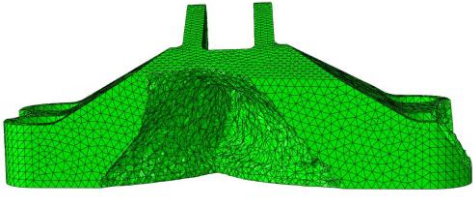
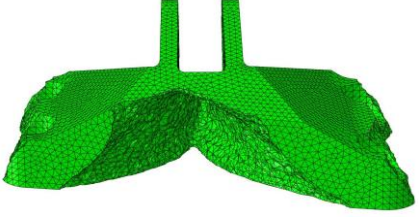
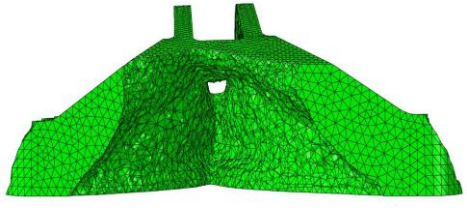
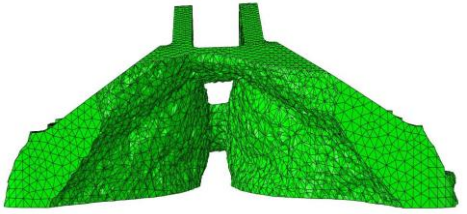
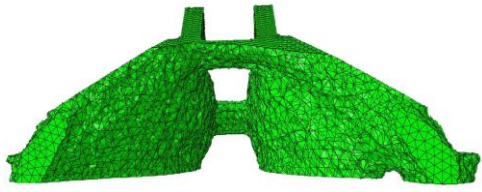
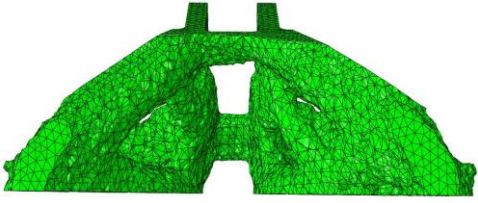
Çizelge 5.15. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketine SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının alttan görünüşleri

Kısıtlama	SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
%90		
%80		
%65		
%50		
%35		

Çizelge 5.16. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçları üzerindeki von Mises gerilmelerinin alttan görünüşleri

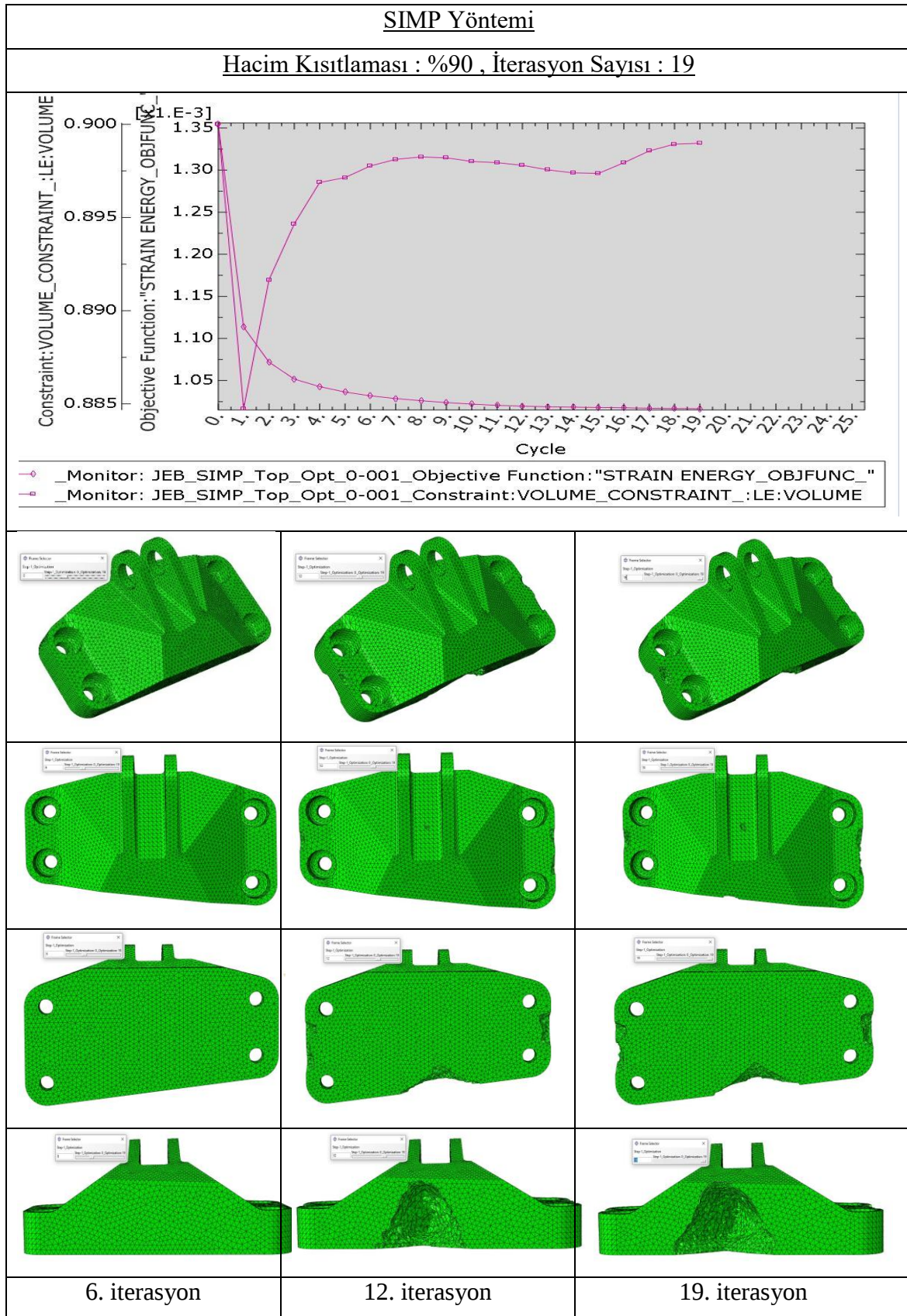
SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
	
Hacim Kısıtlama : % 90	
	
Hacim Kısıtlama : % 80	
	
Hacim Kısıtlama : % 65	
	
Hacim Kısıtlama : % 50	
	
Hacim Kısıtlama : % 35	

Çizelge 5.17. Farklı hacim kısıtlamaları uygulanmış jet motoru braketinde SIMP ve RAMP topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiş iyileştirme sonuçlarının önden görünümüleri

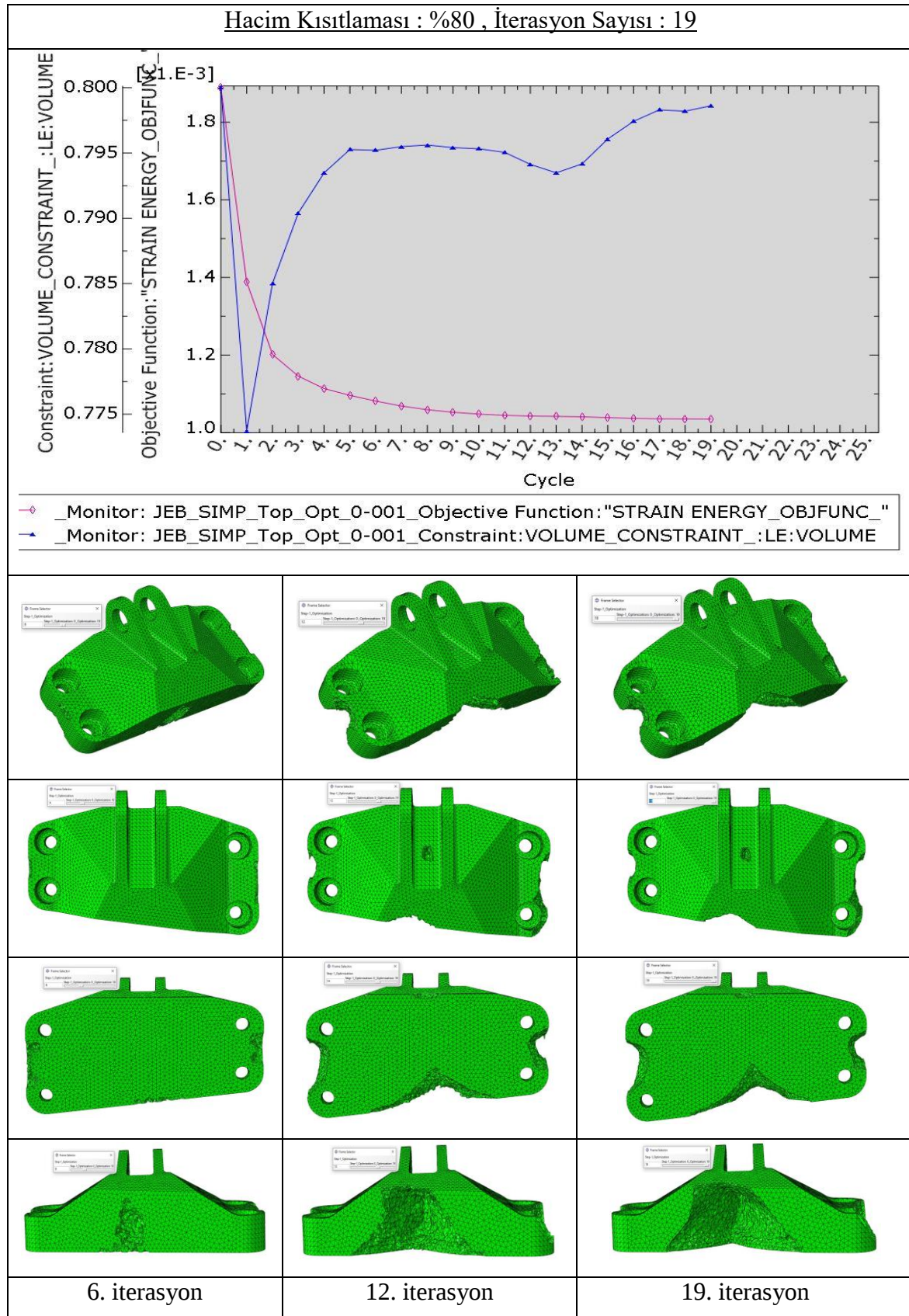
Kısıtlama	SIMP Yöntemi	RAMP Yöntemi
%90		
%80		
%65		
%50		
%35		

Jet motoru braketinin tasarım değişkenleri göz önünde bulundurularak yapılan iyileştirme işleminde hedeflenen hacim kısıtlaması ve gerinim enerjisine ulaşma doğrultusunda iterasyon sayıları da değişmiştir. Hedef fonksiyonunun gerinim enerjisinin minimize edilmesi durumunda hacim kısıtlaması başlangıç tasarımından %35'e düşürüldükçe iterasyon sayısının vaka 2'deki braketteki gibi hem SIMP algoritmasında hem de RAMP algoritmasında arttığı gözlemlenmiştir.

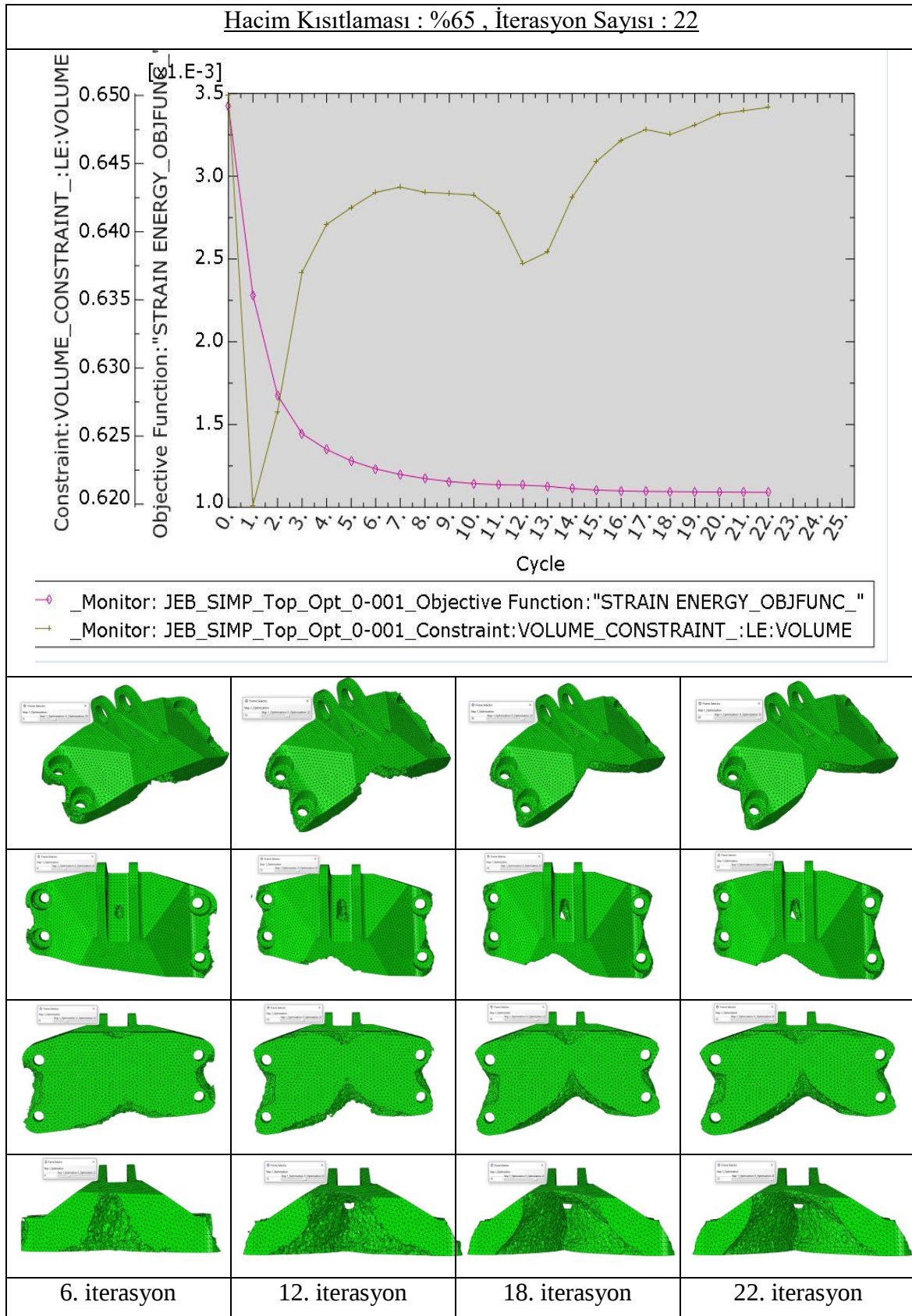
Çizelge 5.18. Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



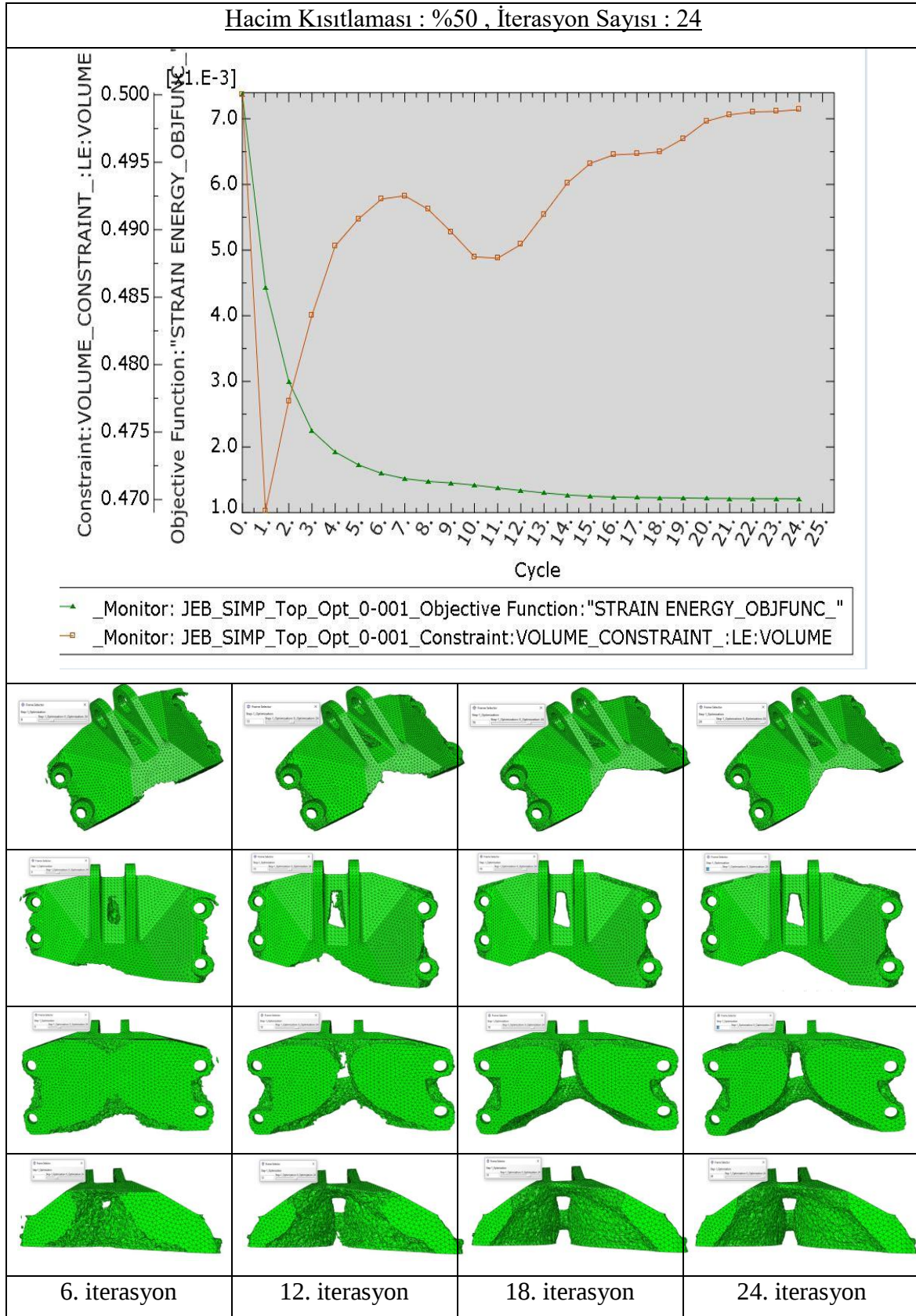
Çizelge 5.18. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



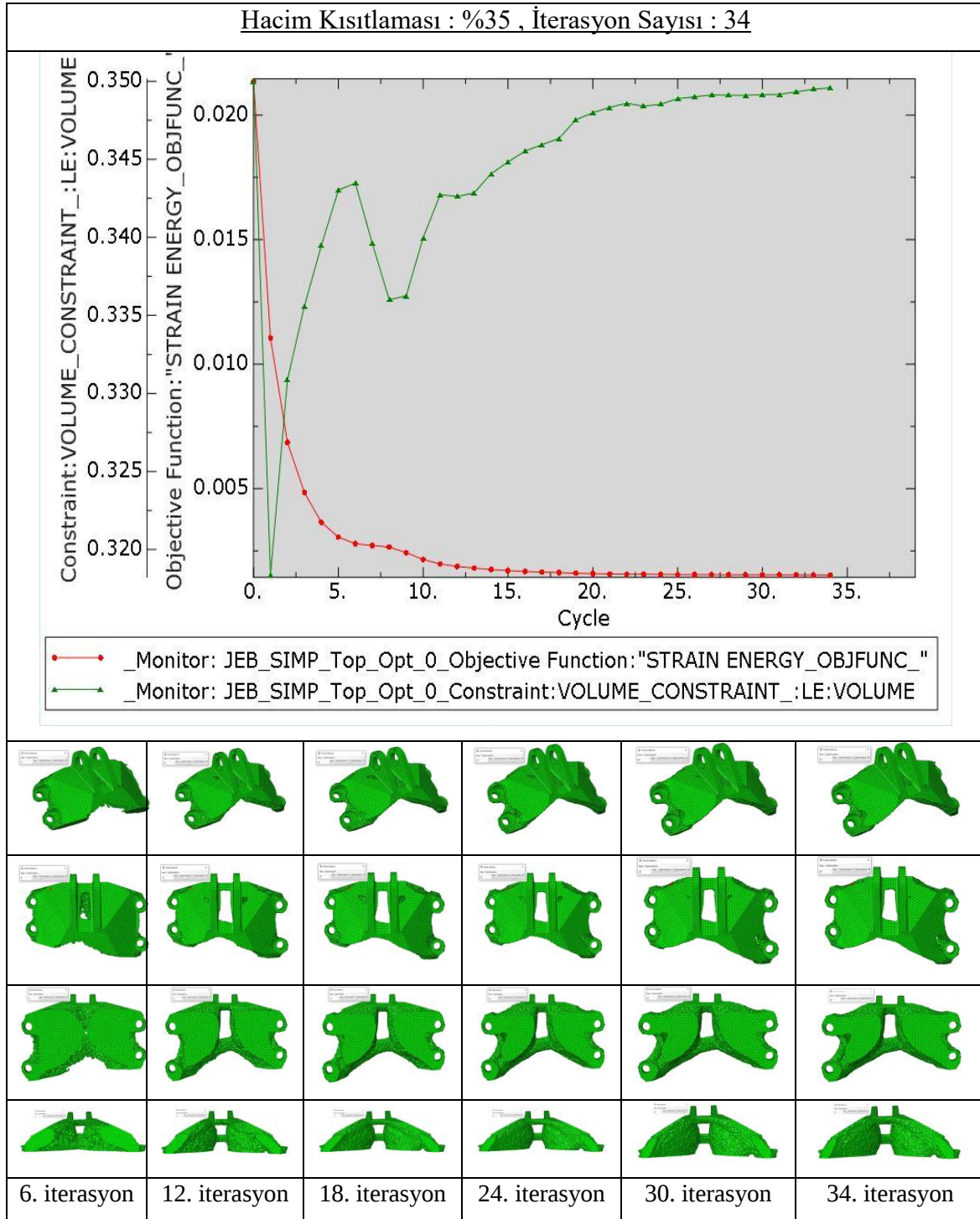
Çizelge 5.18. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



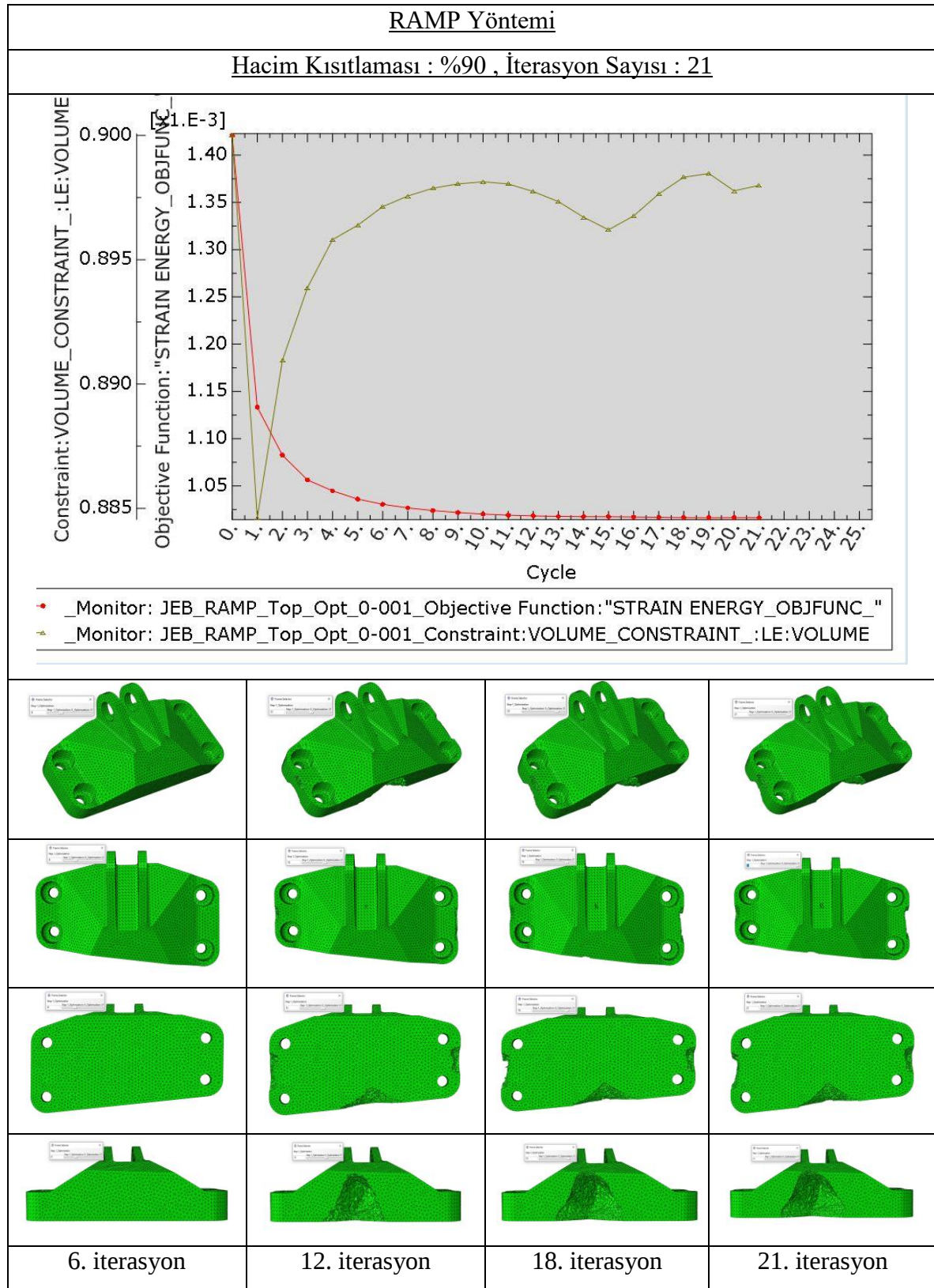
Çizelge 5.18. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



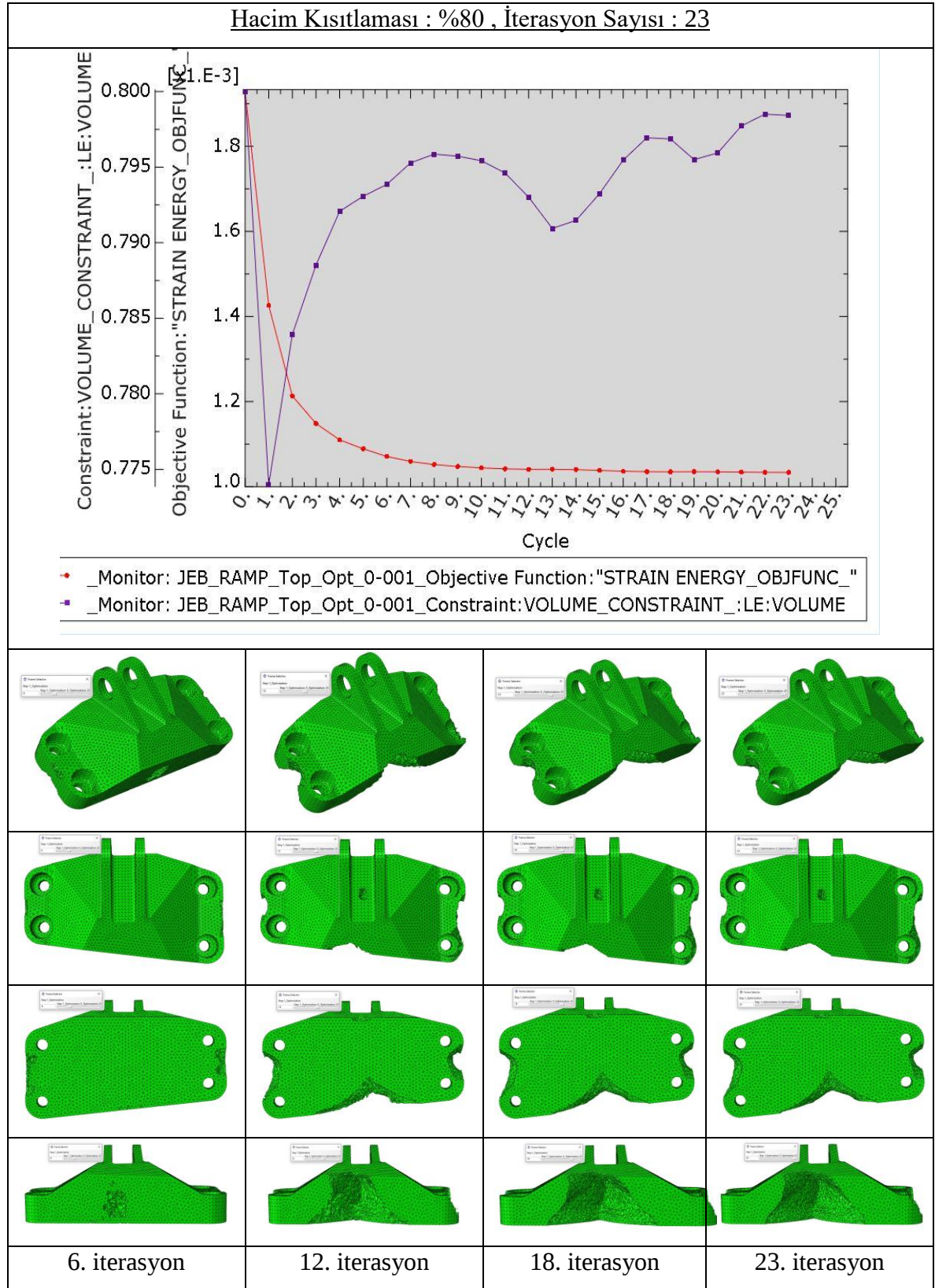
Çizelge 5.18. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında SIMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



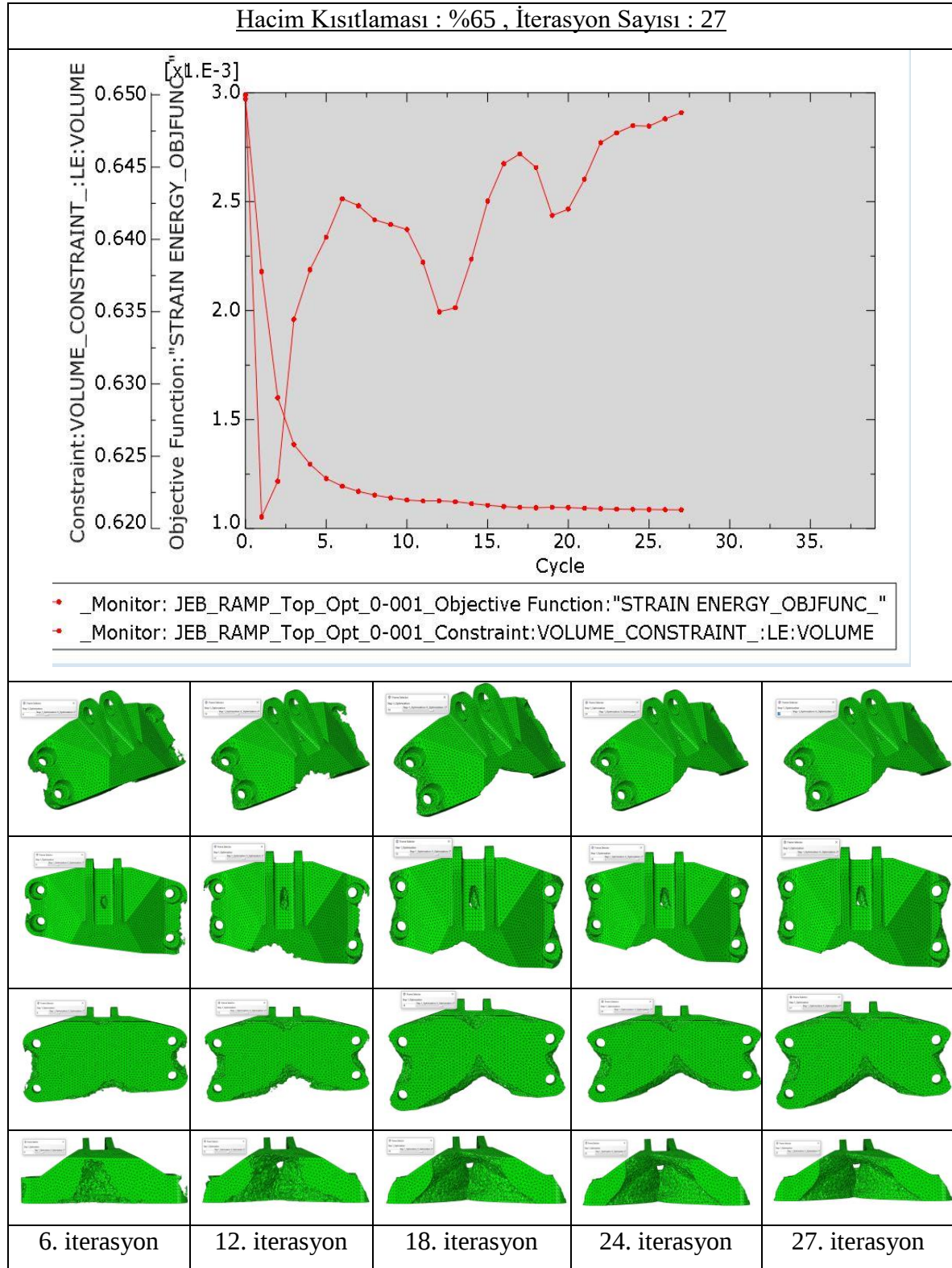
Çizelge 5.19. Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



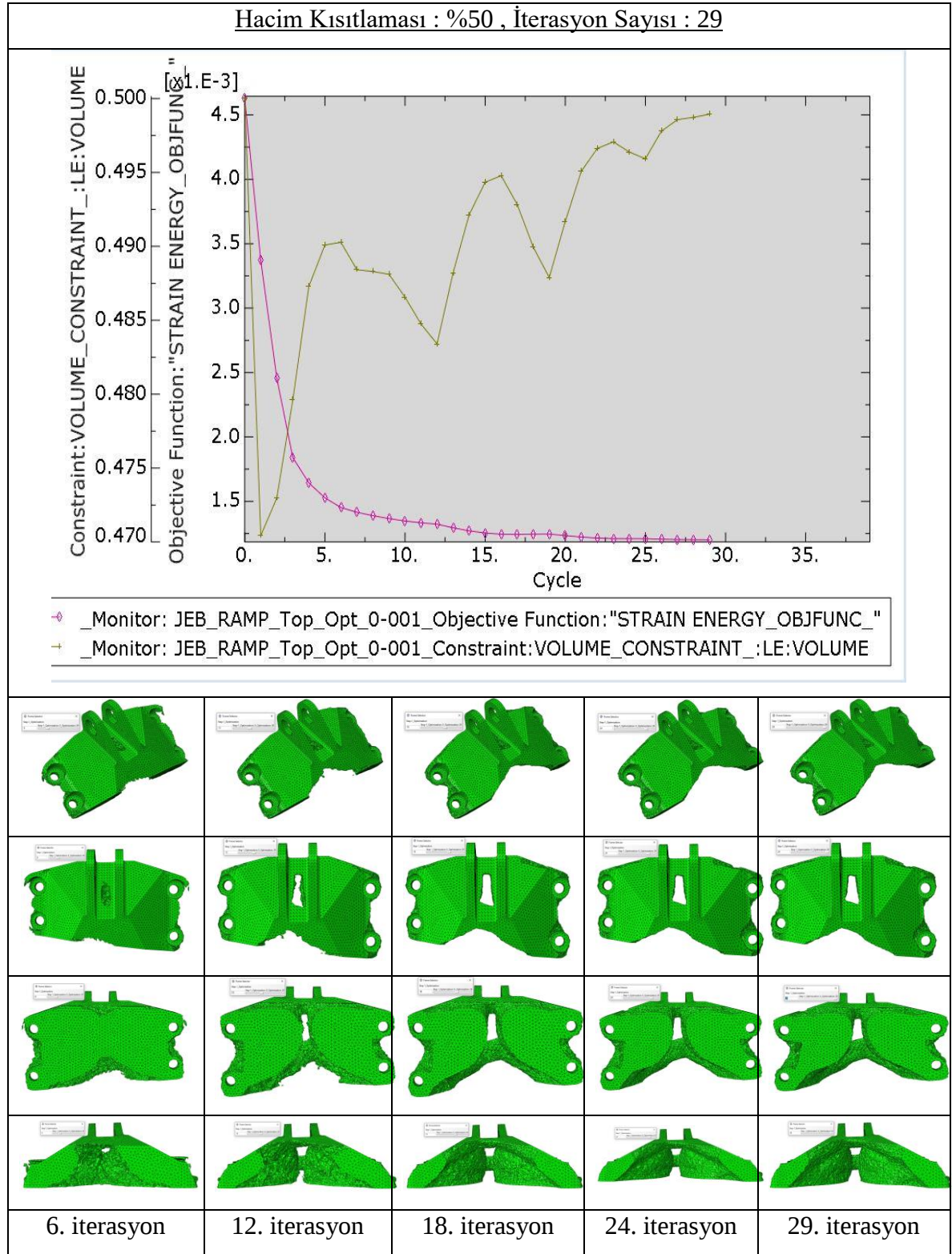
Çizelge 5.19. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



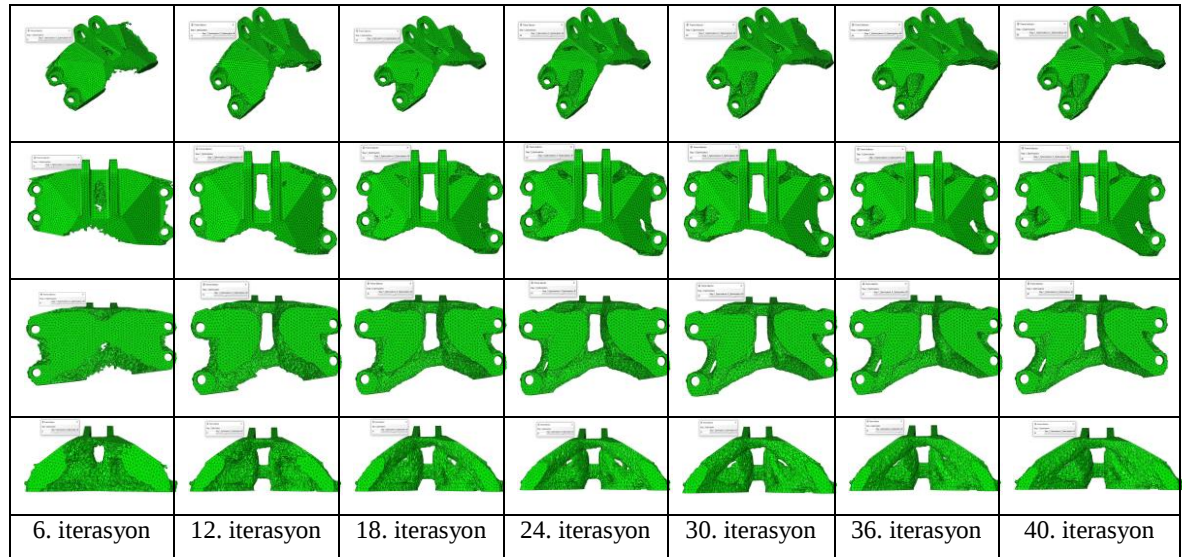
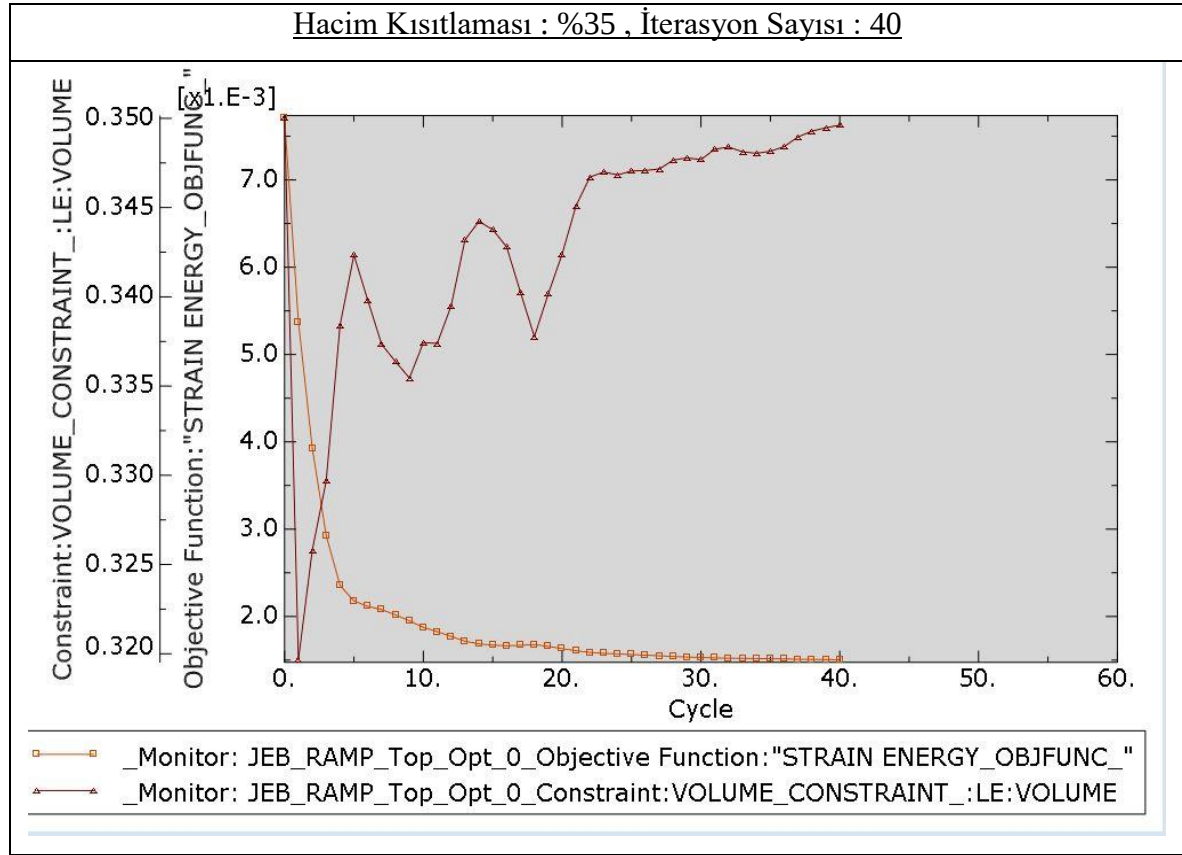
Çizelge 5.19. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



Çizelge 5.19. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



Çizelge 5.19. (devam) Jet motoru braketine uygulanan farklı hacim kısıtlamalarında RAMP yöntemi için iterasyon sayısı değişimi



6. SONUÇ

Bu çalışmada eklemeli imalat uygulamasıyla sağlanacak avantajlar sebebiyle kullanımı giderek artan optimizasyon çalışmaları ele alınmıştır. Dünya genelinde eklemeli imalat araştırmalarında son yıllarda dikkat çekici bir büyüme olmuştur. Eksiltici üretimden farklı olarak eklemeli imalat, katman katman malzeme birikimini kullanmaktadır ve bu katmanlı yaklaşım nedeniyle, üretilmek istenen mühendislik parçaları büyük karmaşıklık ile üretim maliyeti artmadan, hatta bazen azalarak dizayn edilebilmektedir. Daha da önemlisi, gelişmiş topolojik tasarımların 3B makinelerden çıkarılan ürünler olarak hayata geçirilebilmesidir. Gelişmiş topoloji optimizasyon yöntemlerini kullanan çok sayıda araştırma çalışması vardır ve bunların sonuçları sadece eklemeli imalat ile üretilmektedir. Topoloji optimizasyon süreçlerinde ise, gereksinimler, kısıtlamalar ve amaç fonksiyonları doğrultusunda bilgisayar destekli programlarda çalışılan model üzerinde iyileştirme uygulamaları yapmak ana hedeftir. Çeşitli topoloji optimizasyonu uygulamaları içerisinden seçilecek doğru yöntemle elde edilmek istenen minimum uyumluluk maksimum sertlik çalışmaları ile birlikte parçada hem malzeme verimi sağlanmış olup hem de zamandan tasarruf edilmiştir. Yöntemlerin kıyaslamaları sürekli yapıların topoloji optimizasyonları üzerinden kategorilendirilerek önce bulgusal ardından matematik temelli yöntemlerin optimizasyonlarına değinilmiştir.

Bulgusal yöntemler olarak evrimsel yapı optimizasyonu ve çift yönlü evrimsel yapı optimizasyonu ele alınmış ve konuyla ilgili geçmiş çalışmalar incelenmiş aralarındaki farklar dile getirilip, önemli çalışmaların literatür araştırması yapılarak çalışmada değinilmiştir. Topoloji optimizasyonu algoritmalarında kullanılan sonlu elemanlar analizi yöntemine de değinilerek bulgusal yöntemlerle incelenmiş olan problem çözümlerinin temel başlıkları aktarılmıştır.

Matematik temelli yöntemlerde ise önce diğer algoritmalara göre nispeten daha az tercih edilen homojenizasyon yönteminden ilk olarak bahsedilerek günümüze kadar ele alınmış çalışmalarından bazı önemli olanları seçilerek aktarılmış olup bunun yanında seviye seti yöntemiyle de matematik temelli yöntemlere farklı bir bakış açısı oluşturulduğu dile getirilmiştir. Yöntemlerin özellikleri kavramlar kısmında dile getirildikten sonra literatür araştırmalarında incelenen vaka örnekleriyle pekiştirilmiştir.

En yaygın topoloji optimizasyonu yöntemi olarak kabul edilen SIMP ise yine matematik temelli topoloji optimizasyonu yöntemleri başlığı altında geniş çerçevede incelenmiştir. SIMP yöntemlerinden sayılan SINH ve RAMP yöntemleri de konusal olarak anlatıldıktan sonra tarihsel gelişmeleri araştırmacıların inceledikleri konularla beraber hem teorik olarak anlatılmaya çalışılmış hem de uygulamalarıyla örneklendirilerek ifade edilmiştir. SIMP uygulamalarının yaygınlığıyla beraber farklı uygulama alanlarında da sık bir şekilde ele alınıyor olması optimizasyon çalışmalarının günümüzde üretim için ne kadar önemli olduğunu gözler önüne sermektedir.

Bu tezde topoloji optimizasyonu algoritmalarından olan SIMP ve RAMP yöntemleri bilgisayar destekli tasarım programlarından biri olan Dassault Systemes'in Abaqus/CAE'in içinde bulunan TOSCA modülü kullanılarak, 3 farklı vakada her bir algoritma için aynı hedef fonksiyonunda 5 farklı hacim kısıtlamasında karşılaştırılmıştır. Parçaların tasarım alanları belirlenerek ilk önce sonlu elemanlar analizi için gerekli malzeme girdileri program üzerinde işlenilip, uygulanacak yük ve sınır koşulları belirlenerek oluşturulan von Mises gerilmeleri elde edilmiştir. Daha sonra bu von Mises gerilmeleri elde edilmiş parçalara uygulanacak topoloji optimizasyonlarında hem SIMP hem de RAMP için gerinim enerjisinin minimuma indirilmesi hedef fonksiyonu olarak tanımlanmış, hacim kısıtlaması da %90-%80-%65-%50 ve %35 olarak belirlenmiştir. Her kısıtlama için tek tek hesaplatılan optimizasyon sonuçları, son parça incelemeleri ve parça üzerindeki gerinim analizleri vaka çalışmalarında gösterilmiştir.

Algoritmaların karşılaştırmasında tüm vakalar için; 2 algorithmada da analiz sonuçlarına bakıldığında, optimizasyon sonrası oluşan von Mises gerilmelerinin parçalara dağılımında yüksek gerilim bölgeleri için RAMP algoritmasının performansının daha iyi olduğu ön plana çıkmaktadır. İncelenen hacim kısıtlamaları %90'dan %35'e doğru yönlendiğinde bu fark daha da artmaktadır. Yoğun gerilim bölgelerinde von Mises gerilmeleri parçaya daha uygun dağıtılarak bu bölgelerdeki maksimum gerilmeler SIMP verilerine göre daha düşük elde edilmiştir. RAMP algoritmasıyla optimize edilen parçaların bu nedenle dayanıklılığının daha iyi olduğu ifade edilebilmektedir.

Kısıtlar ve amaç fonksiyonları doğrultusunda modellenen parçanın üretim aşamasına kadar hangi yöntemlerle gidebileceği incelenmiş olup tasarım işlem modelinin bu amaçların doğrultusunda şekillendiği çalışmalarda başarı ile uygulandığı gözlenmiştir. Ancak

uygulamaları yaygınlaştırmak ve sürece etki eden yöntem verilerini zenginleştirmek, yöntemlerdeki eksikliklerin giderilmesine yardımcı olacak ve uygulamaların üretilecek her parçada önemli rol oynamasına sebep olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Shellabear, M., Lenz J., V. Junior. (2004). E-manufacturing with laser sintering—to series production and beyond, in: *Proceedings of the Fourth Laser Assisted Net Shape Engineering, LANE*, September, Erlangen, Germany, 1, 435–444.
2. Alcisto J., Enriquez A., Garcia H., Hinkson S., Steelman T., Silverman E., Valdovino P., Gigerenzer H., Foyos J., Ogren J., Dorey J., Karg K., McDonald T. and Es-Said O.S. (2011). Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V. *Journal of materials engineering and performance*, 20(2), 203-212.
3. İnternet: Sanayi 4.0. URL: ,
<http://www.alomaliye.com/2017/05/29/sanayi-devrimlerinin-sureci-4-sanayi-devrimi/> , Son Erişim Tarihi: 02.09.2019.
4. İnternet: Sanayi 4.0. URL:
<https://www.endustri40.com/endustri-tarihine-kisa-bir-yolculuk/> , Son Erişim Tarihi: 02.09.2019.
5. Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., and Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1191-1203.
6. İnternet: Eklemeli İmalat. URL:
<https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-mjp-3600-series> , Son Erişim Tarihi: 05.09.2019.
7. Kolitsky, M. A. (2014). Reshaping teaching and learning with 3D printing technologies. *E-mentor*, 56(4), 84-94.
8. Chua, C. K., Leong, K. F., and Lim, C. S. (1999). Rapid Prototyping: Principles and Applications, 2nd Edition, by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., p.12 Cross, N. *Design Research: A Diciplined Conversation, Design Issues*, 15(2), 5-10.
9. Vincent, K., Eleanor, L. and Stefan, N. *3D Printing Tips and Tricks*. 1-11, April, 2017.
10. Wieneke-Toutaoui, B. M., and Gerber, H. W. (2003, January). Rapid Prototyping Technology-New potentials for offshore and abyssal engineering. In *The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers*.
11. Vandenbroucke, B., and Kruth, J. P. (2007). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 196-203.
12. İnternet: Eklemeli İmalat. URL:
<https://www.3dsystems.com/our-story> , Son Erişim Tarihi: 10.09.2019.
13. Munz, O. J. (1956). *Photo-Glyph recording*, US Patent, #2,775,758.

14. İnternet: Eklemeli İmalat. URL:
<http://doczz.biz.tr/doc/95362/tersine-m%C3%BCh.-ve-h%C4%B1z%C4%B1-prototipleme-ders-notlar%C4%B1> , Son Erişim Tarihi: 14.09.2019.
15. İnternet: FDM. URL:
<http://novatek3d.com/fdm-teknolojisi-nedir/> , Son Erişim Tarihi: 14.09.2019.
16. Kalita, S. J., Bose, S., Hosick, H. L., and Bandyopadhyay, A. (2003). Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering: C*, 23(5), 611-620.
17. Hutmacher, D. W., Schantz, T., Zein, I., Ng, K. W., Teoh, S. H., and Tan, K. C. (2001). Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 55(2), 203-216.
18. Thrimurthulu, K. P. P. M., Pandey, P. M., and Reddy, N. V. (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), 585-594.
19. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., and Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378.
20. Saffarzadeh, M., Gillispie, G. J., and Brown, P. (2016, April). *Selective Laser Sintering (SLS) rapid prototyping technology: A review of medical applications*. In 53rd Annual Rocky Mountain Bioengineering Symposium, RMBS 2016 and 53rd International ISA Biomedical Sciences Instrumentation Symposium, 142-149
21. Wohlers, T., and Gornet, T. (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24(2014), 118.
22. Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., and Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357-371.
23. İnternet: SLS. URL:
<https://www.poligonmuhendislik.com/bilgi-bankasi/3b-baski-teknolojileri/sls/> , Son Erişim Tarihi: 24.09.2019 .
24. Schmid, M., Amado, A., and Wegener, K. (2014). Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering. *Journal of Materials Research*, 29(17), 1824-1832.
25. İnternet: SLS. URL:
<https://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/selective-laser-sintering-and-melting/> , Son Erişim Tarihi: 08.10.2019
26. Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., and Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401-477.

27. Tolochko, N. K., Arshinov, M. K., Gusarov, A. V., Titov, V. I., Laoui, T., and Froyen, L. (2003). Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder. *Rapid prototyping journal*, 9(5), 314-326.
28. Zhang, B., Li, Y., and Bai, Q. (2017). Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(3), 515-527.
29. Kılıçaslan, A. (2018). *Topoloji Optimizasyonu Yöntemi ile Ağırlığı Azaltılmış, Yeni Bir Araç Taşıyıcı Yüksek Konteyner Kavramsal Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
30. Rao, SS., (1982). *The Finite Element Method in Engineering*, Second Edition, Pergamon Press, Oxford, U.K.
31. Rao, SS., (1992). *Finite Element Method in Engineering*. Second and Third edition
32. Courant, R (1943). Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 49, 1-23.
33. Pepper, D. W., and Heinrich, J. C., (2006). *The Finite Element Method*. Taylor & Francis, New York.
34. Erhunmwun, I. D., and Ikponmwosa, U. B. (2017). Review on finite element method. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 21(5), 999-1002.
35. McHenry, D., (1943). A Lattice Analogy for the Solution of Plane Stress Problems. *Journal of the Institution of Civil Engineers* 21(2), 59-82.
36. Newmark, N. M. (1949). Numerical methods of analysis of bars, plates, and elastic bodies. In *Selected Papers By Nathan M. Newmark: Civil Engineering Classics*. ASCE. 313-344.
37. Argyris, J (1950, 1954). Energy Theorems and Structural Analysis. Aircraft Engineering. In 1960 these papers were consolidated in a book by Butterworths Scientific Publications titled *Energy Theorems and Structural Analysis*.
38. Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., and Topp, L. J. (1956). Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805-823..
39. Clough, R. W. (1960). *The finite element method in plane stress analysis*. In Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh Pa., Sept. 8 and 9, 1960.
40. Geng, J. P., Tan, K. B., and Liu, G. R. (2001). Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. *The Journal of prosthetic dentistry*, 85(6), 585-598.
41. Nazri, N. A., and Sani, M. S. M. (2017, October). Finite element normal mode analysis of resistance welding jointed of dissimilar plate hat structure. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 257(1), 0-9.

42. Khalil, T. B., and Du Bois, P. (2004). Finite element analytical techniques and applications to structural design. *Vehicle crashworthiness and occupant protection, Michigan: American Iron and Steel Institute*, 111-158.
43. Talay, E. (2017). *Sanal Analizler ve Sonuçlarının Yorumlanması*. TOFAŞ Akademi, Bursa.
44. Christensen, J., and Bastien, C. (2015). *Nonlinear optimization of vehicle safety structures: Modeling of structures subjected to large deformations*. Butterworth-Heinemann.
45. Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L. (2000). *The finite element method fifth edition volume 1: the basis*. Massachusetts: Butterworth-Heinemann.
46. Bunday, B. (1984). *Basic Optimization Methods, Edward Arnold*. Bedford square, London, UK.
47. Kahaner, D., Moler, C., and Nash, S. (1989). *Numerical methods and software*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ.
48. Edgar, T. F., Himmelblau, D. M., & Lasdon, L. S. (2001). *Optimization of chemical processes*. McGraw-Hill,
49. Kübat, C. (1983). *Yöneylem Araştırması*, 8. Ulusal Kongresi, Ankara.
50. Rao, S.S. (1978). *Optimization Theory and Applications, 2nd.Edition*. Halsted, Inc.
51. İnternet: Optimizasyon. URL: <https://www.ceyrekmuhendis.com/optimizasyon-nedir/>, Son Erişim Tarihi: 18.10.2019
52. Uzun, H.İ.Y. (2006) *Optimizasyon Tekniklerinde Kullanılan Optimizasyon Tekniklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
53. İnternet: Optimizasyon. URL: http://test.teknolojim.com/web_18065_1/entitalfocus2.aspx?primary_id=3849&target=categoriall&type=783&detail=single , Son Erişim Tarihi: 18.10.2019
54. Varol, E., Alataş, B. (2017). Sürü zekâsında yeni bir yaklaşım: Kuş sürüsü algoritması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* , 8 (1) , 133-146.
55. Gordon, J. E. (2009). *Structures: or why things don't fall down*. Da Capo Press. Penguin, Baltimore.
56. Christensen, P. W., and Klarbring, A. (2008). An introduction to structural optimization. *Solid Mechanics and its Applications. Springer Science & Business Media*.. 153.
57. Zhou, M., Pagalapati, N., Thomas, H. L., and Shyy, Y. K. (2004). An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(5), 308-317.

58. Bendsoe, M. P., and Sigmund, O. (2013). Topology optimization: theory, methods, and applications. *Springer Science & Business Media*.
59. Chu, D. N., Xie, Y. M., Hira, A., and Steven, G. P. (1997). On various aspects of evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. *Finite Elements in Analysis and Design*, 24(4), 197-212.
60. Poyraz, M. (2004). *Bir Kamyon Şasisinin Yapısal Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
61. Thummar, D. R. (2014). *Truss topology optimization using modified genetic algorithm*. Master of Technology in Machine Design, Department of Mechanical Engineering School of Engineering, RK University, Rajkot, Gujarat-360020.
62. İnternet: Yapısal Optimizasyon. URL: <http://analizsimulasyon.com/yapisal-optimizasyon/> , Son Erişim Tarihi: 23.10.2019
63. Sevim, Ö. (2013). *Yapay arı koloni algoritması kullanılarak 3 boyutlu çelik yapıların optimum tasarımı*. Master's thesis, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
64. Strang, G., and Kohn, R. V. (1983). Hencky-Prandtl nets and constrained Michell trusses. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 36(2), 207-222.
65. İnternet: Yapısal Optimizasyon. URL: <https://docplayer.biz.tr/48904953-Urun-tasariminda-yapisal-optimizasyon-yontemleri.html> , Son Erişim Tarihi: 24.10.2019 .
66. İnternet: Yapısal Optimizasyon. URL: http://www.cmap.polytechnique.fr/~optopo/homog_en.html Son Erişim Tarihi: 24.10.2019.
67. Tajs-Zielińska, K., and Bochenek, B. (2017, October). Topology Optimization-Engineering Contribution to Architectural Design. *In IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 245.
68. İnternet: Topoloji. URL: https://www.google.com/search?safe=off&rlz=1C1RLNS_trTR822TR822&sxsrf=A_CYBGNTbBQTaXTHoZ1hY_vHfV20-NNc2g:1571992037219&q=S%C3%B6zl%C3%BCk&stick=H4sIAAAAAAAAAAO NQesSoyi3w8sc9YSmZSWtOXmMU4-LzL0jNc8lMLsnMz0ssqrRiUWIqKeJZxMoRfHhbVc7hPdkAwPF7hzUAAAA&zx=1571992136387#dobs=topoloji_ Son Erişim Tarihi : 25.10.2019 .
69. Rozvany, G. I. N. (2009). A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, 37(3), 217-237.
70. Rozvany G. I. N. (1972a) Grillages of maximum strength and maximum stiffness. *Int J Mech Sci* 14:1217–1222.
71. Rozvany, G. I. N. (1972). Optimal load transmission by flexure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1(3), 253-263.

72. Rozvany, G. I. N. (1993). Layout theory for grid-type structures. In *Topology design of structures*. Springer, Dordrecht, 251-272.
73. Rozvany, G. I. N., Bendsøe, M. P., and Kirsch, U. (1995). Layout optimization of trusses. *Appl. Mech. Rev*, 48.
74. Lewiński, T., and Rozvany, G. I. N. (2007). Exact analytical solutions for some popular benchmark problems in topology optimization II: three-sided polygonal supports. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 33(4-5), 337-349.
75. Lewiński, T., and Rozvany, G. I. N. (2008). Exact analytical solutions for some popular benchmark problems in topology optimization III: L-shaped domains. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35(2), 165-174.
76. Lewiński, T., and Rozvany, G. I. N. (2008). Analytical benchmarks for topological optimization IV: square-shaped line support. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 36(2), 143-158.
77. Bendsoe, M. P., and Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 71, 197–224.
78. Rozvany, G. I. N. (2001). Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. *Structural and Multidisciplinary optimization*, 21(2), 90-108.
79. Bendsoe M. P. and Sigmund O. (2004). *Topological Optimization, Theory, Methods and Application*. Springer Verlag, Berlin.
80. Nguyen, D. S., and Vignat, F. (2017, December). Topology optimization as an innovative design method for additive manufacturing. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE. 304-308.
81. İnternet: Topoloji Optimizasyonu. URL: https://www.researchgate.net/post/why_we_minimize_compliance_in_topology_optimization , Son Erişim Tarihi : 27.10.2019 .
82. Yaman, U. L. A. Ş. (2019). Topoloji Optimizasyonu Yapılmış Parçaların 3B Yazıcılar ile Doğrudan Üretilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), 236-244.
83. Abdi, M., Wildman, R., and Ashcroft, I. (2014). Evolutionary topology optimization using the extended finite element method and isolines. *Engineering Optimization*, 46(5), 628-647
84. Xie, Y. M., and Steven, G. P. (1993). A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & structures*, 49(5), 885-896.
85. Querin, O. M., Steven, G. P., and Xie, Y. M. (1998). Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. *Engineering computations*.

86. Yang, X. Y., Xie, Y. M., Steven, G. P., and Querin, O. M. (1999). Topology optimization for frequencies using an evolutionary method. *Journal of Structural Engineering*, 125(12), 1432-1438.
87. Wang, M. Y., Wang, X., and Guo, D. (2003). A level set method for structural topology optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 192(1-2), 227-246.
88. Allaire, G., Jouve, F., and Toader, A. M. (2004). Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of computational physics*, 194(1), 363-393.
89. Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural optimization*, 1(4), 193-202.
90. Rozvany, G. I. N., Zhou, M., and Birker, T. (1992). Generalized shape optimization without homogenization. *Structural optimization*, 4(3-4), 250-252.
91. Arora Jasbir S. (1989). *Introduction to Optimum Design*. McGraw-Hill Book Company, Elsevier.
92. Li, Q., Steven, G. P., and Xie, Y. M. (1999). Displacement minimization of thermoelastic structures by evolutionary thickness design. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 179(3-4), 361-378.
93. Xie, Y. M., & Steven, G. P. (1997). Basic evolutionary structural optimization. In *Evolutionary structural optimization*. Springer, London. 12-29.
94. Tanskanen, P. (2002). The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 191(47-48), 5485-5498.
95. Özkal, F.M. (2006). *Evrimsel Yapı Optimizasyonu ile Kirişlerde En Uygun Tasarımın Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
96. Hinton, E., and Sienz, J. (1995). Fully stressed topological design of structures using an evolutionary procedure. *Engineering computations*. Swansea, Wales, 12(3) 229–244
97. Usluoğulları, Ö.F. (2006). *Evrimsel Yapı Optimizasyonu Yönteminin İncelenmesi Ve Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
98. Querin, O. M. (1997). *Evolutionary structural optimisation: stress based formulation and implementation*. PhD thesis, Department of Aeronautical Engineering, University of Sydney, Australia.
99. Querin, O. M., Steven, G. P., and Xie, Y. M. (2000). Evolutionary structural optimisation using an additive algorithm. *Finite elements in Analysis and Design*, 34(3-4), 291-308.

100. Young, V., Querin, O. M., Steven, G. P., and Xie, Y. M. (1999). 3D and multiple load case bi-directional evolutionary structural optimization (BESO). *Structural optimization*, 18(2-3), 183-192.
101. Yang, X. Y., Xie, Y. M., Steven, G. P., and Querin, O. M. (1999). Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization. *AIAA journal*, 37(11), 1483-1488.
102. Dorn, W. (1964). Automatic design of optimal structures. *J. de Mecanique*, 3, 25-52.
103. Querin, O. M., Young, V., Steven, G. P., and Xie, Y. M. (2000). Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimisation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 189(2), 559-573.
104. Huang, X., and Xie, Y. M. (2010). A further review of ESO type methods for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(5), 671-683.
105. Huang, X., and Xie, Y. M. (2007). Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43(14), 1039-1049.
106. Brecher, C., Zhao, G., and Fey, M. (2019). Topology optimization for vibrating structures with the BESO method. *Vibroengineering Procedia*, 23, 1-6.
107. Tikenogullari, O. Z. (2015). *Bi-directional evolutionary algorithm for volume constrained topology optimization of axisymmetric solids* (Master's thesis, MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY).
108. Sigmund, O., and Petersson, J. (1998). Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. *Structural optimization*, 16(1), 68-75.
109. Li, Q., Steven, G. P., and Xie, Y. M. (2001). A simple checkerboard suppression algorithm for evolutionary structural optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 22(3), 230-239.
110. Yang, X. Y., Xie, Y. M., Liu, J. S., Parks, G. T., and Clarkson, P. J. (2002). Perimeter control in the bidirectional evolutionary optimization method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 24(6), 430-440.
111. Huang, X., & Xie, Y. M. (2009). Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials. *Computational Mechanics*, 43(3), 393.
112. Ling, E. (2012). *Applications of bi-directional evolutionary structural optimization technique and its extension to transient dynamic problems*. PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Melbourne, Australia.
113. Sánchez-Palencia, E. (1980). Non-homogeneous media and vibration theory. *Lecture notes in physics*, 127.

114. Benoussan, A., Lions, J. L., and Papanicolau, G. (1978). *Asymptotic analysis for periodic structures*. Amsterdam: North-Holland, 887.
115. Cioranescu, D., and Paulin, J. S. J. (1979). Homogenization in open sets with holes. *Journal of mathematical analysis and applications*, 71(2), 590-607.
116. Hassani, B., and Hinton, E. (1998). A review of homogenization and topology optimization I—homogenization theory for media with periodic structure. *Computers & Structures*, 69(6), 707-717.
117. Allaire, G., and Kohn, R. V. (1993). Topology optimization and optimal shape design using homogenization. In *Topology design of structures*. Springer, Dordrecht, 207-218.
118. Allaire, G., Bonnetier, E., Francfort, G., and Jouve, F. (1997). Shape optimization by the homogenization method. *Numerische Mathematik*, 76(1), 27-68.
119. Allaire, G. (2001). Introduction to homogenization theory. *Von Karman Institut Lectures, Multiscale Methods*, 2001-2002.
120. Allaire, G., Jouve, F., and Maillot, H. (2004). Topology optimization for minimum stress design with the homogenization method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 28(2-3), 87-98.
121. Allaire, G. (2012). Shape optimization by the homogenization method. *Springer Science and Business Media*, 146.
122. Bendsøe, M. P., and Sigmund, O. (1995). Optimization of structural topology, shape, and material. Berlin: Springer, 414.
123. Cherkasov, A. (2000). Variational Methods for Structural Optimization. *Springer Science & Business Media*, 140.
124. Cheng, K. T., and Olhoff, N. (1981). An investigation concerning optimal design of solid elastic plates. *International Journal of Solids and Structures*, 17(3), 305-323.
125. Céa, J., Gioan, A., and Michel, J. (1973). Quelques résultats sur l'identification de domaines. *Calcolo*, 10(3-4), 207-232.
126. Tartar, L. (1977). Estimations des coefficients homogénéisés, *Lectures Notes in Mathematics*, 704.
127. Bendsøe, M. P. (1986). Generalized plate models and optimal design. In *Homogenization and effective moduli of materials and media*. Springer, New York, NY, 1-26.
128. Cherkasov, A., and Gibianskii, L. (1984). Design of composite plates of extremal rigidity. *Ioffe Physicotechnical Institute Report*. St. Petersburg, Russia.
129. Lurie, K. A., Cherkasov, A. V., and Fedorov, A. V. (1982). Regularization of optimal design problems for bars and plates, part 1. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 37(4), 499-522.

130. Rozvany, G. I. N., Ong, T. G., Szeto, W. T., Sandler, R., Olhoff, N., & Bendsøe, M. P. (1987). Least-weight design of perforated elastic plates—I. *International journal of solids and structures*, 23(4), 521-536.
131. Goodman, J., Kohn, R. V., and Reyna, L. (1986). Numerical study of a relaxed variational problem from optimal design. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 57(1), 107-127.
132. Kohn, R. V., and Strang, G. (1986). Optimal design and relaxation of variational problems, I. *Communications on pure and applied mathematics*, 39(1), 113-137.
133. Kohn, R. V., and Strang, G. (1986). Optimal design and relaxation of variational problems, II. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 39(2), 139-182.
134. Kohn, R. V., and Strang, G. (1986). Optimal design and relaxation of variational problems, III. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 39(3), 353-377.
135. Bonnetier, E., and Vogelius, M. (1987). Relaxation of a compliance functional for a plate optimization problem. *Applications of Multiple Scaling in Mechanics*, 31-53.
136. Zochowski, A. (1988). Optimal perforation design in 2-dimensional elasticity. *Mechanics of structures and machines*, 16(1), 17-33.
137. Papanicolau, G., Bensoussan, A., and Lions, J. L. (1978). Asymptotic analysis for periodic structures. *Elsevier*, 5.
138. Duvaut, G. (1976, August). Analyse fonctionnelle et mécanique des milieux continus. In *Proceedings of the 14th IUTAM Congress*. Delft, Holland, 119-132.
139. Murat, F., and Tartar, L. (1985). Calcul des variations et homogénéisation.(French)[Calculus of variation and homogenization]. *Les méthodes de l'homogénéisation: théorie et applications en physique*, 57, 319-369.
140. Avellaneda, M. (1987). Optimal bounds and microgeometries for elastic two-phase composites. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 47(6), 1216-1228.
141. Francfort, G. A., and Murat, F. (1986). Homogenization and optimal bounds in linear elasticity. *Archive for Rational mechanics and Analysis*, 94(4), 307-334.
142. Kohn, R. V., and Milton, G. W. (1986). On bounding the effective conductivity of anisotropic composites. In *Homogenization and effective moduli of materials and media*. Springer, New York, NY, 97-125.
143. Lurie, K. A., and Cherkaev, A. V. (1984). Exact estimates of conductivity of composites formed by two isotropically conducting media taken in prescribed proportion. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Section A: Mathematics*, 99(1-2), 71-87.
144. Kohn, R. V., and Vogelius, M. (1984). A new model for thin plates with rapidly varying thickness. *International Journal of Solids and Structures*, 20(4), 333-350.

145. Kohn, R. V., and Vogelius, M. (1985). A new model for thin plates with rapidly varying thickness. II. A convergence proof. *Quarterly of applied mathematics*, 43(1), 1-22.
146. Kohn, R. V., and Vogelius, M. (1986). A new model for thin plates with rapidly varying thickness. III. Comparison of different scalings. *Quarterly of applied mathematics*, 44(1), 35-48.
147. Suzuki, K., and Kikuchi, N. (1991). A homogenization method for shape and topology optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 93(3), 291-318.
148. Díaz, A. R., and Kikuchi, N. (1992). Solutions to shape and topology eigenvalue optimization problems using a homogenization method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35(7), 1487-1502.
149. Ma, Z. D., Kikuchi, N., Cheng, H. C., and Hagiwara, I. (1995). Topological optimization technique for free vibration problems. *Journal of applied mechanics*, 62(1), 200-207.
150. Ma, Z. D., Kikuchi, N., and Cheng, H. C. (1995). Topological design for vibrating structures. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 121(1-4), 259-280.
151. Ananthasuresh, G. K., Kota, S., and Gianchandani, Y. (1993, November). Systematic synthesis of microcompliant mechanisms-preliminary results. In *3-rd National Applied Mechanisms and Robotics Conference*. Cincinnati, OH, November, 82.
152. Nishiwaki, S., Frecker, M. I., Min, S., and Kikuchi, N. (1998). Topology optimization of compliant mechanisms using the homogenization method. *International journal for numerical methods in engineering*, 42(3), 535-559.
153. Allaire, G., and Capdeboscq, Y. (2000). Homogenization of a spectral problem in neutronic multigroup diffusion. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 187(1-2), 91-117.
154. Allaire, G., and Jouve, F. (2002). Optimal design of micro-mechanisms by the homogenization method. *Revue Européenne des Eléments*, 11(2-4), 405-416.
155. Diaz, A. R., and Bendsøe, M. (1992). Shape optimization of structures for multiple loading conditions using a homogenization method. *Structural optimization*, 4(1), 17-22.
156. Osher, S., and Sethian, J. A. (1988). Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *Journal of computational physics*, 79(1), 12-49.
157. Sethian, J. A., and Wiegmann, A. (2000). Structural boundary design via level set and immersed interface methods. *Journal of computational physics*, 163(2), 489-528.

158. Osher, S. J., and Santosa, F. (2001). Level set methods for optimization problems involving geometry and constraints: I. Frequencies of a two-density inhomogeneous drum. *Journal of Computational Physics*, 171(1), 272-288.
159. Belytschko, T., Xiao, S. P., and Parimi, C. (2003). Topology optimization with implicit functions and regularization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57(8), 1177-1196.
160. Wang, M. Y., and Wang, X. (2004). "Color" level sets: a multi-phase method for structural topology optimization with multiple materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(6-8), 469-496.
161. Luo, J., Luo, Z., Chen, S., Tong, L., and Wang, M. Y. (2008). A new level set method for systematic design of hinge-free compliant mechanisms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(2), 318-331.
162. Chen, S., Wang, M. Y., and Liu, A. Q. (2008). Shape feature control in structural topology optimization. *Computer-Aided Design*, 40(9), 951-962.
163. Dambrine, M., and Kateb, D. (2010). On the ersatz material approximation in level-set methods. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 16(3), 618-634.
164. Allaire, G., and Jouve, F. (2005). A level-set method for vibration and multiple loads structural optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(30-33), 3269-3290.
165. İnternet: Level Set Yöntemi. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Level-set_method#/media/File:Level_set_method.png , Son Erişim Tarihi: 15.11.2019 .
166. Rong, J. H., and Liang, Q. Q. (2008). A level set method for topology optimization of continuum structures with bounded design domains. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 197(17-18), 1447-1465.
167. Yamada, T., Yamasaki, S., Nishiwaki, S., Izui, K., and Yoshimura, M. (2008). A study of boundary settings in the design domain for structural optimization based on the level set method. *Transactions of the Japan Society for Industrial and Applied Mathematics*, 18(3), 487-505.
168. Allaire, G., De Gournay, F., Jouve, F., and Toader, A. M. (2005). Structural optimization using topological and shape sensitivity via a level set method. *Control and cybernetics*, 34(1), 59.
169. Eschenauer, H. A., Kobelev, V. V., and Schumacher, A. (1994). Bubble method for topology and shape optimization of structures. *Structural optimization*, 8(1), 42-51.
170. Wang, S. Y., Lim, K. M., Khoo, B. C., and Wang, M. Y. (2007). An extended level set method for shape and topology optimization. *Journal of Computational Physics*, 221(1), 395-421.

171. Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., and Takezawa, A. (2010). A topology optimization method based on the level set method incorporating a fictitious interface energy. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(45-48), 2876-2891.
172. Guo, X., Zhang, W., and Zhong, W. (2014). Explicit feature control in structural topology optimization via level set method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 272, 354-378.
173. Sussman, M., Smereka, P., & Osher, S. (1994). A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *Journal of Computational physics*, 114(1), 146-159.
174. Chang, Y. C., Hou, T. Y., Merriman, B., and Osher, S. (1996). A level set formulation of Eulerian interface capturing methods for incompressible fluid flows. *Journal of computational Physics*, 124(2), 449-464.
175. Sussman, M., and Puckett, E. G. (2000). A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows. *Journal of computational physics*, 162(2), 301-337.
176. Son, G., and Dhir, V. K. (1998). *Numerical simulation of film boiling near critical pressures with a level set method*. 183-192.
177. Ye, J. C., Bresler, Y., and Moulin, P. (2002). A self-referencing level-set method for image reconstruction from sparse Fourier samples. *International Journal of Computer Vision*, 50(3), 253-270.
178. Tsai, R., and Osher, S. (2003). Level set methods and their applications in image science. *Communications in Mathematical Sciences*, 1(4), 1-20.
179. van den Doel, K., and Ascher, U. M. (2006). On level set regularization for highly ill-posed distributed parameter estimation problems. *Journal of Computational Physics*, 216(2), 707-723.
180. Sethian, J. A. (1999). *Level set methods and fast marching methods: evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science*. Cambridge university press, 3.
181. Deaton, J. D., and Grandhi, R. V. (2014). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(1), 1-38.
182. Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (1999). Material interpolation schemes in topology optimization. *Archive of applied mechanics*, 69(9-10), 635-654.
183. Rozvany, G. I. N., Zhou, M., and Gollub, W. (1990). Continuum-type optimality criteria methods for large finite element systems with a displacement constraint. Part II. *Structural optimization*, 2(2), 77-104.

184. Zhou, M., and Rozvany, G. I. N. (1991). The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89(1-3), 309-336.
185. Zhou, X., Chen, L., and Huang, Z. (2009). The SIMP-SRV method for stiffness topology optimization of continuum structures. *International Journal of CAD/CAM*, 7(1).
186. Rietz, A. (2001). Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(2), 159-163.
187. Martinez, J. M. (2005). A note on the theoretical convergence properties of the SIMP method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 29(4), 319-323.
188. Stolpe, M., and Svanberg, K. (2001). On the trajectories of penalization methods for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(2), 128-139.
189. Sigmund, O. (2007). Morphology-based black and white filters for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 33(4-5), 401-424.
190. Eschenauer, H. A., and Olhoff, N. (2001). Topology optimization of continuum structures: a review. *Applied Mechanics Reviews*, 54(4), 331-390.
191. Stolpe, M., and Svanberg, K. (2001). An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 22(2), 116-124.
192. Bruns, T. E. (2005). A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid-void topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 30(6), 428-436.
193. Fuchs, M. B., Jiny, S., and Peleg, N. (2005). The SRV constraint for 0/1 topological design. *Structural and Multidisciplinary optimization*, 30(4), 320-326.
194. Haber, R. B., Jog, C. S., and Bendsøe, M. P. (1996). A new approach to variable-topology shape design using a constraint on perimeter. *Structural optimization*, 11(1-2), 1-12.
195. Petersson, J., and Sigmund, O. (1998). Slope constrained topology optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 41(8), 1417-1434.
196. Zhou, M., Shyy, Y. K., and Thomas, H. L. (2001). Checkerboard and minimum member size control in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(2), 152-158.
197. Borrvall, T., and Petersson, J. (2001). Topology optimization using regularized intermediate density control. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(37-38), 4911-4928.
198. Poulsen, T. A. (2003). A new scheme for imposing a minimum length scale in topology optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57(6), 741-760.

199. Sigmund, O. (1994). *Design of material structures using topology optimization* Doctoral dissertation, Technical University of Denmark.
200. Borrvall, T. (2001). Topology optimization of elastic continua using restriction. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 8(4), 351-385.
201. Bruns, T. E., and Tortorelli, D. A. (2001). Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190(26-27), 3443-3459.
202. Sankaranarayanan, S., Haftka, R. T., and Kapania, R. K. (1994). Truss topology optimization with simultaneous analysis and design. *AIAA journal*, 32(2), 420-424.
203. Rossow, M. P., and Taylor, J. E. (1973). A finite element method for the optimal design of variable thickness sheets. *AIAA journal*, 11(11), 1566-1569.
204. Aremu, A., Ashcroft, I., Hague, R., Wildman, R., and Tuck, C. (2010, August). Suitability of SIMP and BESO topology optimization algorithms for additive manufacture. In *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)–An Additive Manufacturing Conference*. 21, 679-692.
205. Brackett, D., Ashcroft, I., & Hague, R. (2011, August). Topology optimization for additive manufacturing. In *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*. Austin, TX 1, 348-362.
206. İnternet: SIMP. URL:
http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?id=123fa99ec61b462c8390762e33fdd7f2#Pg0 , Son Erişim Tarihi: 30.11.2019 .
207. Gibson, I., Rosen, D. W., and Stucker, B. (2014). *Additive manufacturing technologies* New York: Springer, 17.
208. Chu, D. N., Xie, Y. M., Hira, A., and Steven, G. P. (1996). Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. *Finite Elements in Analysis and Design*, 21(4), 239-251.
209. Özkal, F. M., and Uysal, H. (2010). Üç boyutlu konsol kirişlerde topoloji optimizasyonu uygulamaları. *Int. J. Eng*, 2(1), 54.
210. Çelik, E. (2017). *Evrimsel ve topoloji optimizasyon yöntemi ile eğilmeye çalışılan boşluklu kirişlerin boyut analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
211. Xia, L., Xia, Q., Huang, X., and Xie, Y. M. (2018). Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: a comprehensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(2), 437-478.
212. Xia, Q., Shi, T., Wang, M. Y., and Liu, S. (2011). Simultaneous optimization of cast part and parting direction using level set method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 44(6), 751-759.

213. Shu, L., Wang, M. Y., Fang, Z., Ma, Z., and Wei, P. (2011). Level set based structural topology optimization for minimizing frequency response. *Journal of Sound and Vibration*, 330(24), 5820-5834.
214. Jain, N., Bankoti, S., and Saxena, R. (2015). Topological optimization of isotropic material using optimal criteria method. *Int J Res Emerg Sci Technol*, 2(2), 41-47.
215. Gebisa, A. W., and Lemu, H. G. (2017, December). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 276(1), 12-26.
216. Saadlaoui, Y., Milan, J. L., Rossi, J. M., and Chabrand, P. (2017). Topology optimization and additive manufacturing: *Comparison of conception methods using industrial codes*. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 178-186.
217. Top, N., Şahin, İ., ve Gökçe, H. (2018). 3B Yazıcı Teknolojisi için Topoloji Optimizasyonu: Otomotivde Salıncak Kolu Üzerine bir Çalışma. In *Third International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE)*.
218. Neslihan, T. O. P., Gökçe, H., ve Şahin, İ. (2019). Eklemeli İmalat İçin Topoloji Optimizasyonu: El Freni Mekanizması Uygulaması. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 18(1), 1-13.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ATEŞ, Fuat Sinan
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 26.09.1991, Ankara
Telefon : 05076669568
E-posta : fuatsinan@yahoo.com



Eğitim Bilgileri

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi – Endüstriyel Tasarım Müh.	Devam Ediyor
Ön Lisans	Anadolu Üni-Radyo ve Televizyon Prog.	Devam Ediyor
Lisans	Anadolu Üni.-İşletme	2016
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üni.- Makina Müh.	2015

İş Deneyimleri

Yıl	Yer	Görev
2018 - Halen	Avrupa Birliği Başkanlığı	Memur
2017 - 2018	Komel Enerji	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Ateş, F. S., Şahin, İ. ve Gökçe, H. (2019). *Eklemeli İmalat İçin Topoloji Optimizasyonu Üzerine Bir Çalışma*, BİLTEK Uluslararası Bilim Teknoloji ve Sosyal Güncel Gelişmeler Sempozyumu, Ankara.

Hobiler

Basketbol oynamak, seyahat etmek, araştırmak, balık tutmak.



GAZİ GELECEKTİR..