T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK GÖVDE MOTOR BAKIM ANABİLİM DALI

HAVA ARACI ALTERNATÖR BRAKETİNİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE YENİDEN TASARIMI VE EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMESİ

Hazırlayan
Hakan YEŞİLKAYA

Danışman
Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

Nisan 2025
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK GÖVDE MOTOR BAKIM ANABİLİM DALI

HAVA ARACI ALTERNATÖR BRAKETİNİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE YENİDEN TASARIMI VE EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Hakan YEŞİLKAYA

Danışman
Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FLY-2024-13485 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Nisan 2025
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Hakan YEŞİLKAYA

İmza

“Hava Aracı Alternatör Braketinin Topoloji Optimizasyonu ile Yeniden Tasarımı ve Eklemeli İmalat ile Üretilmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Hakan YEŞİLKAYA	Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM

Uçak Gövde Motor Bakım ABD Başkanı

Doç. Dr. Veysel ERTURUN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince bana yol gösterici olan, akademik sürecimin başlamasında rol model aldığım ve idol olarak benimsediğim, yaptığım tüm çalışmalarda bilgi birikiminden yararlandığım, tecrübesi ve donanımı ile bana yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, sayın danışman hocam Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte tecrübelerini ve deneyimlerini benimle paylaşan, bilgi birikiminden yararlandığım ve birçok konuda kendimi geliştirebilmem için fırsatlar sunan sayın Ar. Gör. Muhammed İkbal KARA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımı FLY-2024-13485 kodlu proje ile destekleyen Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım çalışmalarda laboratuvarlarını kullanmama imkân tanıyan ülkemizin saygıdeğer kurumlarından TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. kurumuna teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda kullandığım ham maddelerin üretiminde bana yardımcı olan Filameon markasına teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında beni destekleyen, aldığım kararlara saygı duyan ve bana yol gösteren başta annem Gülnaz YEŞİLKAYA, babam Mustafa YEŞİLKAYA ve ikiz kardeşim Kaan YEŞİLKAYA olmak üzere tüm aile fertlerime teşekkürlerimi sunarım.

Hakan YEŞİLKAYA

Nisan 2025, KAYSERİ

HAVA ARACI ALTERNATÖR BRAKETİNİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE YENİDEN TASARIMI VE EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMESİ

Hakan YEŞİLKAYA

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Nisan 2025
Danışman: Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM

ÖZET

Hava araçlarında çok sayıda bulunan braket parçalarının kütlelerinin azaltılması ile hava araçlarının faydalı yük taşıma kapasitelerinin ve uçuş performanslarının artırılması mümkündür. Topoloji optimizasyonunun (TO) ve eklemeli imalat yöntemlerinin (Eİ) beraber kullanımı, hava aracı braket parçalarının mekanik gereksinimleri karşılayarak hafifletilmesine ve karmaşık geometriye sahip yapıların üretilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, Eİ'nin kullanım alanlarının genişletilebilmesi ve kullanılan ham maddelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi için 1 kg polilaktik asit (PLA) filamente ağırlıkça %0,5 (5 g), %1,0 (10 g), %1,5 (15 g) ve %2,0 (20 g) oranlarında nano grafen katılmıştır. Her bir filament çekme testine tabi tutularak nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çekme testleri sonucunda elde edilen verilerde en yüksek çekme dayanımı, kopma uzaması ve Young modülü değerleri sırası ile %2,0, %0 ve %1,0 nano grafen katkılı PLA filamentlerde elde edilmiştir. Hava araçlarında motor montaj ve alternatör destek braketi olarak görev yapan bir hava aracı parçasının optimum tasarımının bulunabilmesi için orijinal parça tasarımına farklı oranlarda (%10, %20, %30, %40, %50, %60, %70 ve %80) TO uygulanmıştır. Tüm tasarımlara sayısal yapısal analiz testi uygulanarak toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü değerleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen sayısal testler sonucunda optimum tasarım %50 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parçada elde edilmiştir. Orijinal ve optimum tasarım PLA filament ile eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretim sonucunda hafifletme oranının doğruluğu ve TO ile tasarımı yenilenen parçaların Eİ kullanılarak üretilebilirliği ortaya konmuştur. Çalışma sonucunda orijinalinden daha hafif ve mekanik gereksinimleri karşılayabilen alternatif bir hava aracı parçası üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Topoloji optimizasyonu, Eklemeli imalat, Kütle azaltma, Sonlu elemanlar yöntemi, Nano grafen.

REDESIGN OF AIRCRAFT ALTERNATOR BRACKET WITH TOPOLOGY OPTIMIZATION AND ITS PRODUCTION BY ADDITIVE MANUFACTURING

Hakan YEŞİLKAYA

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, April 2025
Supervisor: Assoc. Prof. Çağrı Vakkas YILDIRIM

ABSTRACT

It is possible to increase the payload carrying capacity and flight performance of aircraft by reducing the mass of bracket parts, which are found in large numbers in aircraft. The combined use of topology optimization (TO) and additive manufacturing methods (AM) allows aircraft bracket parts to be lightened and structures with complex geometries to be produced by meeting mechanical requirements. In this study, 0.5% (5 g), 1.0% (10 g), 1.5% (15 g) and 2.0% (20 g) nano-graphene was added to 1 kg polylactic acid (PLA) filament by weight. Each filament was subjected to tensile test and the effect of nano graphene doping on the mechanical properties of PLA filament was investigated. The highest tensile strength, elongation at break and Young's modulus values were obtained in PLA filaments doped with 2.0%, 0% and 1.0% nano graphene, respectively. In order to find the optimum design of an aircraft part that serves as an engine mounting and alternator support bracket in aircraft, TO was applied to the original part design at different rates (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% and 80%). Numerical structural analysis tests were applied to all designs and total deformation, von-Mises stress and safety factor values were analyzed. As a result of the numerical tests, the optimum design was obtained in the redesigned part with a 50% lightening rate. The original and optimum design were produced using PLA filament and fused deposition modeling (FDM) method. As a result of the production, the accuracy of the lightweighting ratio and the manufacturability of the redesigned parts with TO using AM were demonstrated. As a result of the study, an alternative aircraft part that is lighter than the original and can meet the mechanical requirements has been produced.

Keywords: Topology optimization, Additive manufacturing, Mass reduction, Finite element method, Nano graphene.

İÇİNDEKİLER

HAVA ARACI ALTERNATÖR BRAKETİNİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE YENİDEN TASARIMI VE EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
KABUL VE ONAY iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR xi
TABLOLAR LİSTESİ xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiv
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri 3
1.1.1. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması 5
1.1.1.1. Fotopolimerizasyon 7
1.1.1.2. Malzeme Ekstrüzyon 10
1.1.1.3. Malzeme Püskürtme 12
1.1.1.4. Yapıştırıcı ile Eklemeli İmalat 13
1.1.1.5. Toz Yataklı Eritme 15
1.1.1.6. Direkt Enerji Depolama 19
1.1.1.7. Levha/Sac Laminasyon 21
1.1.2. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Kullanım Alanları 22
1.1.2.1. Havacılık Endüstrisi 23
1.1.2.2. Otomotiv Endüstrisi 23
1.1.2.3. Sağlık Endüstrisi 24
1.1.2.4. Yapı Endüstrisi 25

1.1.2.5. Sanat ve Hobi Endüstrisi 25
1.1.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Kullanılabilen Malzemeler 26
1.1.3.1. Polilaktik Asit 28
1.2. Nano Tozlar 29
1.2.1. Nano Grafen 31
1.3. Tasarım Optimizasyonları 32
1.3.1. Yapısal Optimizasyon 33
1.3.1.1. Boyut Optimizasyonu 34
1.3.1.2. Şekil Optimizasyonu 34
1.3.1.3. Topoloji Optimizasyonu 34
1.3.1.3.1. Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri 35

2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Literatür Taraması 38

3. BÖLÜM

MALZEME VE MATERYAL

3.1. Nano Grafen Katkılı PLA Filamentlerin Üretimi 50
3.2. Çekme Testleri 51
3.3. Topoloji Optimizasyonu 55
3.3.1. Parça Seçimi ve Parçanın Modellenmesi 56
3.3.2. Orijinal Parça Tasarımı 63
3.3.3. Yenilenmiş Parça Tasarımı 68

4. BÖLÜM

BULGULAR

4.1. Çekme Testi 75
4.1.1. Çekme Dayanımı 75
4.1.2. Kopma Uzaması 78
4.1.3. Young Modülü 79
4.2. Mesh Kalitesi 81
4.2.1. Element Kalitesi 81
4.2.2. En-Boy Oranı 82
4.2.3. Çarpıklık 83
4.3. Toplam Deformasyon Sonuçları 84

4.3.1. Minimum Toplam Deformasyon 84
4.3.2. Maksimum Toplam Deformasyon 85
4.3.3. Ortalama Toplam Deformasyon 87
4.4. von-Mises Stres Sonuçları 89
4.4.1. Minimum von-Mises Stres 89
4.4.2. Maksimum von-Mises Stres 91
4.4.3. Ortalama von-Mises Stres 93
4.5. Güvenlik Faktörü Sonuçları 94
4.6. Orijinal ve Optimum Parça Tasarımlarının Üretimi 96

5. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Tartışma 98
5.2. Sonuç 99
5.3. Öneriler 101
KAYNAKÇA 102
ÖZGEÇMİŞ 112

KISALTMALAR

ABS : Akrilonitril Bütadien Stiren
ABS-CF : Karbon Fiber Takviyeli Akrilonitril Bütadien Stiren
ASA : Acrylonitrile Styrene Acrylate
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
BJ : Binder jetting (Yapıştırıcı ile Eklemeli İmalat)
BO : Boyut Optimizasyonu
CAD : Computer Aided Design
CDPL : Continuous Digital Light Processing (Aralıksız Dijital Işık İşleme)
DBM : Deep Boltzmann Machine (Derin Boltzmann Makinesi)
DLP : Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)
DMLS : Direct Metal Laser Sintering (Direkt Metal Lazer Sinterleme)
DOD : Delivery on Demand (İstek Üzerine Bırakma)
EBAM : Electron Beam Additive Manufacturing (Elektron Işını Eklemeli İmalat)
EBM : Electron Beam Melting (Elektron Işını Eritme)
Eİ : Eklemeli İmalat Yöntemleri
EUV : Extreme Ultraviolet (Aşırı Ultraviyole)
ESO : Evolutionary Structural Optimization (Evrimsel yapı optimizasyonu)
FDM : Fused Deposition Modeling (Eriyik Yığma Modelleme)
FEM : Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FFF : Fused Filament Fabrication
HM : Homogenization Method (Homojenleştirme metodu)
LCM : Lithography-based Ceramics
LENS : Laser Engineering Net Shaping (Lazer Toz Şekillendirme)
LSA : Level Set Approach (Seviye kümesi yaklaşımı)
LSM : Log Structured Merge Tree (Log Yapılandırılmış Birleştirme Ağacı)
LOM : Laminated object manufacturing (Tabakalı Obje Üretimi)
MJ : Material Jetting (Malzeme Püskürtme)
MJF : Multi Jet Fusion (Multijet Eritme)
NPJ : NanoParticle Jetting (Nanopartikül Püskürtme)

PC : Polikarbonat

PC-ABS : Polikarbonat-akrilonitril Bütadien Stiren

PEEK : Polietereterketon

PLA : Polilaktik Asit

PPSU : Poliarilsülfon

SLA : Stereolitografi

SLM : Selective Laser Melting (Seçici Lazer Eritme)

SLS : Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)

SIMP : Solid Isotropic Microstructure with Penalization (Penalizasyon ile katı izotropik malzeme metodu)

STL : Standard Triangle Language

ŞO : Şekil Optimizasyonu

TO : Topoloji Optimizasyonu

UV : Ultraviyole

USP : Ultrasonik Sprey Piroliz

YO : Yapısal Optimizasyon

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Eİ'nin sınıflandırması 6
Tablo 2. Eİ'nin genel özellikleri 27
Tablo 3. Eİ'nde kullanılabilen malzemeler 28
Tablo 4. Tek tabakalı grafenin genel özellikleri 31
Tablo 5. Şeffaf PLA + filamentin genel özellikleri. 50
Tablo 6. Nano grafenin genel özellikleri. 50
Tablo 7. Creality Ender-3 S1 makinesinin genel özellikleri. 52
Tablo 8. Üretim için kullanılan sabit parametreler. 53
Tablo 9. SHIMADZU AG-X 50 kN çekme test cihazının genel özellikleri. 55
Tablo 10. Continental 470 sersi motorların kuru kütleleri 59
Tablo 11. Continental 520 sersi motorların kuru kütleleri 60
Tablo 12. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi. 63
Tablo 13. AlSi10Mg alaşımının mekanik özellikleri. 64
Tablo 14. Orijinal parça üzerinde oluşan mesh yapısının düğüm ve eleman sayıları. . 66
Tablo 15. Orijinal ve yenilenmiş tasarımlara ait final hacim ve kütle değerleri. 70
Tablo 16. Yenilenmiş parça üzerinde oluşan mesh yapısının düğüm ve eleman sayıları. 73
Tablo 17. Çekme dayanımının yüzdelik değişimleri. 76
Tablo 18. Kopma uzamasının yüzdelik değişimleri. 78
Tablo 19. Young modülünün yüzdelik değişimleri. 80
Tablo 20. Maksimum toplam deformasyonun yüzdelik değişimleri. 86
Tablo 21. Ortalama toplam deformasyonun yüzdelik değişimleri. 88
Tablo 22. Minimum von-Mises stresin yüzdelik değişimleri. 90
Tablo 23. Maksimum von-Mises stresin yüzdelik değişimleri. 92
Tablo 24. Ortalama von-Mises stresin yüzdelik değişimleri. 93
Tablo 25. Güvenlik faktörünün yüzdelik değişimleri. 95

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Eksiltici imalatın ve eklemeli imalatın karşılaştırılması. (a) Eksiltici imalat prosesi. (b) Eİ prosesi 4
Şekil 2. Eİ'nde parça imalat süreci 5
Şekil 3. Fotopolimerizasyon yöntemlerinin şematik gösterimi 7
Şekil 4. SLA yönteminin şematik gösterimi 8
Şekil 5. DLP yönteminin şematik gösterimi 9
Şekil 6. CDLP yönteminin şematik gösterimi 10
Şekil 7. Malzeme ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi 11
Şekil 8. Malzeme püskürtme yöntemlerinin şematik gösterimi 12
Şekil 9. Yapıştırıcı ile eklemeli imalat yönteminin şematik gösterimi 14
Şekil 10. Toz yataklı eritme yöntemlerinin şematik gösterimi 16
Şekil 11. Tel bazlı direkt enerji depolama yöntemlerinin şematik gösterimi 20
Şekil 12. Toz bazlı direkt enerji depolama yöntemlerinin şematik gösterimi 21
Şekil 13. Levha/sac laminasyon yönteminin şematik gösterimi 22
Şekil 14. Optimizasyon algoritmasının şematik gösterimi 33
Şekil 15. BO'nun şematik gösterimi 34
Şekil 16. ŞO'nun şematik gösterimi. 34
Şekil 17. TO'nun şematik gösterimi 35
Şekil 18. (a) Menteşe braketinin orijinal tasarımı, (b) menteşe braketinin yenilenmiş tasarımı 39
Şekil 19. Orijinal braket tasarımının sayısal analizleri, (a) Yapının toplam deformasyon değerleri, (b) Yapının eşdeğer stres değerleri 40
Şekil 20. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı, (b) Braket parçasının yenilenmiş tasarımı 41
Şekil 21. TO sonrasında braket tasarımının yeniden yapılandırılması 41
Şekil 22. (a) Orijinal braket tasarımının y ekseninde deformasyon ve eşdeğer stres değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının y ekseninde deformasyon ve eşdeğer stres değerleri 42
Şekil 23. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı, (b) Braket parçasının yenilenmiş tasarımı 43

Şekil 24. (a) Orijinal braket tasarımının deformasyon ve von-Mises değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının deformasyon ve von-Mises değerleri.....44
Şekil 25. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı (b) Braket parçasının TO ile yenilenmiş tasarımı (c) Braket parçasının PolyNURBS ile yenilenmiş tasarımı.....45
Şekil 26. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı, (b) Braket parçasının yenilenmiş tasarımı.....46
Şekil 27. (a) Orijinal braket tasarımının von-Mises değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının von-Mises değerleri.....47
Şekil 28. (a) Orijinal braket tasarımının von-Mises değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının von-Mises değerleri.....47
Şekil 29. Çalışmanın ilerleyiş şeması.....49
Şekil 30. Deney numunelerinin ölçüleri.....51
Şekil 31. Creality Ender-3 S1 makinesinin (a) önden görünümü ve otomatik kalibrasyon parçası, (b) arkadan görünümü, (c) ve (d) çift z eksen parçaları.....52
Şekil 32. Creality Ender-3 S1 makinesi ile üretilen deney numuneleri. 54
Şekil 33. SHIMADZU AG-X 50 kN çekme test cihazı. 55
Şekil 34. 642266 numaralı parça.....56
Şekil 35. 642266 numaralı parçanın O470 ve IO470 motor tiplerinde gösterimi.....57
Şekil 36. O470 serisi motorlara ait teknik resim 57
Şekil 37. O470A, B, E, G, J, K, L, M, P, R, S, U motor tiplerine ait crankcase teknik resmi.....58
Şekil 38. TSIO520C, G, H, M, P, R motor tiplerine ait crankcase teknik resmi.....58
Şekil 39. O470A, B, E, G, J, K, L, M, P, R, S, U motor tiplerine ait alternatör teknik resmi.....59
Şekil 40. 642266 numaralı parçanın Solidworks görselleri.....62
Şekil 41. 642266 numaralı parçanın çizim gösterimi.....62
Şekil 42. ANSYS Workbench 2022 R2'ye ait ilerleyiş şeması.....63
Şekil 43. ANSYS Workbench 2022 R2'de AlSi10Mg malzemesinin tanımlanması..64
Şekil 44. ANSYS Workbench Mechanical'a ait ilerleyiş şeması.....65
Şekil 45. Orijinal tasarıma ait sonlu elemanlar ağ yapısı. 66
Şekil 46. Sınır şartlarının parça üzerinde farklı açılardan gösterimi. 67

Şekil 47. Optimizasyon bölgelerinin parça üzerinde farklı açılardan gösterimi. 68
Şekil 48. TO sonucunda parçaların ön tasarımları. 69
Şekil 49. TO sonucunda parçalardan çıkarılacak bölgeler. 69
Şekil 50. Orijinal ve yenilenen parça tasarımlarının ANSYS Workbench Mechanical'da gösterimi. 71
Şekil 51. ANSYS Workbench 2022 R2'ye ait ilerleyiş şeması.....71
Şekil 52. ANSYS Workbench Mechanical'a ait ilerleyiş şeması.....72
Şekil 53. Parça tasarımlarına ait sonlu elemanlar ağ yapısı. 73
Şekil 54. Sınır şartlarının parça tasarımları üzerinde gösterimi. 74
Şekil 55. Farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin çekme dayanımı sonuçları. 76
Şekil 56. Farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin kopma uzaması sonuçları. 78
Şekil 57. Farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin Young modülü sonuçları. 79
Şekil 58. Parça tasarımlarının ortalama element kalitesi değerleri. 81
Şekil 59. Parça tasarımlarının ortalama en-boy oranı değerleri. 82
Şekil 60. Parça tasarımlarının ortalama çarpıklık değerleri. 83
Şekil 61. Toplam deformasyonun parça tasarımları üzerinde gösterimi. 84
Şekil 62. Parça tasarımlarının maksimum toplam deformasyon değerleri. 85
Şekil 63. Parça tasarımlarının ortalama toplam deformasyon değerleri.....88
Şekil 64. von-Mises stresin parça tasarımları üzerinde gösterimi. 89
Şekil 65. Parça tasarımlarının minimum von-Mises stres değerleri. 90
Şekil 66. Parça tasarımlarının maksimum von-Mises stres değerleri.....91
Şekil 67. Parça tasarımlarının ortalama von-Mises stres değerleri. 93
Şekil 68. Güvenlik faktörünün parça tasarımları üzerinde gösterimi. 94
Şekil 69. Parça tasarımlarının güvenlik faktörü değerleri. 95
Şekil 70. Creality Ender-3 S1 makinesi kullanılarak üretilen (a) orijinal parça (b) optimum parça. 97
Şekil 71. Creality Ender-3 S1 makinesi kullanılarak üretilen (a) orijinal parçanın kütlesi (b) optimum parçanın kütlesi. 97

GİRİŞ

Hava yolu yolcu ve kargo taşımacılığı kullanımının günden güne artması sebebi ile hava araçlarına duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Artan hava aracı ihtiyaçlarını karşılamak adına yeni hava araçlarının üretilmesi büyük maliyetleri ortaya çıkarmaktadır. Hava araçlarında mevcut bulunan bazı parçaların hafifletilmesi ile faydalı yük taşıma kapasitesinin artırılması mümkündür. Hava araçlarında kütle azaltması ile uçuş hızı ve itme/ağırlık oranı gibi değerler iyileştirilebilmektedir [1].

Hava araçlarının kütlelerinin azaltılması noktasında öne çıkan uygulamalardan biri hava araçlarının braket parçalarının tasarımsal olarak değiştirilmesi ve hafifletilmesidir. Bu braket parçaları ilk tasarlandıkları yıllarda tasarımcıları tarafından üretilebilirlik koşulları ön planda tutularak tasarlanmış parçalardır. Geleneksel üretim yöntemleri (tornalama, frezeleme, delme, dövme ve döküm) ile üretilen bu parçalarda tasarım ve üretim kısıtı vardır. İlk tasarlandıkları yıllarda bu parçaların tasarımı noktasında computer aided design (CAD) araçlarının tasarımcıyı sınırlaması da parçaların hafif olarak tasarlanmasının önünde engel oluşturmaktadır.

Topoloji optimizasyonu (TO) yapısal gereklilikleri yerine getirebilen, yeterli mekanik özellikleri taşıyabilen ve orijinalinden daha hafif yeni braket parçalarının tasarlanmasına olanak tanımaktadır. TO ile tasarımı yenilenen parçalar zorlu üretim geometrilerine sahip olabilmektedirler. Yenilenmiş tasarımlarda hafiflik sağlanması adına tasarımlar geometrik bir sınırlama gözetilmeden tasarlanabilmektedir. Bu sebeple tasarlanan yeni braket parçalarının geleneksel yöntemlerle üretilmesi oldukça zordur ya da mümkün değildir.

Eklemeli imalat yöntemleri (Eİ) geleneksel imalat yöntemlerine iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinden olan tornalama, frezeleme ve delme gibi yöntemlerde ana malzemeden talaş koparma işlemi ile nihai ürün elde edilmektedir [2]. Eİ'nde ise üretilmek istenilen parça katmanlar halinde birleştirilerek elde

edilmektedir. Bu noktada yenilikçi bir üretim yöntemi olan Eİ, tasarımı zor ve karmaşık parçaların üretimine imkân tanımaktadır [3].

Eİ'nde tasarımın hızlı bir şekilde oluşturulması ve imal edilebilmesi, özel tasarımlı ürünlerin üretilebilmesi, kompleks iç yapılara ve tasarımsal boşluklara imkân tanıması, üretim esnasında ek bir işlem gerektirmemesi ve atık malzeme oluşturmaması öne çıkan avantajları arasında yer almaktadır. Eİ farklı ham maddeleri kullanmaya olanak tanımaktadır. Polimerler, metaller, seramikler ve kompozitler Eİ kullanılarak işlenilebilen malzemeler arasında yer almaktadır. Eİ'nde kullanılan malzemelerin çeşitliliğinin ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi Eİ'nin kullanım alanlarının genişlemesi için önemli bir kriterdir [4], [5].

Bu çalışmada nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. 1 kg polilaktik asit (PLA) filamente ağırlıkça %0,5 (5 g), %1,0 (10 g), %1,5 (15 g) ve %2,0 (20 g) oranlarında nano grafen karıştırılarak eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi için alternatif bir ham madde üretimi gerçekleştirilmiş ve çekme dayanımı, kopma uzaması ve Young modülü değerleri incelenmiştir. Ayrıca piston motorlu uçaklarda motor montaj ve alternatör destek braketi olarak görev yapan bir havacılık braketi TO ile hafifletilmiştir. Orijinal parça tasarımı %10'luk artışlar ile %10 ve %80 değer aralığında hafifletilerek yeni parça tasarımları elde edilmiştir. Her bir parça tasarımının toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü değerleri incelenmiştir. Elde edilen çıktı sonuçları ile optimum parça tasarımı belirlenmiştir. Programda elde edilen hafifletme oranının doğruluğunun ve TO ile tasarımı yenilenen parçaların üretilebilirliğinin değerlendirilebilmesi için orijinal ve optimum parça tasarımı Eİ'nden olan FDM yöntemi kullanılarak PLA filamentle üretilmiştir. Böylelikle, farklı oranlarda nano grafen katkısının PLA malzemesinin mekanik özelliklerine olan etkisi, TO kullanılarak orijinalinden daha hafif ve mekanik gereksinimleri karşılayabilen alternatif parça tasarımlarının oluşturulabileceği, tasarımı yenilenen parça tasarımlarının Eİ kullanılarak üretilebilirliği ve sayısal hafifletme oranlarının üretim sonucundaki değişimi ortaya konulmuştur. Çalışmaya ait kavramsal bilgiler, literatür taraması, materyal-metot, bulgular, bulguların tartışılması, sonuçlar ve öneriler aşağıda bölümler halinde sunulmuştur.

1. BÖLÜM

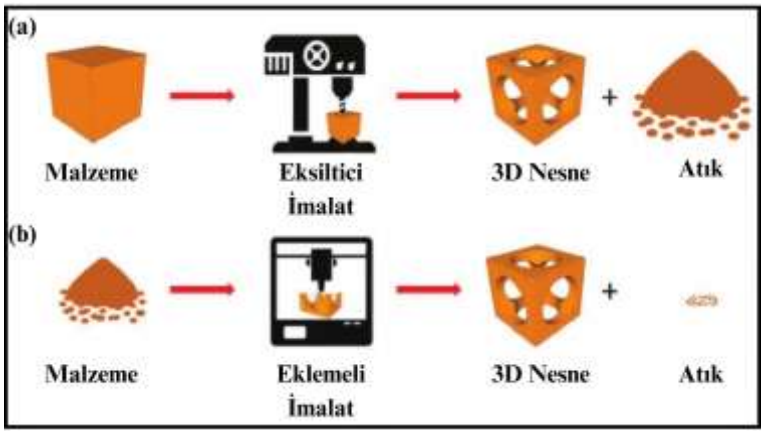
GENEL BİLGİLER

Bu bölümde çalışma kapsamında temel odak noktaları olan eklemeli imalat yöntemleri (Eİ) ve bu yöntemlerin sınıflandırılması, Eİ'nin kullanıldığı endüstri alanları, Eİ'nde kullanılabilen malzemeler, nano malzemeler ve optimizasyon ile ilgili genel bilgiler yer almaktadır.

1.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından eklemeli imalat yöntemleri Eİ katmanlı üretim olarak da isimlendirilmektedir [6]. Eklemeli üretim teknolojileri ilk üretildikleri yıllarda ürün prototipleme işlemleri için kullanılmıştır. Hızlı üretim kabiliyetleri sebebi ile ürün prototiplerinin oluşturulmasında etkili yöntemler olmuşlardır. Yöntemlerin gelişmesi ve çeşitlenmesi ile Eİ'nin de kullanım alanları ve amaçları genişlemiştir [7].

Bilgisayar destekli bir 3D tasarım Eİ kullanılarak fiziksel bir ürün olarak ek bir işlem gerektirmeden doğrudan üretilebilmektedir. Geleneksel imalat yöntemlerinde ihtiyaç duyulan geniş bilgi ve teknik birikimin aksine makinenin nasıl çalıştığının ve kullanılacak malzemeye ait bazı temel bilgilerin bilinmesi Eİ ile üretim yapabilmek için yeterlidir [6]. Geleneksel imalat yöntemlerinde üretim işlemi parçadan malzeme kaldırılarak gerçekleştirilirken Eİ'nde imalat işlemi ham maddenin katmanlar halinde birleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir [8]. Şekil 1'de eksiltici imalat ve eklemeli imalatın karşılaştırılması verilmiştir ve yöntemler arasındaki atık malzeme farkları gösterilmiştir.



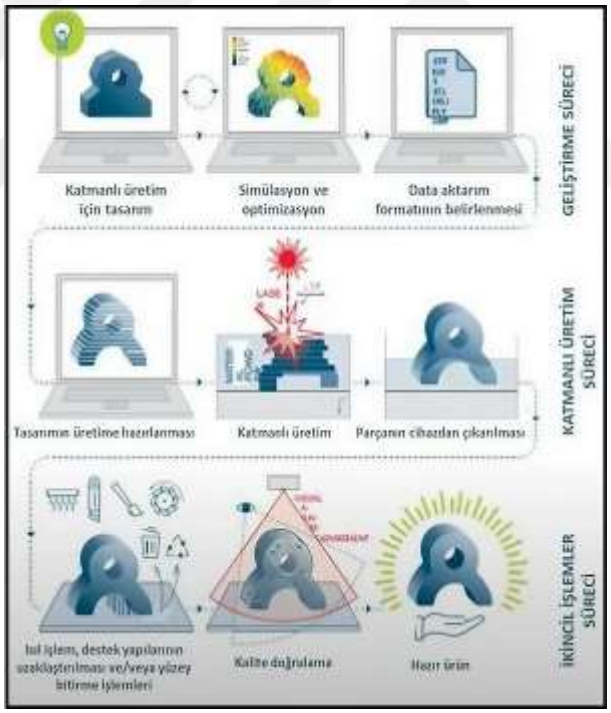
Şekil 1. Eksiltici imalatın ve eklemeli imalatın karşılaştırılması. (a) Eksiltici imalat prosesi. (b) Eİ prosesi [9].

Eİ teknolojilerinin temelinde üretilmek istenilen dijital computer aided design (CAD) tasarımın ince kesitler halinde katman katman birleştirilmesi prensibi yatmaktadır [10]. Katmanların nasıl oluşturulduğu ve nasıl birleştirildiği konuları Eİ'nin temelde farklılaşma noktalarıdır. İmal edilmek istenilen dijital CAD tasarımlarının Eİ kullanılarak fiziksel bir ürüne dönüştürülmesi bazı adımların izlenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu adımlar aşağıda sıralanmıştır [6].

- CAD
- Standard triangle language (STL) dosyaya dönüştürülmesi,
- Dosyanın imalat makinesine aktarılması,
- İmalat makinesinin ayarlanması,
- İmalatın gerçekleştirilmesi,
- İmal edilen parçanın çıkarılması,
- İyileştirme işlemleri,
- Nihai ürün

Eİ'nin tamamında imalat prosesi bir CAD tasarımının oluşturulması ile başlamaktadır [11]. 3D model bir CAD programı yardımı ile oluşturulabileceği gibi bir tarama cihazı yardımı ile tersine mühendislik kullanılarak da oluşturulabilmektedir. Oluşturulan dijital 3D modelin kullanım için STL formatına dönüştürülmesi gerekmektedir. STL formatı Eİ için standart bir formattır. STL formatına dönüştürülen dijital 3D model dilimlenerek kodlara dönüştürülür ve imalatı gerçekleştirecek Eİ cihazına aktarılır. Aktarılan kodlar modelin oluşturulabilmesi için makine donanımlarının konumunu, boyutu ve yönlendirmeleri içermektedir. Baskı parametreleri, malzemeler, kısıtlamalar, enerji

kaynağı, katman kalınlığı ve zamanlamalar gibi veriler baskı işlemi başlamadan önce ayarlanmalıdır. Eİ'nde imalat süreci otomatik olarak gerçekleşmektedir. İmalat işlemi gerçekleştirilirken kusurlar ve hatalar fiziksel bir müdahale yerine görsel, yazılımsal ve güç kaynaklarının kontrolu şeklinde izlenir. İmalat işleminin sona ermesi ile üretimi gerçekleştirilen ürün veya ürünler baskı makinesinden çıkarılır [6]. İmalatı tamamlanan parçalarda gerekli görülmesi halinde destek veya toz temizleme işlemleri yapılabilmektedir. Temizlik işlemlerine ek olarak imalat yöntemine ve kullanım amacına bağlı olarak ürün çıktılarında yüzey pürüzlülüğü azaltma, gerilme giderme ve mukavemet arttırma işlemleri yapılabilmektedir [12]. Belirtilen işlemlerin tamamlanması ile üretilen parça kullanıma hazır olur. Farklı imalat yöntemlerinde farklı süreçler işleyebilmektedir veya bazı süreçler uygulanmayabilmektedir [6]. Eİ'nde nihai ürün ürütme süreçleri Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Eİ'nde parça imalat süreci [13].

1.1.1. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Eİ'nin sınıflandırılması farklı etkenler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Kullanılan ham maddelerin formu, yöntemde kullanılan makinenin donanımı, ham maddenin birleştirilmesi için kullanılan donanım veya birleştirici malzeme farkı, yöntemde kullanılan makinenin çalışma prensibi ve ham maddenin baskı alanına taşınma şekli gibi etkenler dikkate alınarak Eİ sınıflandırılmaktadır. Eİ farklı türde malzemeler ve

üretim prosesleri kullanmaktadır. Eİ kullandığı malzeme ve üretim prosesi türleri Tablo 1'de sunulmuştur. ASTM Eİ'ni ASTM F42 standartlarına göre yedi grupta sınıflandırmaktadır. Bu gruplar aşağıda belirtilmiştir [14].

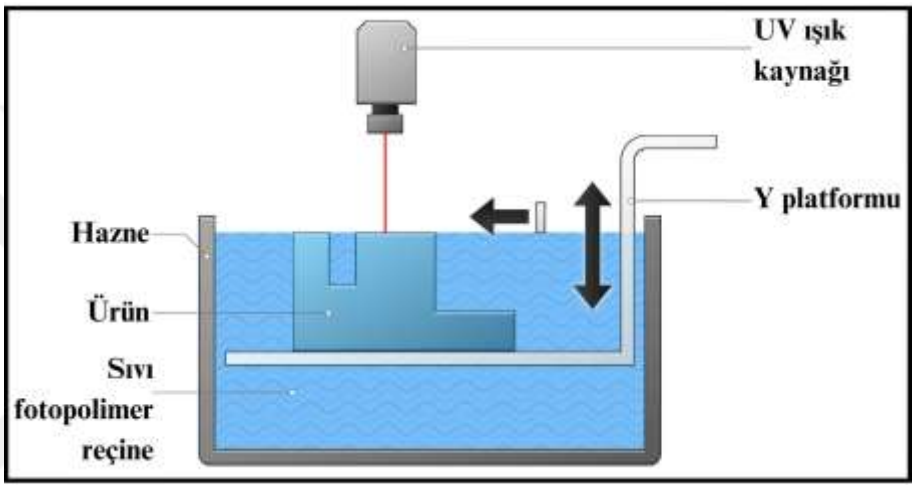
- Fotopolimerizasyon
- Malzeme ekstrüzyon
- Malzeme püskürtme
- Yapıştırıcı ile eklemeli imalat
- Toz yataklı eritme
- Direkt enerji depolama
- Levha/sac laminasyon metodu

Tablo 1. Eİ'nin sınıflandırması [15].

İmalat Türü	**Proses**	**Teknoloji**	**Malzeme**
Fotopolimerizasyon	Lazerle sertleştirme	Stereolitografi (SLA)	Ultraviyole (UV) ışıkla sertleştirilen reçineler, vakslar ve seramikler
	Projektörle sertleştirme	Dijital ışık işleme (DLP)	
	Işık yayan diyot ve oksijenle sertleştirme	Aralıksız dijital ışık işleme (CDPL)	
Malzeme ekstrüzyon	Ekstrüzyon	Eriyik yığma modelleme (FDM)	Termoplastikler ve vakslar
Malzeme püskürtme	Ultraviyole ışıkla sertleştirme	Malzeme püskürtme (MJ)	UV ışıkla sertleştirilen reçineler
	Isı ile sertleştirme	Nanopartikül püskürtme (NPJ)	Metaller
	Kesici ile sertleştirme	İstek üzerine bırakma (DOD)	Vakslar
Yapıştırıcı ile eklemeli imalat	Bağlayıcı madde ile birleştirme	Yapıştırıcı ile eklemeli imalat (BJ)	Alçılar, kumlar ve metaller
Toz yataklı eritme	Madde ve enerji ile eritme	Multijet eritme (MJF)	Termoplastikler
	Lazer ile eritme	Seçici lazer sinterleme (SLS)	Termoplastikler ve metaller
		Direkt metal lazer sinterleme (DMLS)	Metaller
		Seçici lazer eritme (SLM)	
	Elektron ışını ile eritme	Elektron ışını eritme (EBM)	
Direkt enerji depolama	Lazer ile eritme	Lazer toz şekillendirme (LENS)	Metaller
	Elektron ışını ile eritme	Elektron ışını eklemeli imalat (EBAM)	
Levha/sac laminasyon metodu	Basınç ve bağlayıcı	Tabakalı obje üretimi (LOM)	Termoplastikler, kompozitler ve kağıtlar

1.1.1.1. Fotopolimerizasyon

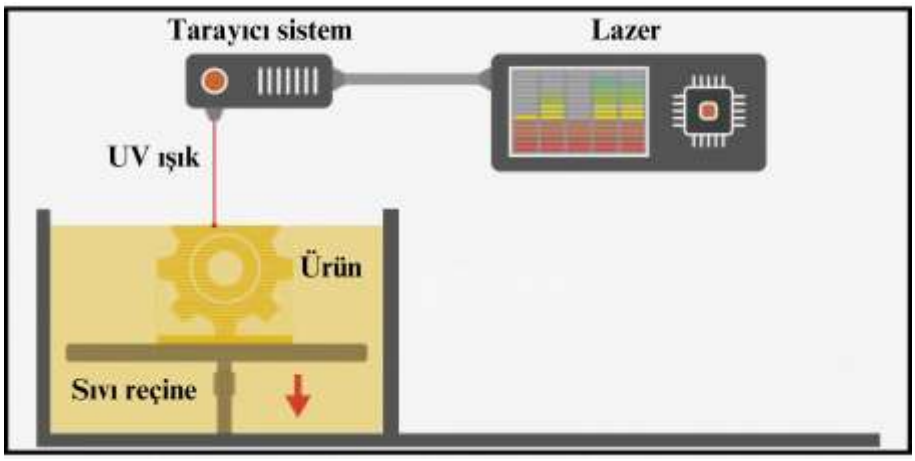
Eİ'nin bir türü olan fotopolimerizasyon yönteminde ultraviyole (UV) dalga boyunda radyasyona tepki veren fotopolimer malzemeler, reçineler ve sıvılar birincil malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan birincil malzemeler ışık kaynakları yardımı ile kimyasal reaksiyona girerler ve katı hale geçerler. Birincil malzemelerde meydana gelen bu reaksiyon fotopolimerizasyon olarak isimlendirilmektedir[15], [16]. Şekil 3'te fotopolimerizasyon yöntemlerinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3. Fotopolimerizasyon yöntemlerinin şematik gösterimi [17].

Fotopolimerizasyon yöntemi üç temel yönteme ayrılmaktadır. Bu yöntemler: stereolitografi (SLA), dijital ışık işleme (DLP) ve aralıksız dijital ışık işleme (CDLP) yöntemleridir [3], [15].

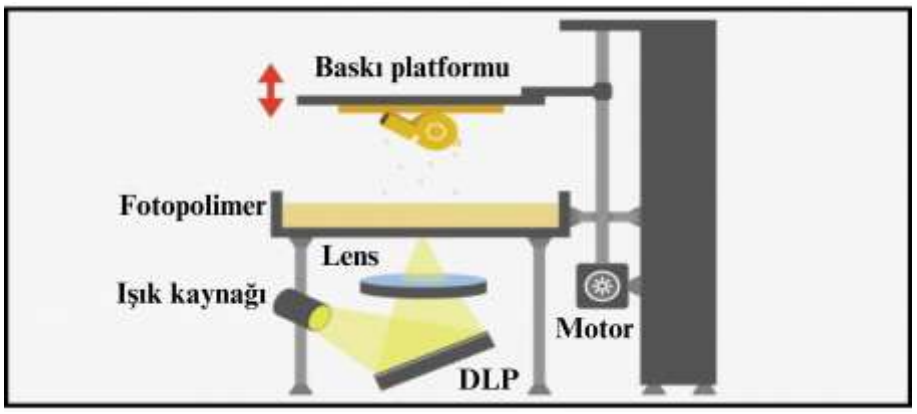
SLA yöntemi için imalat malzemesi olarak sıvı fotopolimer reçine malzemesi kullanılmaktadır. SLA yöntemi oda sıcaklığında bulunan sıvı fotopolimer reçinenin UV ışını yardımı ile kürlenmesi ve katman katman inşa edilmesi prensibine dayanmaktadır [4], [18]. Bir platform üzerinde gerçekleştirilen üretimde modelin meydana gelebilmesi için fotopolimer malzeme kürlendikçe yeni katmanın kürlenebilmesi için platform aşağı iner. Böylece katman katman fotopolimer malzeme katılaşır ve üretim bir önceki katmanın üzerine inşa edilerek gerçekleştirilir [3], [15], [19]. Şekil 4'te SLA yönteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 4. SLA yönteminin şematik gösterimi [20].

SLA yönteminde üretilecek modelin kalitesi üzerinde etkisi olan çeşitli parametreler vardır. Katman kalınlığı ve kürleme süresi gibi parametreler SLA yöntemi kullanılarak üretilmek istenilen modelin kalitesine etki eden parametrelerden bazılardır. UV ışınlarının kullanılması, optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi veya nano dolguların kullanılması ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi mümkündür [3], [15], [21] . Üretim işlemi sonrasında durulama ve kurutma işlemleri yapılmaktadır. Yüksek ekipman ve malzeme maliyetleri SLA yönteminin dezavantajları arasında yer almaktadır [15], [22].

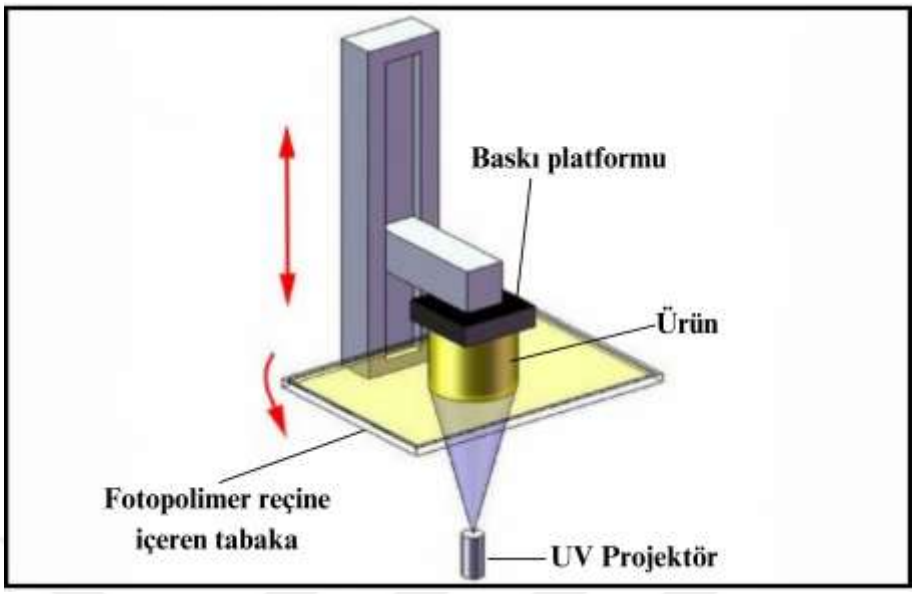
DLP ve SLA yöntemleri benzer yaklaşımlar olmalarına karşın aralarındaki en önemli fark ışık kaynakları ve kaynakların konumlandıkları yerlerdir. SLA yönteminde reçine platformunun üzerinde kullanılan UV lazerinin yerine DLP yönteminde reçine platformunun altında bir projektör kullanılmaktadır [15], [19]. SLA yönteminin aksine DLP yönteminde model üretimi aşağı yönlü değil yukarı yönlü olarak gerçekleştirilir [15] . Şekil 5'te DLP yönteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 5. DLP yönteminin şematik gösterimi [17].

Model üretimi SLA yönteminde katmanların UV lazer tarafından tek tek taranması ile gerçekleştirilirken, DLP yönteminde projektör tarafından reçine haznesinde yer alan ham madde sıvısının tek seferde tabaka halinde taranması ile gerçekleştirilir. Bu sayede DLP yöntemi SLA yöntemine kıyasla daha hızlı model üretimine imkân tanır. Hassas ve yüksek çözünürlük gerektiren parçaların üretimi için DLP yöntemi yerine SLA yönteminin kullanılması daha uygundur.

CDLP yöntemi de DLP yöntemi gibi reçine haznesinde yer alan sıvı reçineyi sertleştirmek için haznenin altında yer alan projektör ışık kaynağı kullanmaktadır. CDLP yöntemi ile DLP yöntemi arasındaki en belirgin fark, CDLP yönteminde reçine haznesi z eksenli bir hareket ile sürekli hareket ettirilmektedir. Hazne içerisinde sertleştirilen katman, projektörden uzaklaştırılarak haznede yukarı doğru hareket eder ve bir sonraki katman projektör ışığı yardımı ile sertleştirilir [3], [19]. Şekil 6'da CDLP yönteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 6. CDLP yönteminin şematik gösterimi [23].

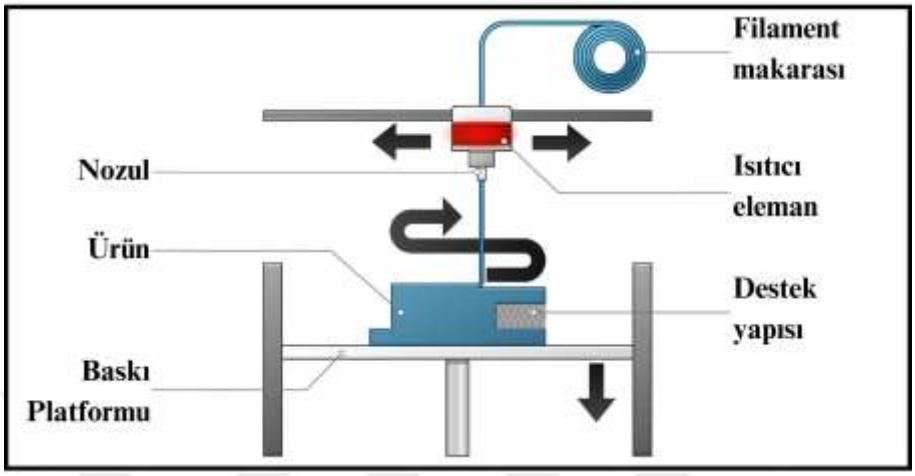
Fotopolimerizasyon yöntemleri arasındaki en temel fark donanımsaldır. SLA yönteminde model hazne içerisinde aşağı yönlü bir hareket yaparken DLP ve CDLP yöntemlerinde haznenin dışına yukarı yönlü bir hareket yapmaktadır [15], [24].

1.1.1.2. Malzeme Ekstrüzyon

En sık rastlanan Eİ'nden biri olan malzeme ekstrüzyon yönteminde diğer bir ismi ile eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi, üretim işlemi için filament adı verilen ve bir besleme makara sistemine sarılı olan ham madde kullanılmaktadır [4], [15]. Filament olarak FDM yönteminde polimerlerden, plastiklerden ve kompozitlerden oluşan polikarbonat (PC), akrilonitril bütadien stiren (ABS), poliarilsülfon (PPSU), polikarbonat-akrilonitril bütadien stiren (PC-ABS) ve polilaktik asit (PLA) gibi malzemeler kullanılabilmektedir [15]. FDM yönteminde ham madde olarak seramik ve metal malzemelerin kullanımına yönelik çalışmalar devam etmektedir [19].

Filament dişliler yardımı ile sıcak nozulun bulunduğu baskı kafasına itilmektedir. Nozula itilen filament bu bölümde eritilmekte ve nozul ucundan çıkışı sağlanmaktadır. Nozuldan çıkan erimiş filament baskı kafasının hareketi ile baskı tablası üzerinde şekillendirilmektedir [15]. Baskı kafası dilimleme programından elde edilen G-kodlar ile baskı alanında hareket konumu doğrultusunda hareket eder [19]. Baskı kafası, baskı alanı içerisinde x ve y eksenlerinde hareket gerçekleştirmektedir. Baskı tablasının z ekseninde

aşağı veya yukarı hareketi sayesinde filament katmanlar şeklinde birleşmektedir [3]. Şekil 7'de malzeme ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 7. Malzeme ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi [17].

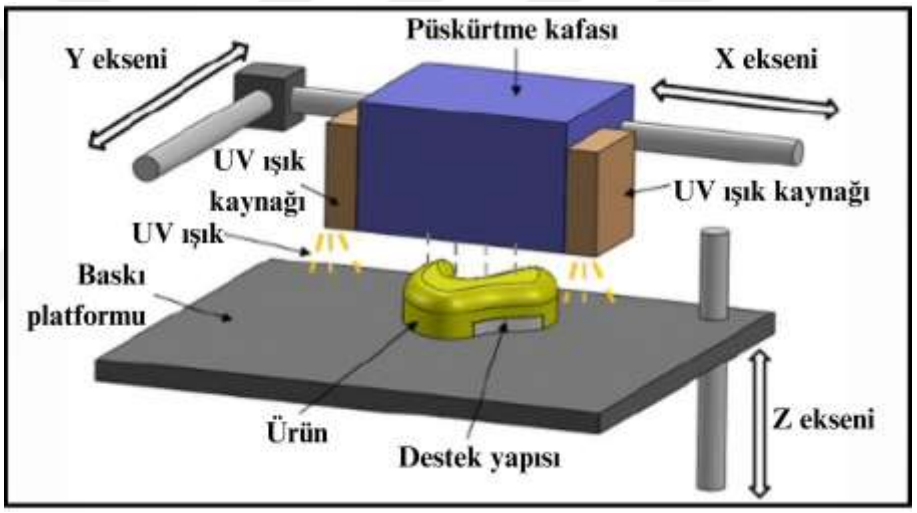
Üretimin tamamlanması sonucunda çıktı üzerinden destek parçaları temizlenerek nihai ürün elde edilir. Oluşturulan nihai ürünlerin yüzeyleri kaba ve pürüzlüdür. Nihai ürünün yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilebilmesi için zımparalama ve vaporizasyon işlemleri gerçekleştirilebilir [19], [25]. Eriyen filamentin birleştirilmesi için kimyasal bir malzeme kullanılmamaktadır. Nozul ucundan çıkan ve tablaya temas eden eriyik filament fanlar yardımı ile fiziksel olarak soğutulmakta ve soğuma işlemi ile katılaşmaktadır.

FDM yönteminde ürün kalitesini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Üretim hızı, nozul çapı ve nozul sıcaklığı ürün kalitesini belirleyen bazı parametrelerdir. Farklı filamentler için farklı sıcaklıkların ayarlanması gerekmektedir [15].

FDM yönteminde kullanılan cihazlar kullanıcı dostu cihazlardır. Bu sayede ev ortamında kullanıma uygunlardır. FDM yönteminin ucuz bir yöntem olması, üretim sonrasında atık madde oluşturmaması, kimyasal bir uygulama gerektirmemesi, hızlı tasarım ve üretim imkânı sunması gibi nedenlerden dolayı popüler bir yöntemdir. FDM yöntemi bu olumlu özelliklerine ek olarak karmaşık geometrili ve boşluklu yapıların üretimini mümkün kılmaktadır [15], [26], [27]. FDM yöntemi az miktarda çıktı gerektiren uygulamalar için kullanışlı ve ekonomik olmasına karşılık çok sayıda üretim gerektiren çıktılarda enjeksiyon kalıp yöntemine göre oldukça pahalı bir yöntemdir. FDM yöntemi hızlı tasarım ve üretim imkânı sunmasına karşın üretim hızı noktasında yavaş bir yöntemdir [15].

1.1.1.3. Malzeme Püskürtme

İnkjet teknolojisi mantığı ile çalışan malzeme püskürtme (MJ) yönteminde üretim farklı teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [19]. Bu teknolojilerden ikisi sürekli bırakma ve istek üzerine bırakma (DOD) yöntemleridir [3]. MJ yönteminde baskı platformu üzerinde hareket eden bir püskürtme kafası; termal veya piezoelektrik kullanarak polimerlerden, vakslardan, mumlardan veya metallerden oluşan ham maddeyi baskı platformuna damlacıklar halinde püskürtür ve UV ışık yardımı ile platforma püskürtülen ham maddenin katılaştırılması sağlanır. Baskı platformunun aşağı yukarı hareketi sayesinde ham madde katman katman birleştirilir [3], [4], [15]. Şekil 8'de MJ yöntemlerinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 8. Malzeme püskürtme yöntemlerinin şematik gösterimi [28].

Bu yöntemde kullanılan destek malzemeleri su ile kolay çözünebilen malzemelerdir. Destek malzemelerinin su ile kolayca çözünebilmesinden dolayı üretilen parça yüzeylerinde iz oluşmaz.

MJ yönteminde püskürtme kafası iki boyutlu mürekkep püskürten yazıcılara benzer şekilde çalışır. Yöntemde ham maddeler damlalar halinde püskürtüldüğü için bu şekilde depolanması gerekir.

MJ yöntemi için kullanılan bir diğer teknoloji ise nanopartikül püskürtme (NPJ) teknolojisidir. Bu yöntemde nanoparçacık boyutlarında metaller içeren bir sıvı karışımı ham madde olarak kullanılmaktadır. Nanopartikül ve sıvı karışımı ince damlalar halinde baskı platformuna püskürtülür. Baskı platformuna püskürtülen ham madde UV ışık

yardımı ile katılaştırılır. Katılaşma işlemi sırasında ortamda oluşan ısı sayesinde ham maddede bulunan sıvı malzeme buharlaşır ve baskı alanından uzaklaştırılması sağlanır [15].

Yöntem farklı türde ve renkte ham maddelerin kullanılabilmesine imkân tanımaktadır [3] . Bu sayede üretimi gerçekleştirilen parçada sert, yumuşak ve farklı renkli bölümlerin bir arada üretilebilmesi mümkündür [15], [29].

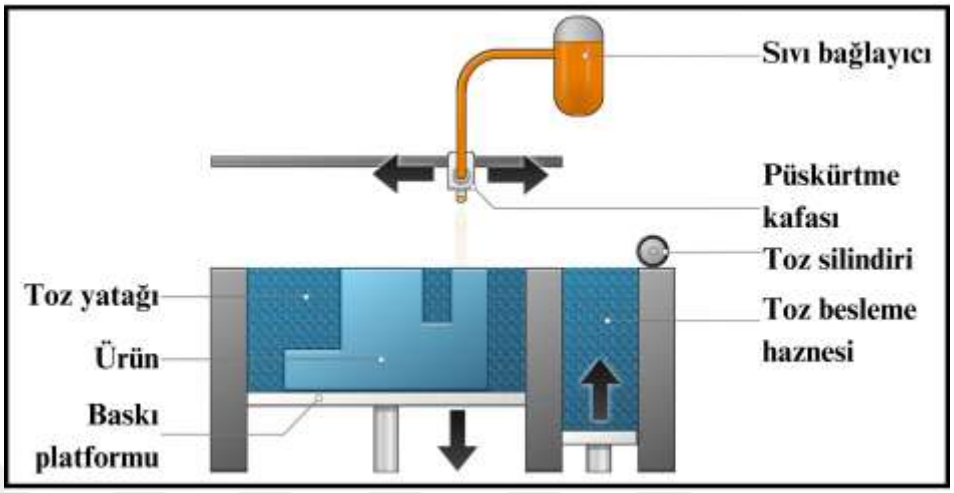
MJ yöntemi ile çok düzgün ve hassas parçaların üretilebilmesi mümkündür. Çıktı kalitesini etkileyen çeşitli parametreler mevcuttur. Baskı yönü ve boyutsal kararlılık ürün çıktısının yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini etkileyen etkenler arasında yer almaktadır. Üretimin farklı yönlerde yapılabilmesi tasarım ve üretim esnekliği sunmaktadır [15], [30], [31].

Aynı anda farklı türde ve renkte ham maddelerin kullanılması yöntemin üstün bir özelliği olarak değerlendirilirken destek malzemesi kullanması dezavantajı olarak değerlendirilmektedir [3], [15].

1.1.1.4. Yapıştırıcı ile Eklemeli İmalat

Yapıştırıcı ile eklemeli (BJ) imalat yönteminde, toz formda ham madde bir yapıştırıcı yardımı ile birleştirilerek imalat işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemde imalatın gerçekleştirilebilmesi için toz şeklinde ham maddeye ve sıvı halde yapıştırıcı malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Bağlayıcı olarak kullanılan sıvı yapıştırıcı malzemesi polimer esaslıdır. Son yıllarda farklı türde bağlayıcı malzemelerin BJ yönteminde yapıştırıcı malzeme olarak kullanılabilmesi için çalışmalar yapılmaktadır [15]. Toz haldeki ham madde toz yatağında yer alır ve bir dağıtıcı silindir yardımı ile baskı haznesine taşınır. Ham maddenin baskı platformuna taşınmasından sonra sıvı formdaki bağlayıcı yapıştırıcı bir baskı kafası yardımı ile x ve y eksenlerinde hareket ederek baskı platformunda yer alan ham maddenin üzerine bırakılır. Baskı platformu üzerindeki ham maddenin yapıştırıcı ile bağlanması sonucu ilk katman üretilmiş olur. İkinci katmanın üretilebilmesi için baskı platformu katman yüksekliği kadar aşağı iner. Toz haznesinden yeni katmanın üretimi için gerekli olan ham madde baskı alanına silindir yardımı ile tekrar taşınır. Taşınan ham madde bir önceki katmanın üzerine serilir. Taşınan yeni katmanın bağlayıcı yardımıyla bağlanması ile imalat süreci katman katman

tekrarlanarak gerçekleştirilir [3], [15], [19]. Şekil 9'da BJ yönteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 9. Yapıştırıcı ile eklemeli imalat yönteminin şematik gösterimi [17].

BJ yöntemi hızlı bir yöntem olmasına karşılık imalat sonrasında imal edilen parça üzerinde ek işlemler gerçekleştirilebilmesi ve imal edilen parçanın imalat sonrasında makine içerisinde soğumaya bırakılması sebebi ile imalat süreci uzun olabilmektedir [3]. Bu yöntemde bağlama yöntemine bağlı olarak imalatı gerçekleştirilen parçaların mekanik özellikleri yapısal parçalar için uygun olmayabilmektedir [15], [26]. BJ yöntemi geniş yüzeyli ve büyük parçaların imalatına imkân tanımaktadır [19]. Yöntemde imalat platformuna taşınan toz halindeki ham maddeler destek görevi görmektedir ve bu sayede ek bir destek kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır [15], [19].

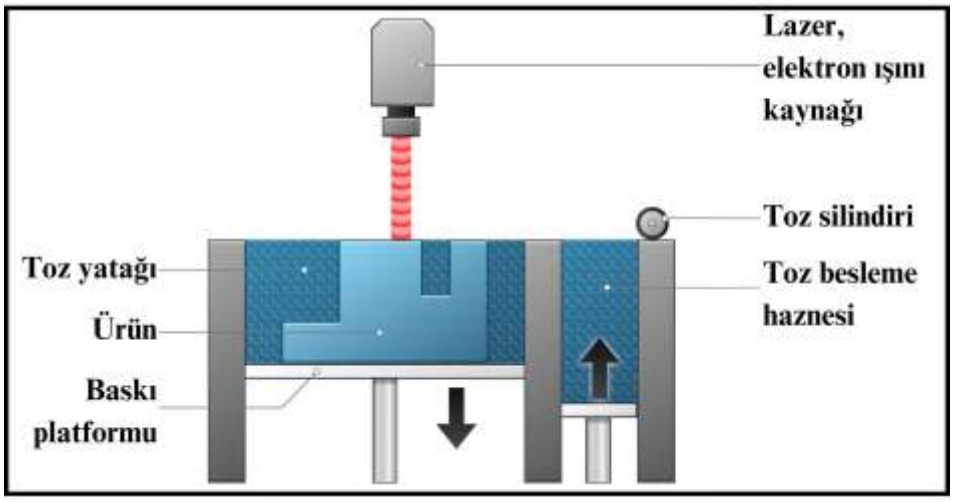
Ham madde olarak geniş bir kullanım alanına sahip olan yöntemde metaller, polimerler, kumlar ve seramikler ham madde olarak kullanılabilmektedir [3]. Bu ham maddelere ek olarak kompozit tozlar da ham madde olarak kullanılabilmektedir [4]. Kullanılan ham maddelerin ve bağlayıcı sıvıların türüne göre farklı mekanik özelliklere sahip parçalar üretilebilmektedir [15]. Toz ve yapıştırıcı oranlarının değiştirilmesi ile de farklı mekanik özelliklere sahip malzemeler üretilebilmektedir. BJ yönteminde farklı ham maddeler kullanılarak imalat işleminin yapılabilmesinin yanı sıra farklı renklerde ürün imalatının yapılması da mümkündür.

İmalat sürecini hızlandırabilmek için sıvı yapıştırıcının bırakıldığı baskı kafasında yer alan delikler arttırılabilmektedir. Baskı platformu üzerinde yer alan bir ısıtılmış bölme

yardımı ile malzemelerin viskoziteleri arttırılabilmekte ve bu sayede baskı süreci hızlandırılabilmektedir. BJ yönteminde imal edilen parçalar gözenekli yapılara sahip olabilmektedir. Gözenekli yapıların oluşturabileceği olumsuz mekanik özelliklerin iyileştirilebilmesi için seramik malzemeler siyanoakrilat ile metal malzemeler bronz ile güçlendirilebilmektedir [15], [19]. Bu yöntemle imal edilen metal parçalarda yüksek yoğunluğa ihtiyaç duyulması durumunda izostatik presleme uygulaması da yapılabilmektedir [3], [32].

1.1.1.5. Toz Yataklı Eritme

Toz yataklı eritme yönteminde toz halinde bulunan ham madde bir lazer veya elektron kaynağı yardımı ile sinterlenerek veya ergitilerek bu tozların birbirlerine bağlanması sağlanır [3], [33]. Yöntemde toz haznesinde bulunan ham madde bir silindir yardımı ile baskı platformuna taşınır [3]. Baskı platformuna taşınan toz haldeki ham maddeler sinterlenerek veya ergitilerek birleştirilir [34]. Bir sonraki katmanın üretilebilmesi için baskı platformu katman kalınlığı oranında aşağı iner. Silindir yardımı ile toz haznesinden yeni ham madde baskı platformuna taşınır. Baskı platformunda üretimi gerçekleştirilen ilk katmanın üzerine serilen yeni ham madde ilk katmanın üzerine sinterlenerek veya ergitilerek ikinci katmanın imalatı gerçekleştirilmiş olur. Sürecin tekrarlanması ile imalat işlemi katmanlar halinde gerçekleştirilir [15], [26]. Üretim esnasında baskı platformuna serilen toz malzemesi imalatı gerçekleştirilen parça için destek görevi görmektedir. Bu sayede toz yataklı eritme yöntemlerinde destek bileşenine ihtiyaç duyulmamaktadır. Toz yataklı eritme yöntemleri metal ve alaşımların beraber kullanılabilmesine imkân tanımaktadır [15]. Şekil 10'da toz yataklı eritme yöntemlerinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 10. Toz yataklı eritme yöntemlerinin şematik gösterimi [17].

Toz yataklı eritme yöntemi; multijet eritme (MJF), seçici lazer sinterleme (SLS), direkt metal lazer sinterleme (DMLS), seçici lazer eritme (SLM) ve elektron ışını eritme (EBM) yöntemleri olarak farklı sınıflara ayrılmaktadır. Tüm toz yataklı eritme yöntemlerinde vakum kullanılmaktadır [3].

Toz yığma yöntemlerinin öncüsü olarak kabul gören SLS yönteminde, toz halde bulunan metal, naylon, seramik ve cam gibi çeşitli ham maddelerin sinterlenerek birleştirilmesi ile parça oluşturulmaktadır. Lazer yardımı ile sinterlenen ham maddeler tamamen eritilmeden birbirlerine birleşmektedir [19], [34]. Toz haznesindeki ham madde bir silindir yardımı ile inşa platformuna serilir ve serilen tozlar bir lazer yardımı ile sinterlenir. İlk katmanın inşası sonucu baskı platformunun aşağı inmesi ve yeni katmanın serilmesi ile süreç imalat işlemi bitene kadar devam eder [4], [35]. İmalat sürecinde sinterlenmeyen toz ham maddeler imalatı gerçekleştirilen parça için destek görevi görür ve bu sayede ek bir destek bileşenine ihtiyaç duyulmaz [19], [36]. İmalat sürecinin bitmesi ile inşa edilen ürün bir basınçlı hava yardımı ile temizlenmektedir [3].

Yöntem yeni parçaların üretiminin yanı sıra tamir gerektiren parçalarda da uygulama alanına sahiptir. Sinterleme işleminin uzun zaman gerektirmesinden dolayı yöntemin işlem süresi uzundur [34]. SLS yöntemi ile üretilen malzemelerde kalıntı gerilmelerinin yüksek olması yöntemin önemli dezavantajı olarak belirtilmektedir [34], [37]. Oluşan gerilmelerin giderilebilmesi için gerilme giderme tavlaması uygulaması yapılabilmektedir [19]. Yöntemle imal edilen ürünlerde yüksek tolerans değerleri ve kaliteli birleşme elde edilebilmesi için ürünler kontrollü soğutulmalıdır [15].

Yöntem ham maddelerin sinterlenmesi için güçlü bir lazere ihtiyaç duymaktadır. Bu durum yöntemin maliyetini arttırmaktadır. Teknolojinin pahalı olması dolayısı ile ev ve ofis kullanımı yaygın değildir [19].

DMLS yöntemi SLS yönteminde gerçekleştirilen bazı değişiklikler sonucu ortaya çıkmış bir yöntemdir. İmalat aşamaları DMLS yönteminde SLS yöntemi ile aynı süreçlerin takip edilmesi ile gerçekleştirilir [3], [19]. Bu yöntemde birçok metal ve alaşımları ham madde olarak kullanılabilmektedir. Yüksek mukavemet ve hızlı üretim gereken durumlarda kullanıma uygun bir yöntemdir [19]. İhtiyaç duyulması halinde imalat sonrasında mukavemeti ve yoğunluğu arttırmak için ek uygulamalar yapılabilmektedir [15]. SLS yönteminin aksine imalat sürecinde meydana gelebilecek yüksek kalıcı gerilmeleri giderebilmek için toz destek elemanı ve iç gerilme giderme uygulamaları gerekebilmektedir [3]. DMLS yönteminin yüksek enerji gereksinimi ve imalat sonrasında işlem gerektirmesi dezavantajlı yönleridir [19]. Bu yöntemle imal edilen çıktılar ihtiyaç duyulması durumunda talaşlı imalat yöntemleri uygulanabilmektedir. Yöntemde daha sürekli mikro yapı elde edilebilmesi için parçalara sıvı faz sinterleme uygulaması yapılabilmektedir. Sıvı faz sinterleme uygulamasının yapılması durumunda ölçülerde çekmeler olabilmektedir [15].

SLM yöntemi, SLS yönteminden yola çıkılarak geliştirilen bir yöntemdir [34]. İmalatın ilk aşaması olarak toz haznesinde yer alan titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum, kobalt-krom, inconel ve diğer metaller gibi toz haldeki ham madde bir silindir yardımı ile baskı platformuna serilir [4], [38]. Yöntemde baskı platformuna serilen tozların eşit dağıtılabilmesi için platformun titretilmesi uygulaması yapılabilmektedir [15]. SLS yönteminde kullanılabilen plastik, cam ve seramik gibi ham maddelerin SLM yönteminde kullanımı uygun değildir [19]. Baskı platformuna serilen ham madde bir lazer yardımı ile eritilir. SLS yönteminde ham maddelerin birleştirilmesi sinterlenerek gerçekleştirilirken SLM yönteminde ham maddelerin birleştirilmesi eritilerek gerçekleştirilir. İlk katmanın imalatı sonucu baskı haznesi katman kalınlığı kadar aşağı iner ve süreç yeni katmanın serilip eritilmesi ile katmanlar halinde devam eder [4], [38]. SLS yöntemine kıyasla SLM daha hızlı bir yöntemdir [15].

SLM yönteminde lazer ışını ayarlanabilir aynalar yardımı ile baskı platformu üzerinde yer alan ham maddeye yönlendirilmektedir. Aynaların ayarlanabilir olması lazerin daha

hassas bir şekilde yönlendirilmesine imkân tanır [34]. SLM yönteminde üretilen parçaların yüzey kalitesi SLS yöntemine kıyasla daha iyidir. Yüzey kalitesine ek olarak SLM yöntemi ile üretilen parçalar SLS yöntemi ile üretilen parçalara göre daha iyi mekanik özelliklere sahiptir [34], [39]. SLS yönteminde ihtiyaç duyulmayan ve imalat sürecinde oluşabilecek yüksek kalıcı gerilmeleri gidermek için kullanılan toz destek elemanına ve iç gerilme giderme uygulamalarına ihtiyaç duyulabilmektedir [3]. Çok miktarda üretim gerektiren parçaların imalatı için uygun bir yöntem olmamasına karşılık karmaşık geometrilere sahip ve işlevsel parçaların imalatı için uygundur [4]. Yöntemde inert bir gaz kullanılma gereksinimi maliyeti artırmaktadır [15]. Yüksek maliyetleri dolayısı ile ev ve ofis kullanımı için uygun değildir [19].

EBM yönteminde ham maddelerin birleştirilmesi SLM yönteminde olduğu gibi eritilerek gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde ham maddeyi eritebilmek için lazer kaynağı yerine yüksek enerjili elektron ışını kaynağı kullanılmaktadır. Güçlü bir ışın kaynağı tarafından üretilen ışın titanyum, süper alaşımlar ve çeşitli metallerden oluşabilecek toz haldeki ham maddeye temas ederek eritme işlemini gerçekleştirir. Eritilen toz ham maddenin soğutulması ile bu maddelerin birleştirilmesi sağlanmış olur [3], [34], [40]. Baskı platformunun hareket ettirilmesi ile yeni katman üzerine elektron ışını gönderilir ve ikinci katmanın imal edilmesi sağlanır. Süreç imalat işlemi bitene kadar katmanlar halinde devam etmektedir. EBM yönteminde imalat işlemi sürecinde vakumlu bir ortam oluşturulmaktadır. İmalat işleminin vakumlu bir ortamda gerçekleşmesi sebebi ile elektronlar gaz moleküllerine çarpmaz ve bu sayede reaktif metaller için elverişli bir imalat ortamı oluşturulur [19]. 3500 °C derecelere çıkabilen ışın kaynakları kullanılması yöntemde kullanılabilecek malzeme çeşitliliğini arttırmaktadır.

Yöntem karmaşık geometrilerin ve montaj gerektiren yapıların tek parça şeklinde üretilebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu tür yapıların üretiminde zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilen bir yöntemdir [34]. EBM yöntemi SLM yöntemine kıyasla daha iyi bir üretim hızına sahiptir [4].

EBM yöntemi ile yüksek mukavemetli parçaların üretimi mümkündür. Bu yöntemle imal edilen parçalarda kalıntı gerilmeleri ve dislokasyon oluşumları daha azdır [3], [19]. Artık gerilmelerinin azaltılabilmesi için ham maddelerin ve baskı platformunun ısıtılması

uygulamaları yapılabilmektedir. Ham maddeyi eriten ışının farklı parametrelerle ayarlanması ile imal edilecek parçanın gözeneklilik düzeyi ayarlanabilmektedir [19].

EBM yönteminin imalat işlemi için vakum gerektirmesi yöntemin dezavantajı olarak değerlendirilmektedir. İmalat işlemi için yüksek sıcaklık değerlerinin oluşması sebebi ile alüminyum gibi malzemeler ham madde olarak kullanılamamaktadır. EBM yönteminin dış uzayda yapılabilecek üretimlerde daha elverişli üretim olanaklarına sahip olabileceği düşünülmektedir [34].

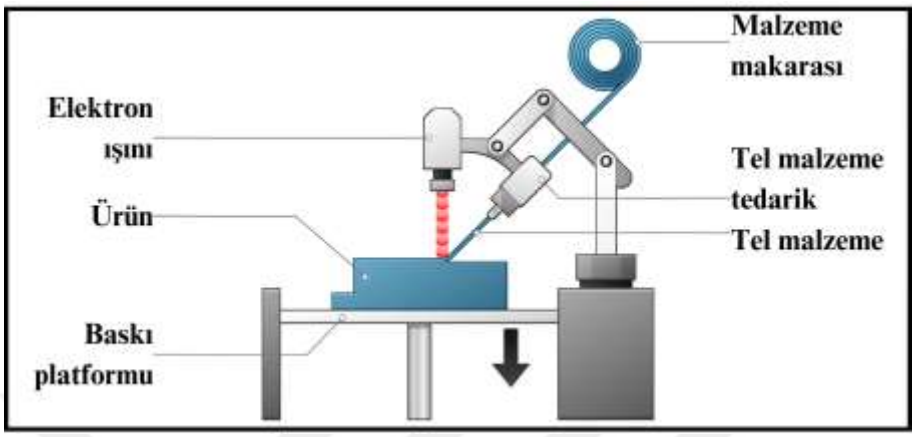
Ürün prototipleri oluşturmak için kullanılan MJF yönteminde ham madde için naylon malzemeler kullanılmaktadır. MJF yönteminde bir termal baskı kafası yardımıyla ham maddeler birleştirilir. Ham maddelerin birleştirilmesi için lazer kaynağı yerine termal bir baskı kafası kullanılması imalat işlemi için gerekli olan ısıyı düşürmektedir [15]. Yöntemde imalat işlemi toz ham maddenin baskı platformuna serilmesi ve termal baskı kafasının ham maddeyi seçici olarak eriterek tozların birleşmesi ile gerçekleşir. Yöntemde hassas yüzeyler ve detaylandırma işlemi için eritme işleminin güçlendirilmesi veya zayıflatılması uygulaması yapılabilmektedir [3]. Toz haldeki ham madde imalatı gerçekleştirilen parça için destek görevi görmektedir. Bu sayede imalat işlemi için ek bir destek elemanına ihtiyaç duyulmamaktadır.

Yöntemin maliyetinin düşük olması ve prototip üretimine imkân vermesi dolayısı ile ev ve ofis kullanımına uygundur. MJF yöntemi ile imal edilen parçaların yüzey kalitesinin toz boyutuna bağlı olarak değişmesi ve bu parçaların mekanik özelliklerinin yetersiz olması yöntemin dezavantajları olarak değerlendirilmektedir [15].

1.1.1.6. Direkt Enerji Depolama

Direkt enerji depolama yönteminde çok eksenli hareket kabiliyetine sahip bir baskı kafasına sahiptir. Toz veya tel formdaki metallerden oluşan ham maddeler baskı platformuna aktarılmaktadır ve baskı platformuna aktarılan ham maddeler eş zamanlı olarak bir lazer veya elektron ışını kaynağı kullanılarak eritilmektedir [3], [15], [41]. Elektron ışın kaynağı kullanılması durumunda polimer ham maddeler yöntemde kullanılamamaktadır [15], [42]. Eriyen ham maddeler bir eriyik havuz oluşturur [4]. Eriyen ham maddelerin birleşmesi ve soğutulması ile ilk katman tamamlanır. İmalat tamamlanan katmanlar üzerine ham maddelerin baskı kafası ile aktarılması, eritilmesi ve

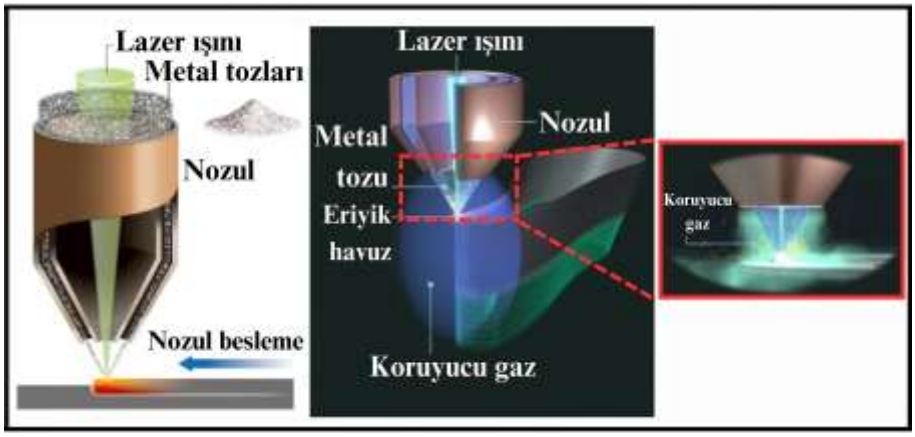
katılaşması şeklinde katmanlar halinde devam eder [15], [34]. Şekil 11'de tel bazlı direkt enerji depolama yöntemlerinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 11. Tel bazlı direkt enerji depolama yöntemlerinin şematik gösterimi [17].

İmalat sürecinde eriyik havuzun yüksek sıcaklıklarda atmosfer şartlarından korunabilmesi için inert gaz kullanılmaktadır [34]. Bu yöntemle imal edilen parçalar iyi mekanik özelliklere sahiptir [4], [43]. Tel ham maddeler kullanılan uygulamaların çözünürlükleri toz ham maddeler kullanılan uygulamalara kıyasla daha düşüktür. Daha düşük çözünürlüğe sahip olmasına karşılık tel ham maddeler kullanılan uygulamalar yüksek biriktirme oranlarına ve büyük imalat alanlarına sahiptir [15], [44]. Direkt enerji depolama yöntemleri ile yeni parçalar üretilebileceği gibi bu yöntem bakım ve onarım uygulamalarına da imkân tanımaktadır [15], [34].

Direk enerji depolama yöntemlerinden olan lazer toz şekillendirme (LENS) yöntemi imalatın gerçekleştirilebilmesi için üç temel bileşenden oluşmaktadır. Lazer kaynağı, toz başlığı ve inert gaz mekanizmaları yöntemin temel bileşenleri olarak kullanılmaktadır [3], [19]. Toz haldeki ham maddeler baskı platformunda oluşturulan eriyik havuza bir toz başlığı yardımı ile püskürtülmektedir. Eriyik havuza ham madde püskürtüldükten sonra yapı soğutularak katılaştırılır. Eriyik havuz bir elektron ışını yardımı ile oluşturulur ve her katmanda eriyik havuza toz püskürtülmesi ve soğutulması ile imalat işlemi katmanlar halinde gerçekleştirilir. Sıcaklık değişimleri ve soğutma işlemi sebebi ile imal edilen parçalarda artık gerilmeler oluşabilmektedir [19], [45]. Şekil 12'de toz bazlı direkt enerji depolama yöntemlerinin şematik gösterimi sunulmuştur.

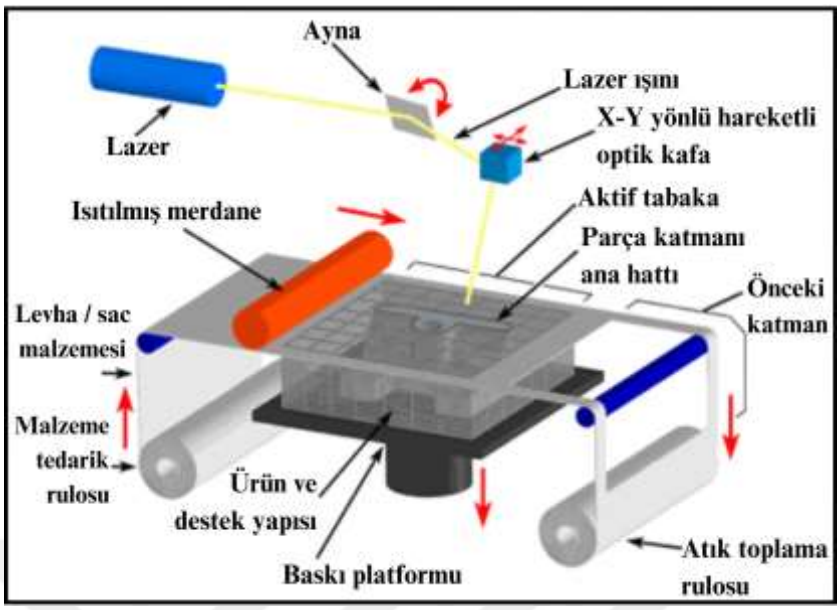


Şekil 12. Toz bazlı direkt enerji depolama yöntemlerinin şematik gösterimi [46].

Bir diğer direkt enerji depolama yöntemi olan elektron ışını eklemeli imalat (EBAM) yönteminde toz veya tel şekilde bulunan ham maddeler bir elektron ışını kaynağı sayesinde eritilmektedir [19]. İmalat süreci baskı kafasından ham maddelerin baskı platformuna aktarılması ve aktarılan ham maddelerin eş zamanlı olarak elektron ışını kaynağı ile eritilmesi şeklinde gerçekleşir [34]. Katılaştırılan katman üzerine ham madde aktarılması, eritilmesi ve soğutularak katılaştırılması ile katman katman imalat işlemi gerçekleştirilir. EBAM yönteminde imalat vakum etkisi altında gerçekleştirilmektedir [3], [19].

1.1.1.7. Levha/Sac Laminasyon

Levha/sac laminasyon yöntemi diğer bir ismi ile tabakalı obje üretimi (LOM) yönteminde bir ruloya sarılı şekilde bulunan kâğıt, polimer, seramik, kompozit veya metallerden oluşturulabilen ham madde besleme rulosu kullanılarak baskı platformuna taşınır ve ısıtılmış bir merdane yardımı ile ham maddeye basınç uygulanır [3], [4]. Termal yapışkan kaplı ham madde ısı ve basınç yardımı ile birleştirilir. Birleştirilen ham maddenin dış yüzeyleri bir lazer veya bıçak yardımı ile kesilir. Kesme işlemi ile ilk katman tamamlanır. Yeni katman için baskı platformu katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni ham madde baskı alanına taşınır. Baskı alanına taşınan ham madde önceki katmanın üzerinde basınç, ısı ve termal yapıştırıcı yardımı ile birleştirilir. Birleştirilen yeni ham maddelerin lazer veya bıçak kullanılarak kesilmesi ile imalat işlemi katmanlar halinde devam eder [3], [15] . Kesilen sac levhanın kullanıma uygun olmayan atık kısımları, atık silindirine sarılarak baskı platformundan çıkarılır [3], [47]. Şekil 13'te levha/sac laminasyon yönteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 13. Levha/sac laminasyon yönteminin şematik gösterimi [47].

Baskı platformundan atık silindiri yardımı ile çıkarılan bu ham maddeler tekrar kullanıma uygun değildir ve atık olarak değerlendirilmektedir [19], [45]. İmalat platformunda yer alan sac haldeki ham madde imalatı gerçekleştirilen parça için destek görevi görmektedir. Bu sayede imalat sürecinde ek bir destek elemanına ihtiyaç duyulmamaktadır [19]. İmalat işleminin sona ermesi ile üretimi gerçekleştirilen malzemenin baskı platformundan kolay çıkarılabilmesi için imalat sürecinde çapraz tarama uygulaması yapılabilmektedir [15].

İmalat sürecinde farklı ham maddelerin birbirlerine birleştirilebilmesi yöntemin avantajlı bir özelliğidir. Temas yüzeyinin arttırılması ile laminasyon hızı arttırılabilmektedir [15], [48]. Büyük boyutlu parçaların imalatı için uygun bir yöntemdir [4].

Levha/sac laminasyon yöntemi ile üretilen parçaların yüzey kaliteleri düşüktür ve imal edilen parçalarda imalat işleminden sonra ek uygulamalar gerekebilmektedir [15], [19]. İmal edilen parçaların mekanik özellikleri yapısal parçalar için uygun değildir [15], [49]

1.1.2. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Kullanım Alanları

Farklı ham maddeler ve teknikler kullanarak üretim gerçekleştirme kabiliyetine sahip olan Eİ'nin çeşitli endüstri ve mühendislik alanlarında kullanımları mevcuttur [50]. Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla hızlı tasarım ve üretim imkânı sunması, içi boşluklu ve karmaşık geometriye sahip parçaların üretilebilmesi, montaj gerektiren parçaların tek parça halinde üretilebilmesi ve üretimi gerçekleştirilecek parçaların

kişiselleştirilebilmesi gibi olumlu özellikleri Eİ'nin farklı endüstri alanlarında kullanılabilmesine olanak tanır [5]. Havacılık, otomotiv, sağlık, yapı, sanat ve hobi gibi endüstri alanları Eİnin kullanıldığı endüstri alanlarıdır [51], [52]. Eİ günden güne gelişmekte ve yöntemin kullanım alanları artmaktadır [19].

1.1.2.1. Havacılık Endüstrisi

Eİ ile üretilen parçalarda artık gerilmeler, mikroyapısal homojensizlikler ve mekanik anizotropi gibi dezavantajlar olmasına rağmen alüminyum, titanyum, paslanmaz çelikler ve nikel esaslı süper alaşımlar gibi malzemeleri kullanabilme kabiliyeti Eİ'nin havacılık endüstrisinde kullanım alanı bulmasına imkân tanır. Havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan titanyum gibi metalleri doğrudan üretebilen Eİ ile üretilen parçalar istenen mekanik gereksinimleri karşılayabilmektedir. Bu malzemeleri içi boşluklu yapılar olarak üretilebilmesine imkân tanıyan Eİ parçaların kütlelerinin azaltılabilmesi noktasında kullanımı mevcut olan bir yöntemdir. Havacılık endüstrisinde kullanılan yapıların mekanik gereksinimlerini karşılayarak hafifletilmesi çalışmaları, hava araçlarının yakıt verimliliğini arttırmasına ve maliyetlerinin azalmasına yardımcı olmaktadır. Hafifletilen parçalar ile ürün performansı korunur veya geliştirilir. Yakıt tüketiminin azalması ile çevre için olumlu bir etki ortaya çıkmaktadır. Havacılık endüstrisinde kullanılan parçaların iyi mekanik özelliklere sahip olması istenmektedir. Eİ'nin havacılık parçaları için istenilen mekanik özelliklerde üretim yapabilmesi yöntemi havacılık endüstrisi için kullanılabilir kılmaktadır. SLM ve EBM yöntemleri havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Eİ'dir.

Havacılık endüstrisinde ihtiyaç duyulan yedek parça ihtiyacını karşılayabilen Eİ ile bağlantı elemanları, kanat ve motor parçaları gibi çeşitli parçalar üretilebilmektedir [4], [53], [54].

1.1.2.2. Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv sektöründe kullanılan parçalar karmaşık yapılara sahip, üretimi zor ve ağır parçalardır. Otomotiv sektöründe kullanılan parçaların geleneksel yöntemler yerine Eİ kullanılarak daha kısa sürede ve daha hafif yapılar olarak üretilmesi mümkündür. Eİ üretimi zor ve karmaşık geometrilere sahip yapıları farklı ham maddeler kullanarak içi boşluklu yapılar halinde üretebilmektedir. Otomotiv endüstrisinde mevcutta kullanılan parçaların ihtiyaç duyulan gereksinimleri karşılayarak hafifletilmesi ile yakıt tüketimi

azaltılabilmekte ve bu durum çevre için olumlu bir etki oluşturmaktadır. Otomotiv sektöründe ihtiyaç duyulan parçaların üretilmesinde özellikle metal ham maddelerin kullanıldığı Eİ kullanılmaktadır. Eİ hızlı tasarım ve üretim imkânı sunmasından dolayı otomotiv sektörü için hızlı ürün prototipleme işlemi de yapılabilmektedir. Bu durum ürün geliştirme süresinin ve prototip üretim maliyetlerinin azalmasına yardımcı olur. Otomotiv endüstrisinde kullanılan parçaların Eİ ile üretilmesi ile depolama ihtiyaçları, nakliye maliyetleri ve malzeme tedariği gibi sorunlar azaltılabilmektedir.

Eİ kullanılarak otomotiv sektörü için ihtiyaç duyulan yedek parçalar üretilebilmektedir. Eİ kullanılarak otomotiv endüstrisinin ihtiyaç duyduğu yapısal kompozit bileşenler, motor vanaları ve turbo şarj türbinleri gibi yapılar üretilebilmektedir. Eİ ile üreticiler özelleştirilmiş parçalar da üretebilmektedir. [4], [55].

1.1.2.3. Sağlık Endüstrisi

Sağlık endüstrisinde kullanılan cihazların, araç ve gereçlerin üretiminde Eİ kullanılması bu endüstride hızla yaygınlaşmaktadır. Sağlık endüstrisinde kullanılan implantlar, protezler, ortezler ve diş hekimliği alanında ihtiyaç duyulan köprüler ve implantlar Eİ'nin tıbbi uygulamalarından bazılarıdır [4], [56]. Ameliyathane ekipmanlarının üretimi için de kullanılabilen Eİ ile depolama ve tedarik gibi dezavantajlar azaltılabilmektedir. Tıp öğrencilerinin eğitim sürecinde ihtiyaç duyduğu ekipmanların üretimi Eİ kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [54]. İmplant üretimi noktasında ihtiyaç duyulan ürünlerin Eİ kullanılarak kişiye özel olarak üretilebilmesi hem kişinin anatomisine uygun implantların üretilmesine olanak tanımaktadır hem de implantların üretim ve uygulama sürelerini ciddi oranda azaltmaktadır [4], [57].

Diş hekimliği alanında kullanımı yaygınlaşan Eİ bu alanda da geleneksel imalat yöntemlerine iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Bu alanda dental kronların, köprülerin ve implantların üretimi için kullanılabilen Eİ kişinin ihtiyaç duyduğu yapıya uygun üretim yapabilmektedir. Diş hekimliği alanında kişiye özel üretimin gerçekleştirilebilmesi ile uygulamaların verimliliği arttırılmaktadır [4].

Sağlık endüstrisinde yakın gelecekte fonksiyonel ve nakledilebilir organ üretimi; hidrojel, silikon, protein ve solüsyonlar gibi ham maddeler kullanarak Eİ ile üretilmesi amaçlanmaktadır [56].

1.1.2.4. Yapı Endüstrisi

Yapı endüstrisi alanında mimari uygulamalar için kullanılan Eİ bu sektör için kullanımı başlangıç aşamasındadır [4]. Mimari alanda oluşturulacak modellerin manuel olarak oluşturulması zaman ve maliyet sorunlarını ortaya çıkarmaktadır. Eİ kullanılarak oluşturulan modeller zaman ve maliyet tasarrufu sağlamasının yanı sıra karmaşık yapıları kolayca üretebilmekte ve iyi doğruluk oranlarına sahip modeller oluşturabilmektedir [54]. Eİ'nin kullanıldığı endüstriler arasında yaygınlığı az olan bir sektör olmasına karşın yapı endüstrisinde Eİ kullanım alanları mevcuttur ve genişlemeye devam etmektedir. Geleneksel yapı imalat yöntemlerinden olan döküm, kalıp ve ekstrüzyon yöntemlerinin yetersiz kaldığı noktalarda bu yetersizlikleri giderme kabiliyetine sahiptir. Eİ özellikle karmaşık geometriye sahip yapıların üretimi için kullanılabilmektedir. Bununla birlikte yapı endüstrisinde Eİ kalıpların ve içi boşluklu yapıların üretimi için de kullanılabilmektedir [4], [58], [59]. Eİ kullanılarak yapı inşa süreçlerinin verimliliklerinin arttırılması, inşa sürecinin ve insan gücünün azaltılması hedeflenmektedir. Gelecekte Eİ kullanılarak diğer gezegenlerde yapılar inşa edilmesi öngörülmektedir [4], [58].

1.1.2.5. Sanat ve Hobi Endüstrisi

Eİ'nin karmaşık geometrili ve üretimi zor yapıların üretilmesine imkân tanıması, tasarımcıya üretim aşamasında yaşayabileceği zorlukları aşarak kolay üretim yapma imkânı sağlamaktadır. Moda, mobilya ve hobi alanları gibi çeşitli alanlarda üretim kısıtlarını ortadan kaldırmaktadır. Tekstil alanında kullanılan farklı tasarımlı ürünler ve tekstil aksesuarları Eİ kullanılarak üretilebilmektedir. Ev ve ofis kullanımına uygun olan Eİ'nin endüstriyel olmayan bireysel kullanıcılar arasında kullanımı yaygındır ve bu alanda kullanıcılar hobi uygulamaları yapmaktadır. Eİ kullanıcıların seri üretime bağlı kalmadan bir ürün ortaya koymasına imkân tanımaktadır. Kullanıcılar 3D modelleri Eİ kullanarak fiziksel ürünlere dönüştürebilmektedir [4], [60].

Takı tasarım ve üretim alanında da kullanımı mevcut olan Eİ hem karmaşık modelli takıların üretilmesinde hem de model kalıplarının oluşturulmasında kullanılmaktadır. Kuyumcular ve takı tasarımcıları için tasarım ve üretim özgürlüğü sunmaktadır. Tasarımcıların oluşturduğu modelleri geleneksel yöntemlere kıyasla kısa sürelerde üretebilen Eİ üretim süresini ve işçi maliyetini düşürmektedir [54].

Sanat, hobi, takı ve tekstil endüstrilerinde kullanımının yanı sıra Eİ'nin akademik çalışmalarda ve eğitim alanında da kullanımı mevcuttur. Bu alanlarda proje tabanlı ve uygulamalı eğitimlerde materyal ve prototip üretmede kullanılmaktadır [19].

1.1.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Kullanılabilen Malzemeler

Geleneksel imalat yöntemlerinden olan tornalama, frezeleme ve delme gibi uygulamalarda imalat işlemi ham maddeden kesici uçlar yardımı ile parça koparılarak gerçekleştirilir. Ham madde katı ve tek formdadır. Geleneksel yöntemlerin aksine Eİ'nde imalat işlemi ham maddelerin katmanlar halinde birleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Birleştirme işlemi için Eİ farklı prensipler ve donanımlar kullanır. Bu sebeple Eİ'nde farklı formlarda ham maddelerin kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Laminant tabaka, filament, sıvı ve toz yapılar Eİ'nde kullanılan ham madde formlarındandır [50], [61].

Ham maddelerin birleştirilerek katılaşması için farklı prensipler ve donanımlar kullanan Eİ'nde kullanılan ham maddelerin türleri de değişmektedir. Eİ'nde polyesterler, termoplastik polimerler, ışığa duyarlı reçineler, fotopolimerler, metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler ham madde olarak kullanılabilen malzemelerdir. Eİ'nde imalat işlemi için kullanılan donanımlar, malzeme formları, türleri ve proses türleri Tablo 2'de belirtilmiştir [61].

Tablo 2. Eİ'nin genel özellikleri [61].

Yöntem	**Donanım**	**Malzeme Formu**	**Malzeme Türü**	**Proses Türü**
LOM	Isıtmalı silindir ve lazer	Kâğıt veya folyo ile lamina tabaka	Polyesterler	Yapıştırma, bağlama ve kesme
FDM ve FFF	Ekstruder	Filament	Termoplastik polimerler	Ekstrüzyon
SLA	Lazer	Sıvı	Işığa duyarlı reçineler ve fotopolimerler	Fotopolimerizasyon ve kürleme
DLP	DLP projektör	Sıvı	Işığa duyarlı reçineler ve fotopolimerler	Fotopolimerizasyon ve kürleme
Polyjet, MJM ve MJP	Nozul ve UV ışık	Sıvı	Işığa duyarlı reçineler ve fotopolimerler	Fotopolimerizasyon ve kürleme
SLS, SLM, DMLS ve DLM	Lazer	Toz	Metaller ve seramikler (SLS için polimerler)	Sinterleme ve eritme
LENS ve DLM	Lazer	Toz	Metaller	Eritme
EBM	Elektron ışın	Toz	Metaller	Eritme
BJ	Yapıştırıcı	Toz	Metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler	Bağlama ve sinterleme
LCM	Mavi ışık	Sıvı	Seramikler	Fotopolimerizasyon, kürleme ve sinterleme

Eİ birçok malzeme türünü ham madde olarak kullanabilme kabiliyetine sahiptir. Kullanılacağı endüstri alanının ihtiyaçları doğrultusunda farklı ham maddeleri kullanarak üretimi gerçekleştirebilmektedir. Eİ'nde üretim için kullanılan malzeme türlerine bazı örnekler Tablo 3'te belirtilmektedir.

Tablo 3. Eİ'nde kullanılabilen malzemeler [61].

Malzeme Türleri	**Malzemeler**	**Eİ yöntemi**
Polimerler	Işığa duyarlı reçineler ve fotopolimerler	SLA ve MJM
	Balmumu	MJM
	Poliamid 12, poliamid GF ve polistiren	SLS
	ABS, PC, PC-ABS, ASA, ABS-CF, ve PEEK	FDM
Metaller	Paslanmaz çelik GP1, PH1 ve 17-4, kobalt-krom-molibden alaşımı MP1, kobalt-krom alaşımı, titanyum ve alaşımları, maraging çeliği, IN718, AlSi20Mg ve alüminyum	SLS ve SLM
	Çelikler: H13, 17-4PH, 13-8Mo, 304, 420, alüminyum 4047, saf titanyum, Ti6Al4V, Ti6Al2Sn4Zr2Mo, Ti6Al2Sn4Zr6Mo ve IN	LENS
	Ti6Al4V ve kobalt-krom alaşımı	EBM
Seramikler	Zirkonyum, silika, alümina veya başka bir sıvı ışığa duyarlı reçine içindeki seramik parçacıklar	SLA
	Kurşun zirkonat-titanat, Si_3N_4, zirkonyum, silika ve biyo-seramikler	FDM
	Zirkonyum, silika, alümina, ZrB_2, biyo-seramikler, grafit, biyo-cam ve çeşitli kumlar	SLS ve SLM
	Zirkonya, alümina ve kalsiyum fosfat	LCM
Kompozitler	Polimer-metal kompozitler, polimer-seramik kompozitler ve fiber takviyeli kompozitler	FDM
	Polimer kompozitler, seramik kompozitler, fiber ve parçacık takviyeli kompozitler	LOM
	Polimer kompozitler, seramik kompozitler, metal-seramik kompozitler ve fiber takviyeli kompozitler	SLS ve SLM
	CoCrMo/Ti6Al4V, TiC/Ti, Ti/TiO_2 ve Ti6Al4V/IN718	LENS
	Zirkonya kompozitler, alümina kompozitler ve kalsiyum fosfatlı kompozitler	LCM

1.1.3.1. Polilaktik Asit

Eİ'nden olan FDM yönteminde ham madde olarak filamentler kullanılmaktadır. FDM yönteminde kullanılan filamentler çok çeşitli ham maddelerden üretilebilmektedir. Bu yöntemde PC, ABS ve PLA en yaygın kullanılan ham maddeler arasında yer almaktadır [62].

PLA malzemeler yarı kristal veya amorf yapıya sahip polimerlerdir. PLA malzemeler biyouyumluluk ve biyoçözünürlük özelliklerine sahip malzemelerdir. PLA filamentlerin üretiminde bir çeşit karbonhidrat türü olan nişasta gibi doğal polimer maddeler esas olarak kullanılmaktadır. Bu özellikleri sebebi ile çevre ve insan dostu bir malzemedir. FDM yönteminde kullanılabilecek düşük maliyetli ham maddeler arasında yer almaktadır [63], [64].

PLA filamentler mekanik parçaların üretiminde iyi mekanik özelliklere sahip olmamaları sebebi ile kullanılmamaktadır. Mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi için PLA filamentler takviye elemanlar ile desteklenmektedir. Karbon fiberler, çeşitli metaller ve nanopartiküller gibi maddeler PLA filamentlere takviye elemanı olarak katılabilmektedirler [62].

1.2. Nano Tozlar

Nanoteknoloji alanının temelini oluşturan nano tozlar, 100 nanometrenin altında tanecik boyutuna sahip olan tozlar olarak tanımlanmaktadırlar. Nanokristaller, nanopartiküller, nanotüpler, nanoteller, nanoçubuklar ve nanofilmler nano boyutlu malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır [65], [66]. Nano maddeler belirli boyut aralıklarında hacimsel maddelerden daha farklı ve üstün özellikler sergilemektedirler [66]. Hacimsel boyuttaki malzemelere kıyasla kuantum boyut etkileri, elektronik yapının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının karakterleri ve yüksek yüzey-hacim oranları gibi bazı özellikler nanopartiküllerin üstün kabul edilen özellikleri arasında yer almaktadır[65], [66].

Nanopartiküller gösterdikleri üstün özellikleri sayesinde birçok endüstri alanında kullanılmaktadırlar. Elektrik-elektronik, otomotiv, kimya ve biyomedikal endüstrileri nanopartiküllerin kullanıldığı endüstri alanları arasında yer almaktadır [66]. Yüksek aktiviteli katalizörlerde, optik uygulamalarında, süper iletkenlerde, yüzey aktif maddelerde, ilaç taşıyıcılarda ve özel teşhis aletlerinde nanopartiküller kullanılmaktadır. Ek olarak nanotaşıyıcılar, sensörler, nanomakineler ve veri depolama hücreleri gibi minyatürleştirilmiş aletler nanopartiküllerin kullanım alanları arasında yer almaktadır. Nanopartiküller ihtiyaç duyulan özelliklere göre farklı boyutlarda ve morfolojilerde hazırlanabilmektedirler. Çekirdek-kabuk, katkılı, sandviç, küresel, boşluklu, çubuk benzeri ve çok yüzlü morfolojilerde nanopartiküller üretilebilmektedir. [65], [66].

Nano boyutta malzemelerin üretilmesi iki temel yaklaşım altında sınıflandırılmaktadır. Bu yaklaşımlar yukarıdan aşağıya (top-down) ve aşağıdan yukarıya (bottom-up) yaklaşımlarıdır [65]. İlk yaklaşım olan yukarıdan aşağıya yaklaşımında bir bütün malzeme küçük parçacıklara ayrılarak işlenir ve nano boyutta yapılar elde edilir. Yukarıdan aşağıya yaklaşımının başlıkları aşağıda belirtilmiştir.

- Mekanik aşındırma
- Elektro patlama
- Dağlama
- Isıl (termik) yöntem
- Dönen soğuk yüzeyde katılaştırma
- Gaz atomizörü
- Yüksek enerji
- Litografi, aşırı ultraviyole (EUV)
- Yumuşak litografi (desenleme)

İkinci yaklaşım olan aşağıdan yukarıya yaklaşımında ise atom ve molekül yapıları kimyasal reaksiyonlar yardımıyla boyutça büyütülür ve nano boyutta yapılar elde edilir. Aşağıdan yukarı yaklaşımının başlıkları aşağıda belirtilmiştir.

- Asal gaz yoğunlaştırma
- Alev sentezi
- Kimyasal buhar yoğunlaştırma
- Moleküler hüzme
- Atom tabaka çökelmesi
- Yanma
- Yaş kimyasal sentez
- Elektro-patlama
- Lazer ablasyonu

- Sol-jel
- Ultrasonik sprey piroliz (USP) [67].

1.2.1. Nano Grafen

Karbon esaslı bir malzeme olan nano grafen, bal peteği gibi altıgen bir yapıya sahiptir. Nano grafen ilk kez 2004 yılında Geim ve Novoselov tarafından tek katmanlı bir yapıda ortaya çıkarılmıştır. [68], [69]. Grafen altı adet karbon halkasının bir araya gelmesi ile oluşan bir tabakadır. 1 mm kalınlığında grafen elde edebilmek için üst üste 3 milyon grafen katmanına ihtiyaç duyulmaktadır [68], [70]. Doğada grafen gibi dizilmiş iki boyutlu başka bir karbon formu bulunmamaktadır. Doğada örneği bulunmayan bu malzeme üstün özelliklere sahiptir [70]. Tek tabakalı grafenini genel özellikleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Tek tabakalı grafenin genel özellikleri [70].

Özellikler	**Değer**
Hibrit şekli	sp^2
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Boyut	İki
Saflık derecesi (%)	99
Kütlesel (bulk) yoğunluk (g/cm^3)	~0,3
Gerçek yoğunluk (g/cm^3)	2,25
Kalınlık (nm)	~1-2
Yüzey alanı (m^2/g)	2600
Yüksek sıcaklık direnci (C°)	-75 +200
Termal iletkenliği (WK^{-1}/m)	4840-5300
Elektron hareketliliği $cm^2/(V.s)$	~$2,5x10^5$
Elastisite modülü (TPa)	~1

Grafen süper esnek, sağlam, hafif ve ince malzeme olarak değerlendirilmektedir. Çok iyi elektrik iletkenliğine ve elastik özelliğine sahip olmasının yanı sıra yüksek erime sıcaklığına da sahiptir. Grafenin erime sıcaklığı yaklaşık 3000 °C civarlarındadır [68].

Elektronlar grafende, silisyuma kıyasla 100 kat daha hızlıdır. Güçlü karbon bağları sayesinde güçlü bir malzeme olmasının yanı sıra grafen bilinen en ince malzemedir. Bu ince malzeme çelikten yaklaşık 100 kat daha iyi elastisite modülüne sahiptir. Termal iletkenliği bakıra kıyasla daha iyi olan grafen, polimerlerin içerisine katılarak içeriğine katıldığı polimerleri iletken hale getirebilmektedir. Üstün özellikleri grafenin kullanım alanlarını genişletmektedir ve gelecekte daha fazla kullanım alanına sahip olacağı öngörülmektedir [70].

Göstermiş olduğu üstün mekanik, elektriksel ve termal özellikleri ile otomotiv, havacılık, elektrik-elektronik, robotik, enerji depolama, güneş hücreleri, telekomünikasyon, biyokimya, tıp ve medikal endüstrilerinde kendisine kullanım alanları bulacağı öngörülmektedir.

Grafen iyi mukavemet gerektiren kompozit malzemelere takviye elemanı olarak katılabilmektedir. Özellikle alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi metallerden oluşturulan kompozitler için iyi bir takviye elemanıdır [68], [70].

1.3. Tasarım Optimizasyonları

Optimizasyon, en az maliyet ve malzeme kullanarak en verimli tasarıma ulaşmak olarak tanımlanabilmektedir. Optimizasyon bir problemin belirtilen sınır şartları altındaki en iyi çözümü olarak da tanımlanabilmektedir. Optimizasyonda amaç bir fonksiyonda maksimum ve minimumun elde edilebilmesidir [71]. Belirli sınır şartları gözetilerek optimizasyon teriminin matematiksel tanımı;

$f(x)$: Amaç fonksiyonu

$x = \begin{cases} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ . \\ . \\ X_n \end{cases}$: Tasarım değişkenleri

R^n: Tasarım uzayı

$g_j(x) \leq 0, j = 1,2,3, \dots m$

$l_j(x) \leq 0, j = 1,2,3, \dots p$ (1.1)

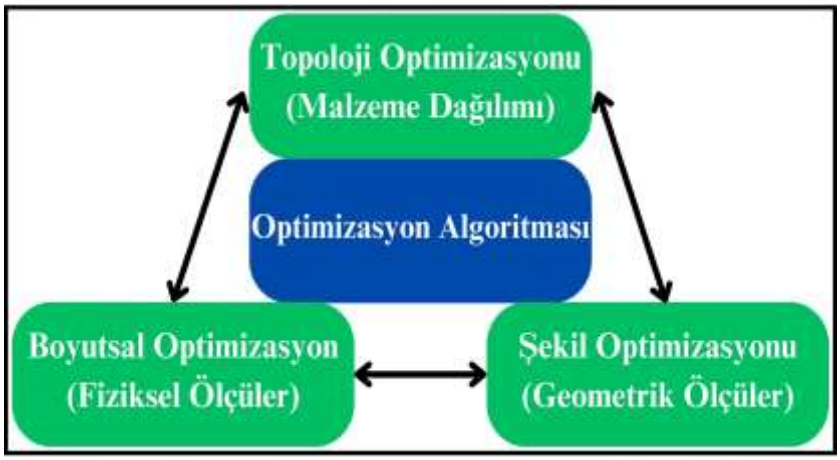
"n" boyutlu tasarım değişkenleri vektörü X vektörüdür. $f(x)$ amaç fonksiyonu, $g_j(x)$ eşitsizlik ve $l_j(x)$ eşitlik sınır şartları olarak tanımlanmaktadır. "n" tasarım değişkenlerinin toplam sayısını ifade ederken, "m" ve "p" sınır şartlarının toplam sayılarını ifade etmektedir. Bu değerler birbirlerinden bağımsızlardır [72], [73].

Mühendislik alanında tasarım optimizasyonları farklı başlıklar altında incelenmektedir. Tasarımsal optimizasyonlar yapısal optimizasyon (YO) başlığı altında üç alt gruba ayrılmaktadır. Bu alt gruplar boyut optimizasyonu (BO), şekil optimizasyonu (ŞO) ve topoloji optimizasyonudur (TO) [74].

1.3.1. Yapısal Optimizasyon

Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olarak üçe ayrılan yapısal optimizasyonun ilk uygulamaları BO'dur. BO'nu sırasıyla şekil ve topoloji optimizasyonu takip etmektedir. Optimizasyon algoritmasının şematik gösterimi Şekil 14'te sunulmuştur. Yapısal optimizasyonda optimum tasarımın elde edilebilmesi için belirli kısıtlar altında sınır şekilleri değişmektedir [75].

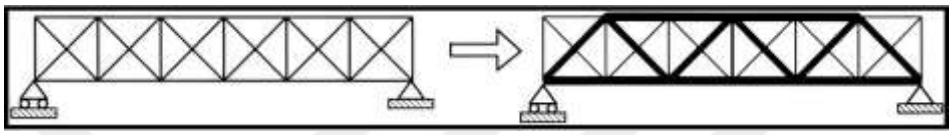
Yapısal optimizasyonda kütle, yer değiştirme ve gerilme değerlerini optimum seviyeye indirmek ve optimum malzeme dağılımını belirlemek amaçlanmaktadır [76].



Şekil 14. Optimizasyon algoritmasının şematik gösterimi [72].

1.3.1.1. Boyut Optimizasyonu

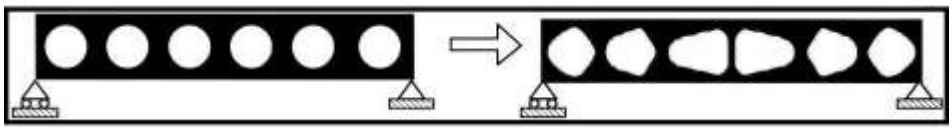
BO bir yapının boyut unsurlarının optimum olarak ayarlanmasıdır. BO yapının fiziksel ölçüleri değiştirilerek gerçekleştirilir. BO'nda yapının kesit, yükseklik, genişlik ve kalınlık gibi değerleri değiştirilebilmektedir. En basit YO uygulamasıdır. BO gerilimi düşürmek ve mukavemeti artırmak amacı ile yapılmaktadır. BO yapının sınır ölçülerini ve delik geometrisini değiştirmeyen bir uygulamadır [13], [76]. BO'nun şematik gösterimi Şekil 15'te sunulmuştur.



Şekil 15. BO'nun şematik gösterimi [77].

1.3.1.2. Şekil Optimizasyonu

ŞO bir yapının şekil unsurlarının optimum olarak ayarlanmasıdır. Yapının dış sınırları veya yapı üzerinde bulunan yarıçaplar, pahlar, delik çapları ve delik şekilleri gibi geometriler değiştirilerek gerilmeler en aza indirilmektedir. ŞO'nda yapıya olmayan delikler açılmamakta, yapıda mevcut olan delik şekilleri değiştirilmektedir [76]. Yüzey üzerinde tanımlanabilmesi sebebi ile BO'na kıyasla daha geniş, TO'na kıyasla ise daha sınırlandırılmış bir YO türüdür [13], [78]. ŞO'nun şematik gösterimi Şekil 16'da sunulmuştur.



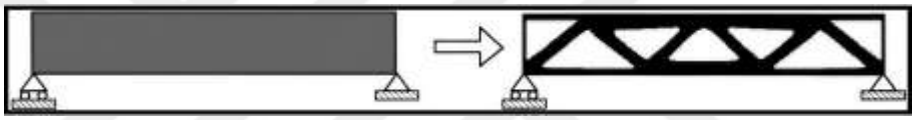
Şekil 16. ŞO'nun şematik gösterimi [77].

1.3.1.3. Topoloji Optimizasyonu

YO türlerinin en genişi olan TO, belirli sınır şartları gözetilerek bir yapının en verimli hale gelebilmesi için yapının boyutunda, şeklinde, yerleşiminde ve boşluklarında yapılan değişimler bütünüdür. TO uygulamalarında dayanım korunarak en verimli malzeme dağılımı bulunmaktadır [76].

TO uygulanan bir yapı, orijinaline kıyasla çok farklı bir tasarıma sahip olabilmektedir. TO'nda amaç; belirlenen sınır şartlarında minimum kütleye ve maksimum mukavemete sahip en verimli yapıyı elde etmektir. [78].

Belirli sınır şartları altında gerçekleştirilen TO'nda yapı belirli yüklere ve gerilmelere maruz bırakılır ve bir tasarım alanı oluşturulur. Belirlenen şartlar altında sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method-FEM) kullanılarak analizler gerçekleştirilir. Uygulanan yükler doğrultusunda yapıda minimum gerilmelerin olduğu alanlarda malzeme eksiltme işlemleri yapılmaktadır. Gerilmelerin maksimum olduğu alanlarda ise yapı korunmaktadır. Yapı üzerine uygulanan yüklerin taşınabildiği tasarım korunmakta bu sayede yapıdan kütle azaltılarak en verimli malzeme dağılımı oluşturulmaktadır [76]. TO'nun şematik gösterimi Şekil 17'de sunulmuştur.



Şekil 17. TO'nun şematik gösterimi [77].

1.3.1.3.1. Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri

TO farklı yöntemler kullanılarak uygulanabilmektedir. Penalizasyon ile katı izotropik malzeme metodu (SIMP/Solid Isotropic Microstructure with Penalization), seviye kümesi yaklaşımı (LSA/Level Set Approach), evrimsel yapı optimizasyonu (ESO/Evolutionary Structural Optimization) ve homojenleştirme metodu (HM/Homogenization Method) TO yöntemleri arasında yer almaktadır [78], [79].

SIMP yönteminde belirli sınır şartları, yük durumları, üretim kısıtlamaları, tasarım alanları ve performans gereksinimleri altında yapıda bulunan malzeme dağılımları değiştirilerek en verimli yapı elde edilmektedir. SIMP yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucunda gerilimin düşük olduğu alanlardan malzeme eksiltilir, gerilimin yüksek olduğu alanlar ise korunarak en verimli yapı elde edilir.

SIMP yönteminde yapıdaki malzeme yoğunluğu ρ ile gösterilmektedir. Yapıda korunması gereken alanlar $\rho_e = 1$ denklemi ile ifade edilir. Yapıdan çıkarılabilecek alanlar ise $\rho_e = 0$ denklemi ile ifade edilir. Malzeme yoğunluğu 1 ise bu alan yapıda korunur, malzeme yoğunluğu 0 ise bu alan yapıdan çıkarılabilir.

SIMP yönteminde yapıyı oluşturan mesh elemanları farklı yoğunluklarda bulunabilmektedirler. Bu durum her bir mesh elemanının elastisite (Young) modülünün değişmesine sebep olabilmektedir. Elastisite modülünün eşitliği;

$$E = E_0 \cdot \rho^p \tag{1.2}$$

Eşitlikte her bir mesh elamanı için, malzeme yoğunluğu "ρ" ile, elastisite modül "E_0" ile ve penaltizasyon faktörü "p" ile ifade edilmektedir [76], [79].

SIMP yönteminde elastisite değerlerinin azalması ile sertlik değeri azalmaktadır. SIMP yönteminde sertlik değerinin eşitliği;

$$K_{SIMP_\rho} = \Sigma_{e=1}^{N}[\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p]K_e \tag{1.3}$$

Eşitlikte K_e malzemenin sertlik matrisini ve N modelin eleman sayısını belirtmektedir [79].

LSA yöntemi sınır bazlı bir optimizasyon yöntemi olup bu yöntemde bir sınır yapısı farklı sınır yapılarına bölünerek birden fazla sınır yapıları oluşturabilmektedir. LSA yönteminde birden fazla bölünmüş sınır yapıları bir araya gelerek tek bir sınır yapısı oluşturabilmektedir. Bu durum sınır yapılarının optimizasyonunda topolojinin kolayca değişebilmesine imkân tanımaktadır.

$\emptyset$'ye bağlı kısmi diferansiyel denklem olarak optimum yapısal sınır eşitliği;

$$\frac{\partial_\emptyset(x)}{\partial t} = -\nabla\emptyset(X)\frac{dx}{dt} = -\nabla\emptyset(X)\Gamma(X,\emptyset) \tag{1.4}$$

Eşitlikte $\Gamma(X,\emptyset)$ seviye seti yüzeyinin "hız vektörünü" belirtmektedir.

LSA yönteminde seviye kümeleri çeşitli delikler oluşturabileceği gibi bu kümeler bölünebilmekte veya farklı sınırlar ile birleşebilmektedirler. Bu durum karmaşık yüzey şekillerinin kolayca oluşturulabilmesine olanak tanımaktadır. LSA yönteminde modeller çok sayıda serbestlik derecesine sahip olabilmektedirler [80].

ESO yöntemi popülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemidir ve bu yöntemde rastgele yapılan seçimler en verimli sonuca ulaşıncaya kadar tekrar edilir. FEM kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilir. Yapıda minimum kütle ve maksimum dayanım elde

edilebilmesi için kademeli olarak eksiltme gerçekleştirilir. von-Mises stresleri değerlendirilerek yapıya katkıda bulunan ve bulunmayan bölümler belirlenir. Yapının dayanımına katkıda bulunmayan bölümler kademeli olarak çıkarılır. Eksiltme işlemi en verimli sonuç elde edilinceye kadar tekrarlanır [78], [80].

HM yapıda bulunan boşlukların ve yapının malzeme yoğunluğunun farklı dağılımlarda olmasını kullanarak gerçekleştirilmektedir. Topolojisi boşluklardan, gözeneklerden ve katı bölgelerden oluşan bir yapının mikro yapısında çok sayıda küçük boşluklar bulunmaktadır. Bu yöntemde istenilen yapının malzeme dağılımı çözümlenmektedir. Yapı üç grupta incelenerek çözümlenir. Bu gruplar aşağıda belirtilmiştir [80].

- Malzeme bulundurmayan yapı (delik büyüklüğü=1)
- İzotropik malzeme bulunduran yapı (delik boyutu=0)
- Ortoropik malzeme bulunduran yapı (0<delik büyüklüğü<1)

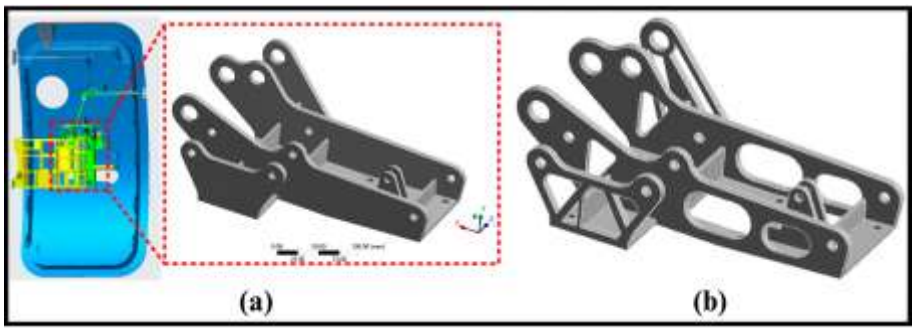
2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Çalışma kapsamında bir havacılık parçasının topoloji optimizasyonu (TO) uygulaması ile tasarımının değiştirilerek kütlesinin azaltılması ve eklemeli imalat yöntemleri (Eİ) kullanılarak üretilmesi amaçlanmıştır. Literatürde çeşitli braket parçaları üzerinde TO ve Eİ kullanılarak kütle azaltması amaçlanan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazıları aşağıda yer almaktadır.

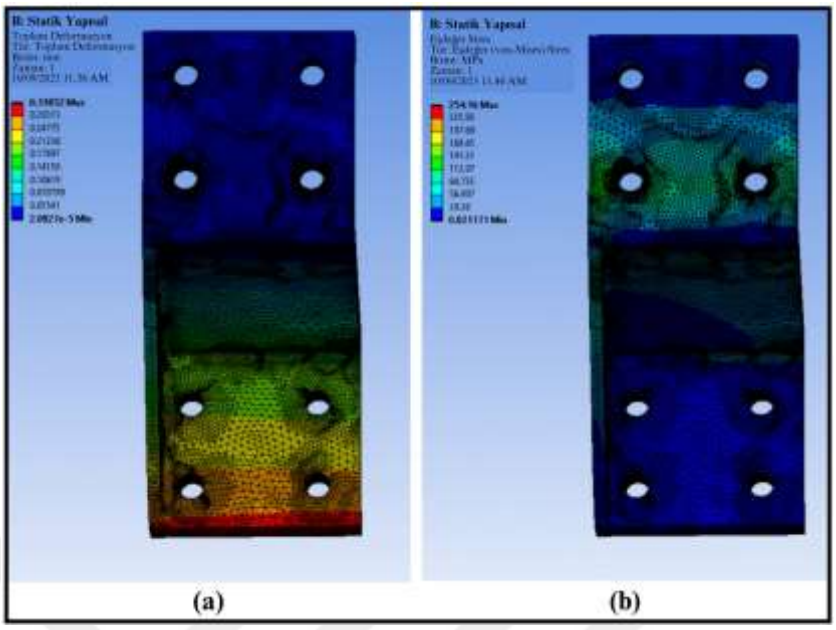
2.1. Literatür Taraması

Xie ve diğ. [1] yaptıkları çalışmada sivil uçaklarda kullanılan 7050 Alüminyum alaşımlı bir menteşe braketinin TO ile tasarımının değiştirilerek kütlesinin azaltılması işlemini gerçekleştirmişlerdir. Braket parçasının mekanik performans analizini yapmak için parçayı TO öncesinde ve sonrasında sayısal simülasyonlar kullanarak test etmişlerdir. Sayısal simülasyonlar için ANSYS Workbench 2019 yazılımını kullanmışlardır. Parçaya 2 mm büyüklüğünde mesh ataması yapmışlardır. Düğüm sayısını 81010 ve eleman sayısını 324428 olarak belirlemişlerdir. Menteşe braketinin maksimum deformasyonunu TO'ndan önce 0,017 mm, TO'ndan sonra ise 0,024 mm olarak belirlemişlerdir. Yapının hafifletilmesinden dolayı yapıda malzeme yoğunluğun azalması sebebi ile sertliğin düştüğü sonucuna varmışlardır. Bu durumun deformasyonu artırdığını belirtmişlerdir. Ön optimizasyon sonucunda yapının maksimim geriliminin 57,84 MPa olduğunu bu değerin uygun değer olan 294 MPa'dan oldukça düşük olduğunu ve mukavemet gereksinimlerini karşılayabildiğini belirtmişlerdir. Nihai optimizasyon sonucunda ise yapının maksimum gerilimini 69,4 MPa olarak belirlemişlerdir ve bu değerin mukavemet gereksinimlerini karşılayabildiğini belirtmişlerdir. Optimize edilmiş yapının %28 oranında hafifletilmesine karşın çalışma şartlarını karşıladığını sonucuna varmışlardır. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımları Şekil 18'de sunulmuştur. Eİ'nden olan stereolitografi (SLA) yöntemini kullanarak parçayı üretmişlerdir.



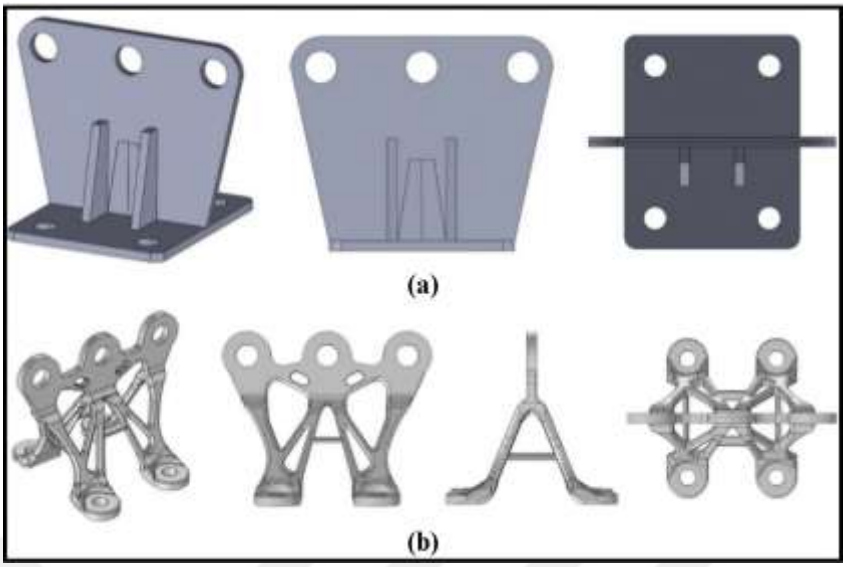
Şekil 18. (a) Menteşe braketinin orijinal tasarımı, (b) menteşe braketinin yenilenmiş tasarımı [1].

Okorie ve diğ. [81] yaptıkları çalışmada endüstriyel bir braket parçasının TO ve Eİ uygulaması ile hafifletilmesi uygulamasını yapmışlardır. TO'nu, yapısal analizleri ve tasarımsal iyileştirmeleri ANSYS Workbench yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaya ait orijinal braket tasarımının sayısal analizleri Şekil 19'da sunulmuştur. Yaptıkları çalışmalarda kullandıkları prototipleri Eİ yöntemi olan eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi ile polilaktik asit (PLA) filament kullanarak üretmişlerdir. Orijinal braket parçasına uyumlu olacak şekilde %10, %20, %30 ve %40 oranlarında kütle azaltma uygulamalarını denemişlerdir fakat yalnızca %10 ve %20 oranlarının uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. PLA baskı numuneleri ile aldıkları sonuçlar neticesinde 0,059 kg'dan 0,048 kg'a yaklaşık %19 oranında kütle azalması sağlamışlardır. Optimize edilmiş tasarımların orijinal braket ile sertliğinin karşılaştırılması ve deneysel doğrulamanın elde edilebilmesi için FDM yöntemi ile braket parçalarını üretmişlerdir. Ürettikleri deney numunelerini 1,5 kN yük altında yer değiştirme oranlarını incelemişlerdir. Uygun optimizasyon ile hafif ve orijinali ile uyumlu parçaların üretilebileceğini belirtmişlerdir.

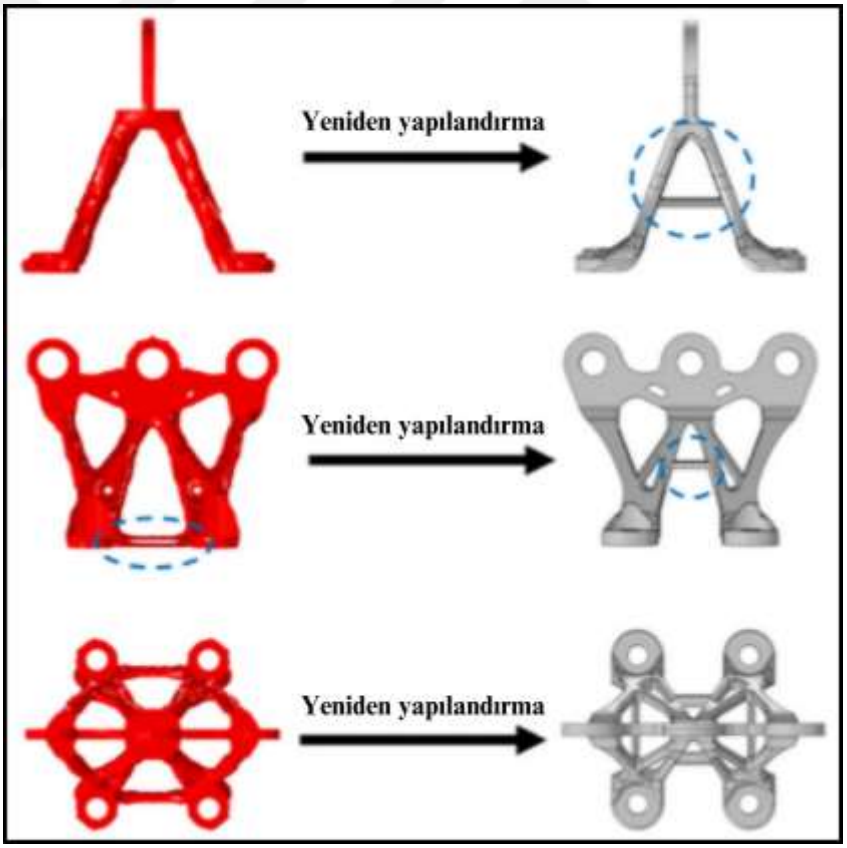


Şekil 19. Orijinal braket tasarımının sayısal analizleri, (a) Yapının toplam deformasyon değerleri, (b) Yapının eşdeğer stres değerleri [81].

Chen ve diğ. [82] yaptıkları çalışmada bir havacılık braketini TO ile hafifletmişlerdir ve Tİ64 tozu kullanarak Eİ yöntemi olan seçici lazer eritme (SLM) yöntemi ile üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada havacılık braketlerini hem sayısal simülasyon testleri ile hem de yorulma testleri ile değerlendirmişlerdir. Yapıya birkaç noktadan eklemeler yapmışlardır. Çalışmaya ait yeniden yapılandırma işlemi Şekil 21'de sunulmuştur. Yaptıkları sayısal değerlendirmeler sonucunda braket parçasının kütlesini 480 g'dan 285,7 g'a düşürmüşlerdir. %37 daha hafif bir tasarım elde etmişlerdir. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımları Şekil 20'de sunulmuştur. Yorulma testlerini oda sıcaklığında ve 10 Hz frekanslı sinüs dalgaları ile gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları değerlendirmeler sonucunda yorulma performansı göz önüne alındığında TO ve Eİ'nin entegrasyonunun hafif yapıların tasarımı için güçlü bir uygulama olabileceğini belirtmişlerdir.



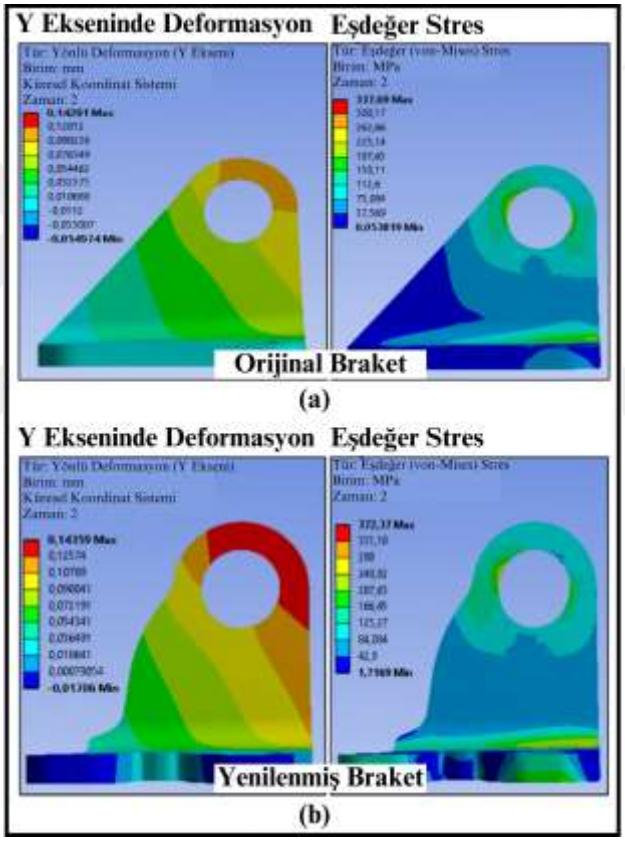
Şekil 20. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı, (b) Braket parçasının yenilenmiş tasarımı [82].



Şekil 21. TO sonrasında braket tasarımının yeniden yapılandırılması [82].

Işık ve diğ. [83] yaptıkları çalışmada TO uygulayarak bir motor braketinin hafifletilmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Braket parçasını hem sayısal testlere hem de çekme testlerine tabi tutmuşlardır. Optimizasyon işlemini ANSYS Workbench yazılımı ile

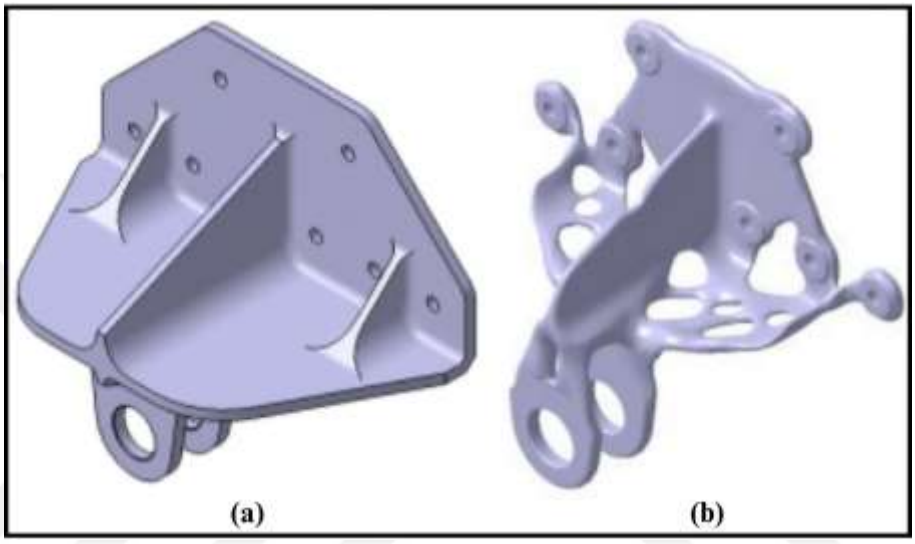
gerçekleştirmişlerdir. 4250774 düğüm sayılı ve 1001112 eleman sayılı bir yapı elde etmişlerdir. Braket parçasının orijinal kütlesini 1,155 kg, optimize edilmiş braket tasarımının kütlesini ise 0,784 kg olarak belirlemişlerdir. Braket parçasının tasarımını yenileyerek orijinaline kıyasla %32 oranında hafifletme sağlamışlardır. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımının sayısal analizleri Şekil 22'de sunulmuştur. Inconel 718 alaşımı kullanarak elektron ışını eritme (EBM) yöntemi ile braket parçasını üretmişlerdir. Üretim için 45 ve 106 µm boyut aralığında toz kullanmışlardır. Üretmiş oldukları braket parçalarına farklı yükler altında çekme testi uygulamışlardır.



Şekil 22. (a) Orijinal braket tasarımının y ekseninde deformasyon ve eşdeğer stres değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının y ekseninde deformasyon ve eşdeğer stres değerleri [83].

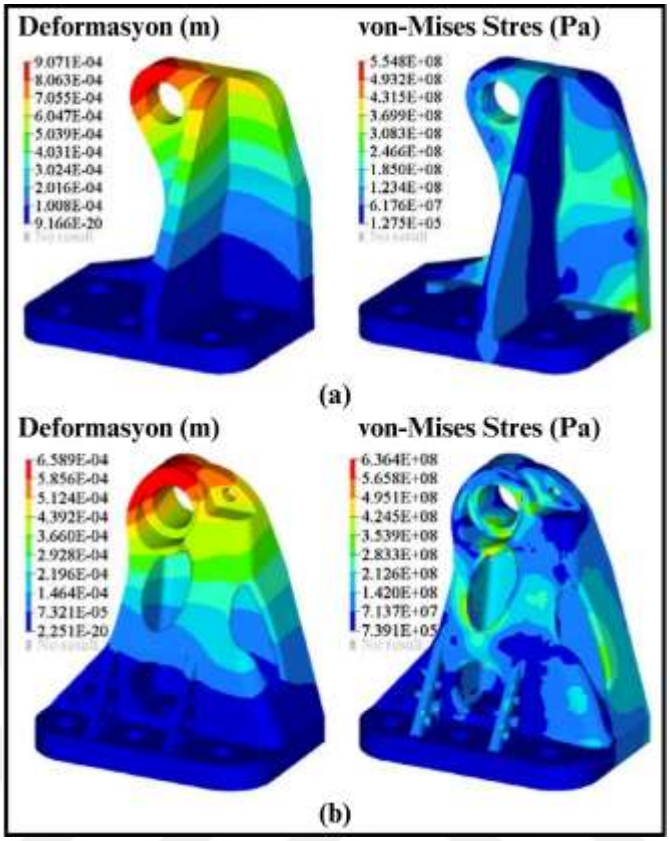
Yılmaz ve diğ. [84] yaptıkları çalışmada insansız hava aracına ait bir pylon parçasına TO uygulayarak hafifletme işlemi gerçekleştirmişlerdir. 7050 Alüminyum malzemesinden olan Pylon parçasını bir Eİ yöntemi olan EBM kullanarak Ti6Al4V olarak üretmişlerdir. Yaptıkları deneylerde orijinal pylon parçasının maksimum toplam deformasyon ve maksimum von-Mises stres değerlerini sırasıyla 0,64 mm ve 278 MPa olarak belirlemişlerdir. Yenilenmiş pylon tasarımın maksimum toplam deformasyon ve

maksimum von-Mises stres değerlerinin ise 0,60 mm ve 334 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Orijinal pylon parçasının kütlesini 544 g'dan 376 g'a düşürmüşlerdir. Tasarımı yenilenen pylon parçasının kütlesini %31 oranında hafifletmişlerdir. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımları Şekil 23'te sunulmuştur. Yaptıkları çalışmalar neticesinde TO ve Eİ'nin beraber kullanılması ile bağlantı parçalarında hafifletme işlemi gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir.



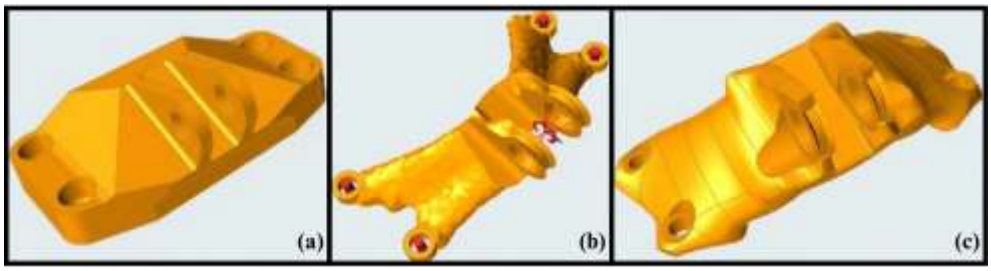
Şekil 23. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı, (b) Braket parçasının yenilenmiş tasarımı [84].

Shi ve diğ. [85] yaptıkları çalışmada bir havacılık braketinin TO ile hafifletilmesi ve Eİ ile üretilmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Braket parçasına hem TO hem de boyut optimizasyonu (BO) uygulamışlardır. Sırası ile orijinal, yenilenmiş ve nihai braket tasarımlarının maksimum von-Mises streslerini 554,8 MPa, 619 MPa ve 636,4 MPa olarak belirlemişlerdir. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımının sayısal analizleri Şekil 24'te sunulmuştur. Yeni braket tasarımının orijinaline kıyasla yapısal kütlesinin %18 oranından fazla azaltıldığını buna karşılık mekanik gereksinimleri karşılayabilir düzeyde olduğu sonucuna varmışlardır. Orijinal, yenilenmiş ve nihai braket tasarımlarının kütlelerini sırası ile 1,91 kg, 1,62 kg ve 1,56 kg olarak ölçmüşlerdir. Optimize ettikleri braket tasarımını Eİ olan SLM yöntemini kullanarak üretmişlerdir. Nihai tasarımın üretimi için titanyum alaşımlı TC4 tozu kullanmışlardır. Üretim için 15 ile 53 μm boyutları aralığında toz kullanmışlardır. Ürettikleri nihai braket tasarımını çekme testlerine tabi tutmuşlardır. Termo-mekanik yükler altındaki parçalar için TO ve Eİ'nin beraber kullanılmasının iyi bir araç olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 24. (a) Orijinal braket tasarımının deformasyon ve von-Mises değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının deformasyon ve von-Mises değerleri [85].

Mansor ve diğ. [86] yaptıkları çalışmada jet motoruna ait bir braket parçasının hafifletme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon işlemi için daha önce belirttikleri yük koşullarını ve Ti6Al4V malzeme özelliklerini kullanarak braket parçasını tasarımsal olarak optimize etmişlerdir. Orijinal braket parçasının, TO uygulanan tasarımın ve PolyNURBS tasarımının kütlelerini sırası ile 2,052 kg, 0,324 kg ve 1,007 kg olarak belirlemişlerdir. TO tasarımında %84 oranında hafifletme sağlamışlardır. PolyNURBS tasarımında ise %51 oranında hafifletme sağlamışlardır. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımları Şekil 25'te sunulmuştur. Yaptıkları çalışmada jet motoru braket parçasının orijinal, TO ve PolyNURBS tasarımlarında sırası ile 1,4, 1,1 ve 1,4 güvenlik faktörü değerleri elde etmişlerdir. Braket parçasının tasarımsal olarak optimize edilmesi, işlem sonrasında güvenlik faktörü değerini muhafaza edebilmesi ve tasarımsal olarak optimize edilen parçanın Eİ ile üretilmesinin mümkün olduğunu sonucuna varmışlardır.



Şekil 25. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı (b) Braket parçasının TO ile yenilenmiş tasarımı (c) Braket parçasının PolyNURBS ile yenilenmiş tasarımı [86].

Merulla ve diğ. [87] yaptıkları çalışmada otomobil motorunda montaj için kullanılan bir otomotiv parçasına TO uygulamışlardır ve parçanın kütlesini azaltmışlardır. Yaptıkları TO neticesinde parçanın kütlesini 2,2 kg'dan 1,52 kg'a yaklaşık %30 oranında düşürmüşlerdir. Parçada ihtiyaç duyulan sertlik ve mukavemet değerlerini karşılamak için yapıya kafesler ve duvarlar eklemişlerdir. Bunun sonucu olarak yapının kütlenin 1,71 kg olduğunu ve bu değerin orijinal parça tasarımına kıyasla yaklaşık %20 oranında daha hafif olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışma neticesinde TO ve Eİ uygulamalarının birbirleri ile bütünleşmiş bir şekilde uygulanmasının kütle azaltma çalışmalarında daha iyi olanaklar sunabileceğini belirtmişlerdir.

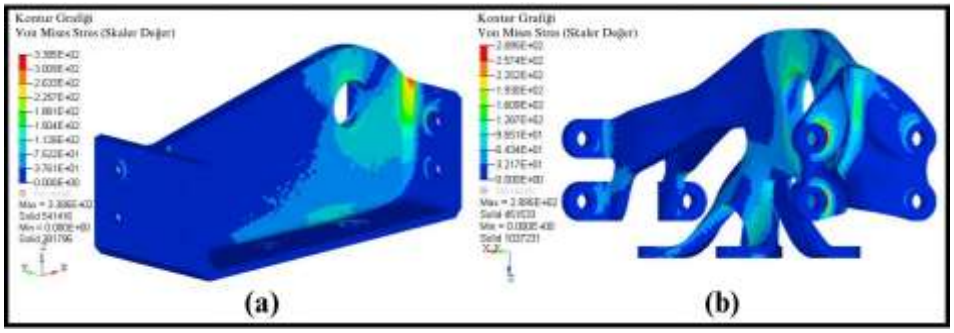
Gebisa ve diğ. [77] yaptıkları çalışmada jet motoruna ait bir braket parçasını TO ile hafifletmişlerdir. TO için Altair Hypemesh 14 Optistruct yazılımını kullanmışlardır. Ti6Al4V malzeme özelliklerini kullanarak optimizasyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Nihai ürün tasarımının sayısal testlerini ANSYS R17 yazılımı kullanarak yapmışlardır. Yeniledikleri tasarımı Eİ olan FDM yöntemi kullanarak üretmişlerdir. 0,72 kg kütle azaltarak orijinalinden %65 daha hafif bir yapı elde etmişlerdir. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımları Şekil 26'da sunulmuştur. Çalışmalar neticesinde TO uygulamasının kütle ve işlem enerjisini azaltma ve malzemeden tasarruf sağlama konularında güçlü bir yöntem olduğunu, TO ile tasarımı optimize edilen parçaların Eİ kullanılarak üretilmesi ile parçalarda hafifletme sağlanabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 26. (a) Braket parçasının orijinal tasarımı, (b) Braket parçasının yenilenmiş tasarımı [77].

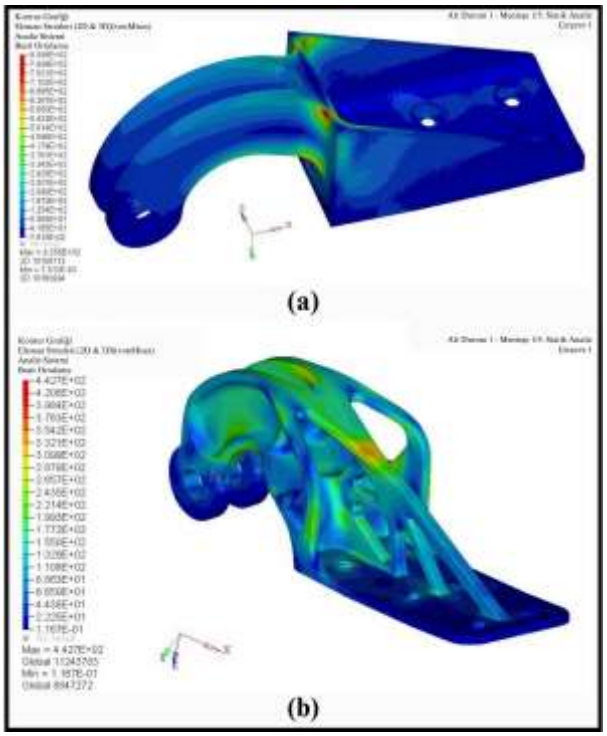
Walton ve Moztarzadeh [88] yaptıkları çalışmada bir süspansiyon parçasının TO ve Eİ kullanılarak hafifletme ve üretim işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları sayısal analizler sonucunda yapının maksimum von-Mises stres değerini 265 MPa ve güvenlik faktörü değerini 1,70 olarak belirlemişlerdir. Orijinal tasarımda 0,25 mm ve yenilenmiş tasarımda 0,32 mm maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir. Tasarımını yeniledikleri parçayı Ti6Al4V toz malzemesi kullanarak EBM yöntemi ile üretmişlerdir. Ti6Al4V ile üretmiş oldukları yenilenmiş tasarımın kütlesini 536 g, alüminyum malzemeli orijinal tasarımın kütlesini ise 832 g ölçmüşlerdir. Yenilenmiş tasarımın EBM yöntemi kullanılarak üretilmesi ile parçanın üretimi için gerekli olan 7,0 kg'lık ham madde ihtiyacının 1,0 kg'a düşürerek ham madde kullanımında %86 azalma sağlamışlardır. Parçanın üretimi için ihtiyaç duyulan ham maddenin azalmasına rağmen parçanın üretim maliyetinin arttığını belirtmişlerdir.

Seabra ve diğ. [89] yaptıkları çalışmada bir havacılık braketinin tasarımını TO kullanarak hafifletmişlerdir ve SLM yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Nihai ürün tasarımının doğrulanması için optimize edilmiş tasarımı sayısal testlere ve SLM yöntemi ile üreterek mekanik testlere tabi tutmuşlardır. Yaptıkları çalışma neticesinde yenilenmiş tasarımda orijinal tasarıma kıyasla yaklaşık %28 oranında azalma elde etmişlerdir. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımının sayısal analizleri Şekil 27'de sunulmuştur.



Şekil 27. (a) Orijinal braket tasarımının von-Mises değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının von-Mises değerleri [89].

Tomlin [90] yaptığı çalışmada uçak motor yuvasına ait bir menteşe braketinin TO ve Eİ kullanarak hafifletilmesi çalışmasını gerçekleştirmiştir. Orijinal braket parçasında 836 MPa maksimum gerilme ve 701 MPa yorulma değerleri elde etmiştir. Yaptığı ilk optimizasyon neticesinde kütleyi 310 g, maksimum gerilme değerini 365 MPa ve maksimum yorulma değerini 320 MPa olarak belirlemiştir. Yaklaşık %64 hafifletme sağlayarak orijinal parçanın kütlesini 918 g'dan tasarımı yenileyerek 326 g'a düşürmüştür. Yaptığı gerilme analizi ile nihai parçada 310 MPa maksimum gerilme elde etmiştir. Çalışmaya ait orijinal ve yenilenmiş braket tasarımının sayısal analizleri Şekil 28'de sunulmuştur.



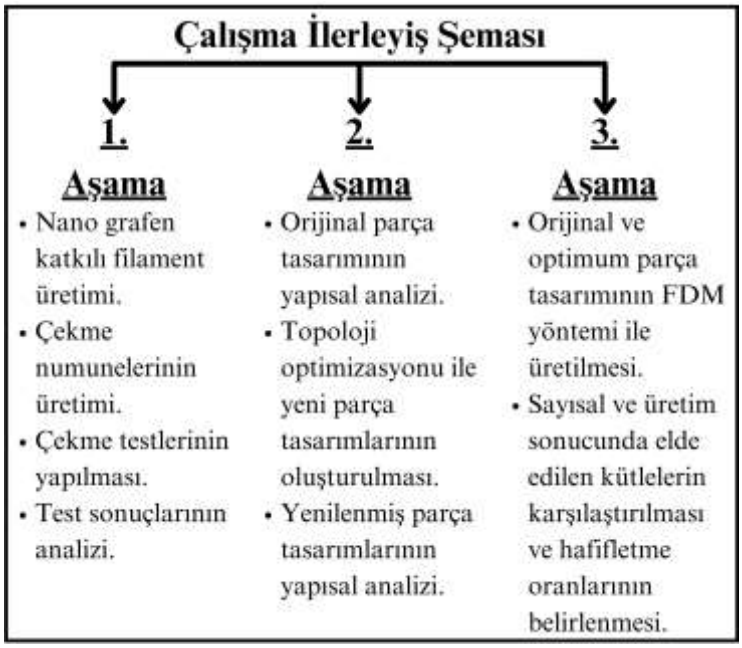
Şekil 28. (a) Orijinal braket tasarımının von-Mises değerleri, (b) Yenilenmiş braket tasarımının von-Mises değerleri [90].

Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde; TO kullanılarak orijinalinden daha hafif ve mekanik gereksinimleri karşılayabilen parça tasarımlarının oluşturulduğu ve parça tasarımlarının farklı Eİ kullanılarak üretildiği gözlenmiştir. Literatürde incelenen mevcut çalışmalarda orijinal parça tasarımlarının hafifletilmesi işlemi yapısal bütünlük bozuluncaya kadar değişen hafifletme oranlarında değil belirli hafifletme oranlarında gerçekleştirilmiştir. İncelenilen çalışmalarda parça tasarımlarına farklı büyüklüklerde mesh atamaları yapılmıştır fakat mesh kalitesinin değerlendirilebilmesi için gerekli olan veriler sunulmamıştır. Bu çalışmada, hafifletilmesi sağlanan parça tasarımına yapısal bütünlük bozuncaya kadar %10'luk değer artışları ile %10 ve %80 aralığında TO uygulanmıştır. Elde edilen her bir parça tasarımının mesh kalitesinin belirlenebilmesi için tasarımların element kalitesi (element quality), en-boy oranı (aspect ratio) ve çarpıklık (skewness) değerleri incelenmiştir.

3. BÖLÜM

MALZEME VE MATERYAL

Bu çalışmada Eİ'nde kullanılan malzemelerin ve yöntemlerin kullanım alanlarının genişletilebilmesi için nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Ek olarak çalışmada Cessna uçak türlerinde kullanılan Continental motorlara ait motor montaj ve alternatör destek braketi olarak görev yapan 642266 numaralı bağlantı parçasının hafifletilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada parçanın orijinal ve optimum tasarımının eklemeli imalat yöntemleri (Eİ) kullanılarak üretilebilirliğinin kanıtlanabilmesi ve değerlendirilebilmesi için polilaktik asit (PLA) filament kullanılarak eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi ile üretilmiştir. Orijinal ve optimum parça tasarımlarının üretimi ile sayısal ve üretim sonucu elde edilen hafifletme oranları karşılaştırılmıştır. Çalışmaya ait ilerleyiş şeması Şekil 29'da sunulmuştur.



Şekil 29. Çalışmanın ilerleyiş şeması.

3.1. Nano Grafen Katkılı PLA Filamentlerin Üretimi

Nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Nano grafen katkısız PLA filament olarak Filameon marka şeffaf PLA + filament kullanılmıştır. Şeffaf PLA + filamente ait teknik özellikler Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. Şeffaf PLA + filamentin genel özellikleri.

Özellikler	**Değer**
Çap (mm)	1,75–2,85
Filament uzunluğu	335±5
Tolerans (mm)	±0,03–±0,04
Yoğunluk (g/cm^3)	1.24
Nozul sıcaklığı (°C)	190–230
Akma sınırındaki gerilme direnci (MPa)	60
Uzama gerinimi (%)	6
Eğme dayanımı (MPa)	83
Rockwell sertliği (R ölçeği)	105
Sıcaklık dayanımı (°C)	55

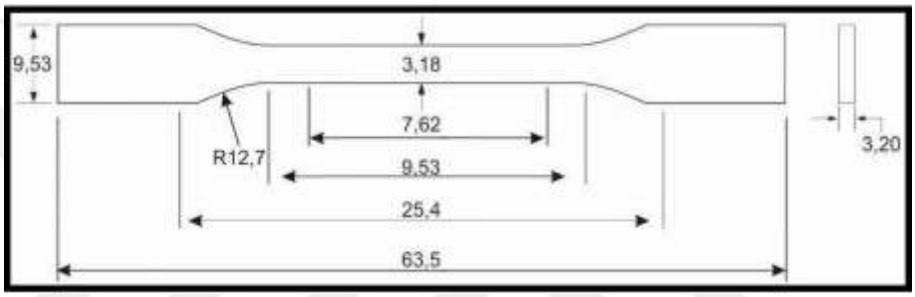
PLA filamente farklı oranlarda nano grafen karıştırılmıştır. Karıştırma 1 kg PLA filamente ağırlıkça yapılmıştır. Ağırlıkça %0,5 (5 g), %1,0 (10 g), %1,5 (15 g), %2,0 (20 g) oranlarında nano grafen karıştırılarak nano grafen katkılı filamentler üretilmiştir. Nano grafenin PLA filamente karıştırılması işlemi mekanik karıştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim işlemi Filameon firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Nano grafene ait teknik özellikler Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Nano grafenin genel özellikleri.

Özellikler	**Değer**
Saflık değeri (%)	99,9
Kalınlık (nm)	3
Çap (µm)	1,5
Spesifik yüzey alanı (m^2/g)	800
İletkenlik (s/m)	1500-1980

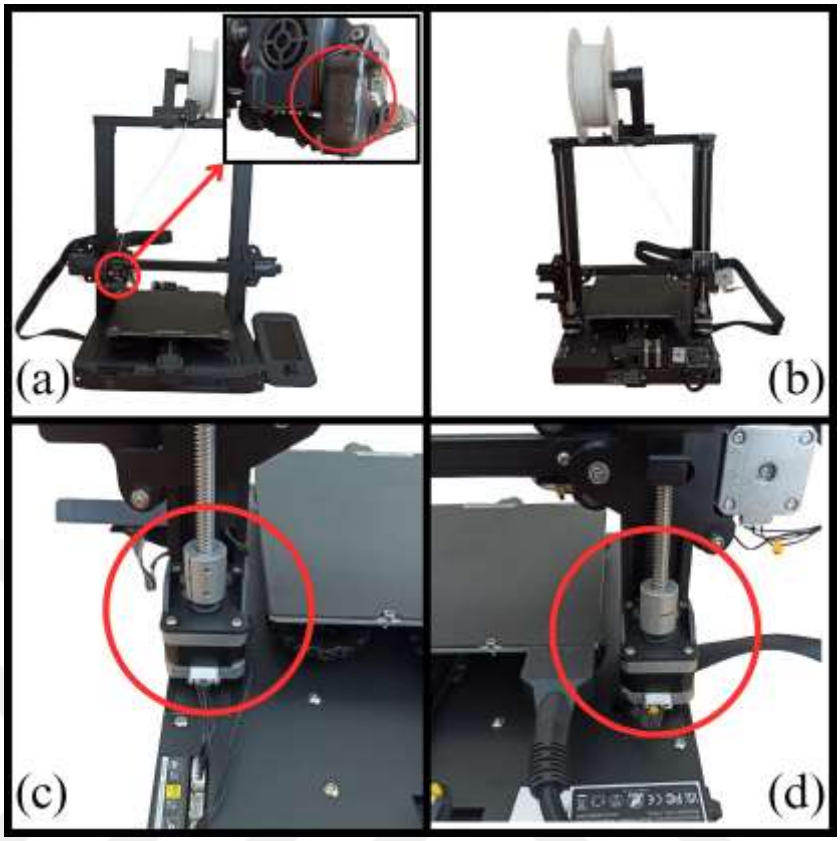
3.2. Çekme Testleri

Deney numunelerinin üretimi Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) D638 (Tip V) çekme standartlarında gerçekleştirilmiştir. ASTM D638 çekme standardı ile polimer malzemelerin çekme dayanımı, kopma uzaması ve Young modülü gibi özellikleri ölçülebilmektedir [91]. Deney numuneleri Solidworks programı aracılığıyla modellenmiştir ve standard triangle language (STL) formatına dönüştürülmüştür. Deney numunesine ait ölçüler Şekil 30'da sunulmuştur.



Şekil 30. Deney numunelerinin ölçüleri.

Deney numunelerinin üretiminde Creality Ender-3 S1 makinesi kullanılmıştır. Creality Ender-3 S1 makinesi çift z eksene sahip bir FDM makinesidir. Creality Ender-3 S1 makinesinin önden, arkadan görünümü ve çift z eksenleri Şekil 31'de gösterilmiştir. Creality Ender-3 S1 makinesi otomatik kalibrasyon yapabilecek donanıma sahiptir. Creality Ender-3 S1 makinesinin otomatik kalibrasyon parçası Şekil 31'de gösterilmiştir. Tabla ve nozul sıcaklığı özellikleri deneylerde kullanılacak filament türlerini kullanabilecek aralıklardadır. Creality Ender-3 S1 makinesine ait özellikler Tablo 7'de belirtilmiştir.



Şekil 31. Creality Ender-3 S1 makinesinin (a) önden görünümü ve otomatik kalibrasyon parçası, (b) arkadan görünümü, (c) ve (d) çift z eksen parçaları.

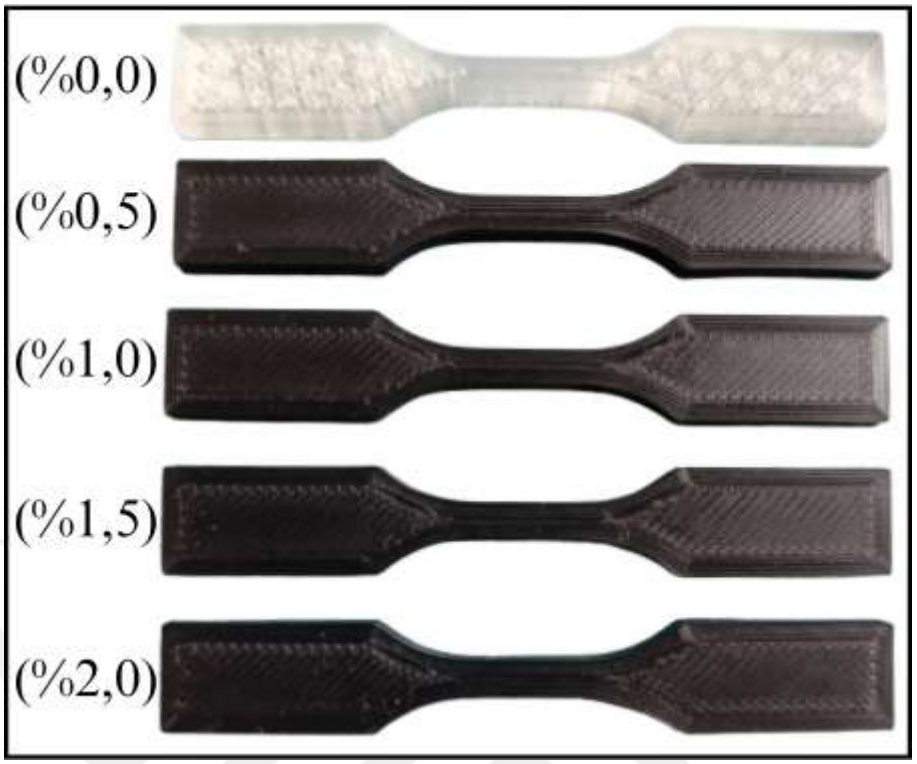
Tablo 7. Creality Ender-3 S1 makinesinin genel özellikleri.

Özellikler	**Değer**
Kalıp teknolojisi	FDM
Baskı boyutu (mm)	220x220x270
Desteklenen filamentler	PLA, TPU, PETG, ABS ve HIPS
Baskı katman kalınlığı (mm)	0,1-0,35
Baskı hızı (mm/s)	Max 150
Nozul çapı (mm)	0,4
Baskı hassasiyeti (mm)	±0,1
Maksimum nozul sıcaklığı (°C)	260
Nozul sayısı	1
Z eksen mil sayısı	2
Otomatik kalibrasyon (bltouch)	Var
Tabla türü	Manyetik
Maksimum ısı yatağı sıcaklığı (°C)	100
Filament çapı (mm)	1,75
Ekstrüder dişli oranı	1:3,5
Nominal güç (W)	350
Nominal gerilim (V)	115-230
Desteklenen dosya formatları	STL, OBJ ve AMF

Nano grafen katkısının ve katkı oranlarının PLA filamentin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi için çekme numunelerinin üretim parametreleri sabit tutulmuştur. Sabit üretim parametreleri kullanılarak katkısız ve nano grafen katkılı PLA filamentlerle üçer adet çekme numunesi üretilmiştir. Her bir deney numunesinin üretimi için Creality Ender-3 S1 makinesinde kullanılan parametreler Tablo 8'de yer almaktadır. Creality Ender-3 S1 makinesinde üretilen deney numunelerine ait görseller Şekil 32'de sunulmuştur.

Tablo 8. Üretim için kullanılan sabit parametreler.

Özellikler	**Değer**
Katman yüksekliği (mm)	0,12
Duvar kalınlığı (mm)	1,2
Duvar hattı sayısı	4
Üst/Alt kalınlık (mm)	0,8
Üst/Alt katmanlar	4
Dolgu yoğunluğu (%)	50
Dolgu hattı mesafesi (mm)	2,4
Dolgu şekli	Üçlü altıgen
Yazdırma sıcaklığı (°C)	205
Yapı levha sıcaklığı(°C)	60
Yazdırma hızı (mm/s)	50
Dolgu hızı (mm/s)	50
Duvar hızı (mm/s)	25
Fan hızı (%)	100
Geri çekme mesafesi (mm)	0,8
Geri çekme hızı (mm/s)	40
Oluşturma desteği	Etkin
Destek yapısı	Normal
Destek yerleştirme	Her bölüm
Destek yoğunluğu (%)	15
Destek çıkıntı açısı (°)	50
Destek z mesafesi (mm)	0,24
Yapı levhası türü	Kenar
Kenar hattı sayısı	30



Şekil 32. Creality Ender-3 S1 makinesi ile üretilen deney numuneleri.

Farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filament ile üretilen çekme numuneleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan SHIMADZU marka AG-X 50 kN model çekme test cihazında çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testleri her bir numune için 10 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Gao ve diğ. [91] yaptıkları çalışmada nano grafen katkısının PLA'nın mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir, katkısız ve nano grafen katkılı PLA filamentler ile çekme testleri yapmışlardır. Katkısız ve nano grafen katkılı PLA filamentlerin çekme testlerini 10 mm/dk çekme hızında gerçekleştirmişlerdir. Çekme testinin gerçekleştirildiği cihaza ilişkin genel özellikler Tablo 9'da belirtilmiştir. Cihaz tüm hızlarda maksimum hız uygulayabilme, stroke, force ve stres kontrollü test yapabilme özellikleri mevcuttur. ISO 7500/1, ASTM E4 ve DIN51221 standartlarına göre 50 kN ile 50 N aralığında $\pm$0,1% hassasiyetli okuma aralığına sahiptir. SIE 560 otomatik extensiyometre %0,5 veya $\pm$2,5 mikron hassasiyetindedir. SHIMADZU AG-X 50 kN çekme test cihazı Şekil 33'te verilmiştir.

Tablo 9. SHIMADZU AG-X 50 kN çekme test cihazının genel özellikleri.

Özellikler	**Değer**
Test alanı (mm)	500x1060
Test hızı aralığı (mm/dk)	0,0005-1000
Test hızı hassasiyeti (%)	±0,1
Veri okuma sıcaklığı max. (ms)	0,2



Şekil 33. SHIMADZU AG-X 50 kN çekme test cihazı.

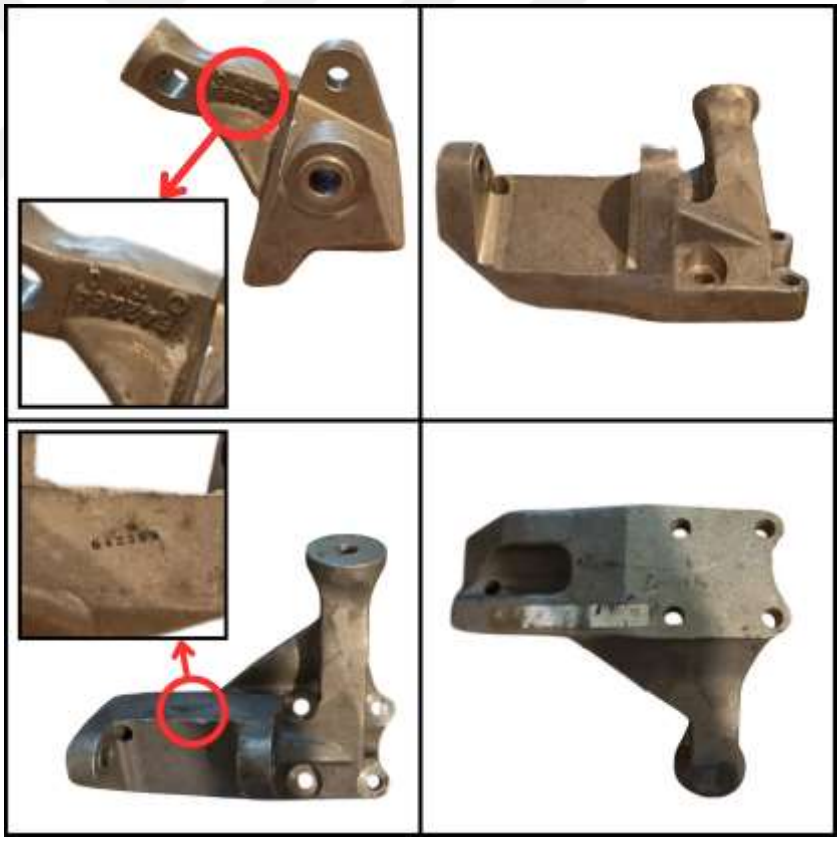
3.3. Topoloji Optimizasyonu

Hava araçlarında motor montaj ve alternatör destek braketi olarak görev yapan bir havacılık parçasının modellemesi yapılmıştır. Parçanın üretim malzemesi ve maruz kaldığı yükler belirlenmiştir. Orijinal parça tasarımına mesh ataması yapılarak belirlenen sınır şartları altında yapısal analiz uygulanmıştır. Belirli hafifletme oranlarında (%10,

%20, %30, %40, %50, %60, %70 ve %80) ön tasarımlar elde edilmiştir. Elde edilen ön tasarımlar düzenlenmiştir ve yenilenen parça tasarımlarının her birine mesh ataması yapılarak belirlenen sınır şartları altında yapısal analiz uygulanmıştır.

3.3.1. Parça Seçimi ve Parçanın Modellenmesi

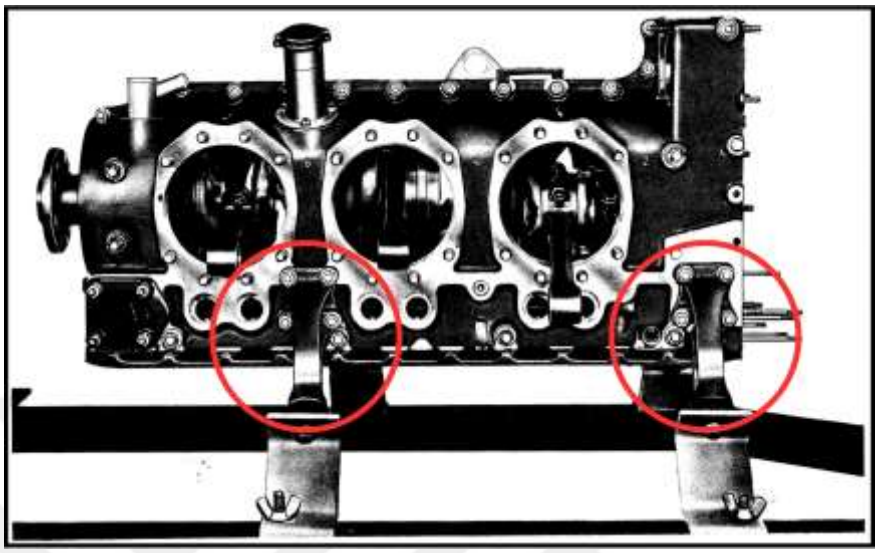
Çalışmada hafifletilen parça olarak piston motorlu uçaklarda kullanılan Continental motorlara ait 642266 numaralı parça seçilmiştir. 642266 numaralı parça motorda montaj ve alternatör destek braketi olarak görev yapmaktadır. Yapısal ve kritik öneme sahip bir parça olması, motor montaj ve destek braket olarak iki görevi beraber idame ettirmesi, yapıda hafifletmeye uygun bölümlerin ve hafifletme ile elde edilebilecek kütle tasarrufunun fazla olması sebepleri ile 642266 numaralı parça çalışmada hafifletilmek için seçilmiştir. Parçaya ait görseller Şekil 34'te sunulmuştur.



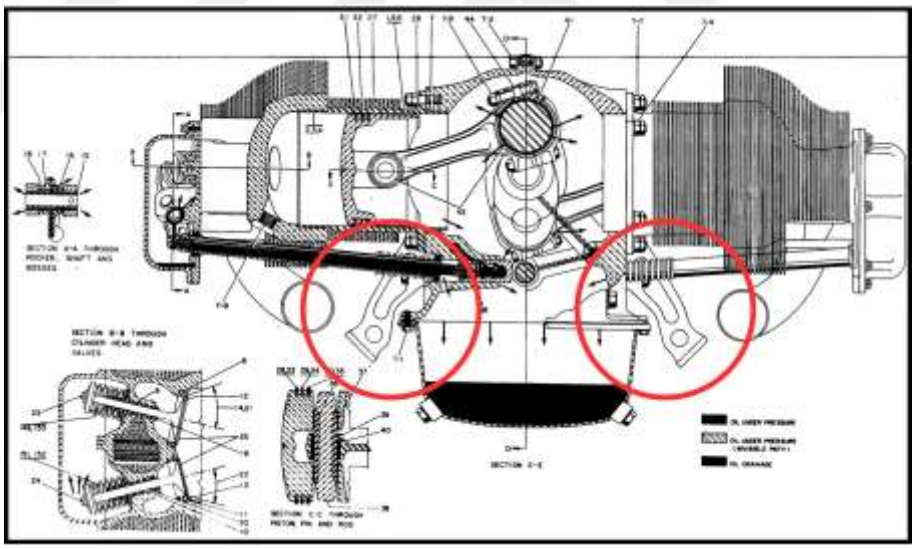
Şekil 34. 642266 numaralı parça.

Parça O470U, IO520D, F, L ve TSIO520M, P, R, T Continental motor türlerinde kullanılmaktadır. Parçanın motor montaj bölümünün O470 ve IO470 tip motorlar üzerinde gösterimi Şekil 35'te sunulmuştur. Şekil 36'da Continental O470 serisi

motorlara ait teknik resim ve motor montaj parçasının teknik resim gösterimi yer almaktadır.

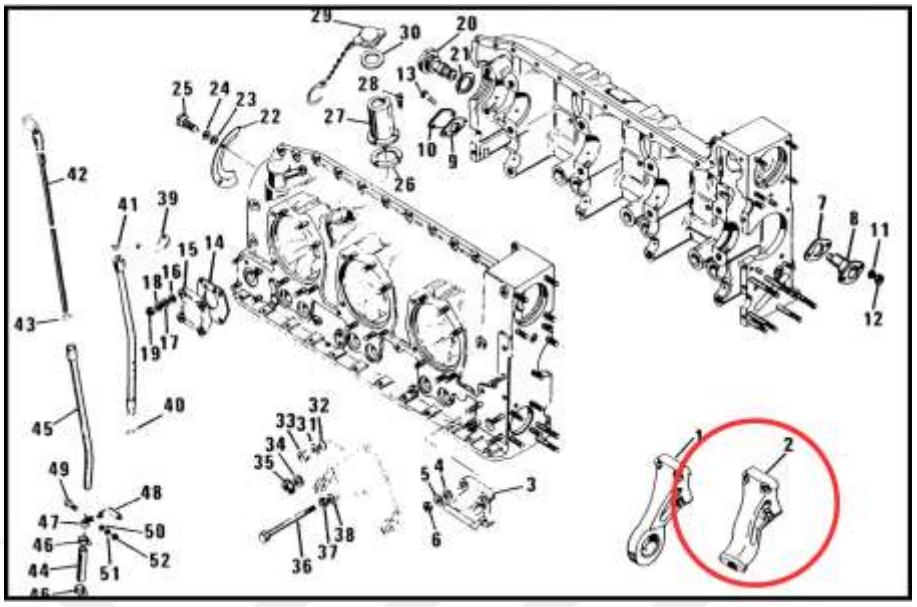


Şekil 35. 642266 numaralı parçanın O470 ve IO470 motor tiplerinde gösterimi [92].



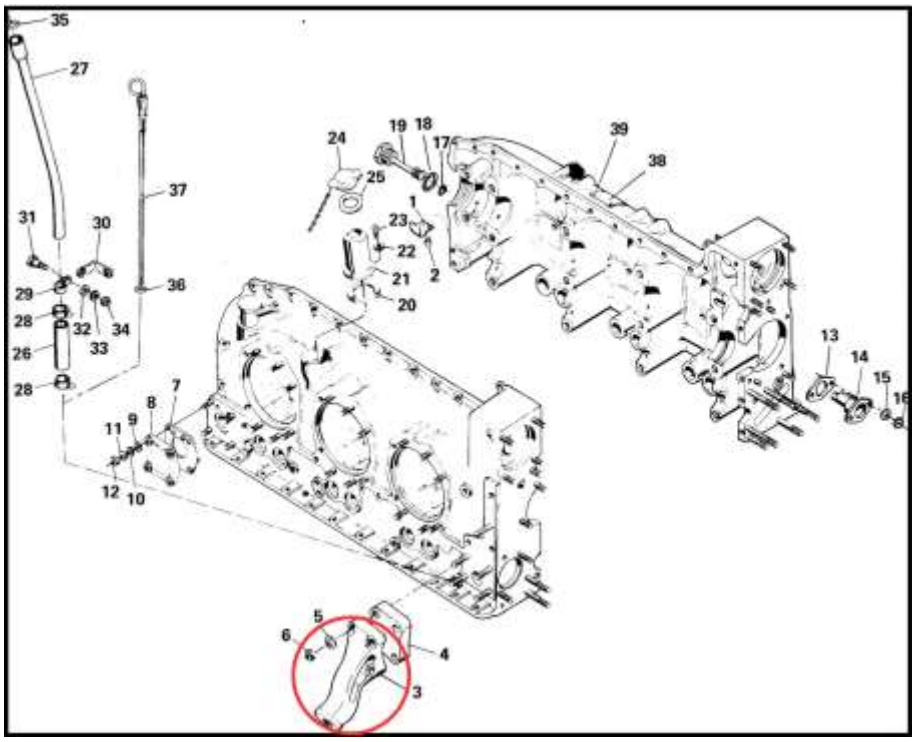
Şekil 36. O470 serisi motorlara ait teknik resim [93].

O470A, B, E, G, J, K, L, M, P, R, S, U motor tiplerinde 642266 numaralı parçanın motor montaj bölümünün teknik resmi Şekil 37'de sunulmuştur. 642266 numaralı parçanın motor montaj bölümü teknik çizimde 2 numara ile gösterilmektedir.



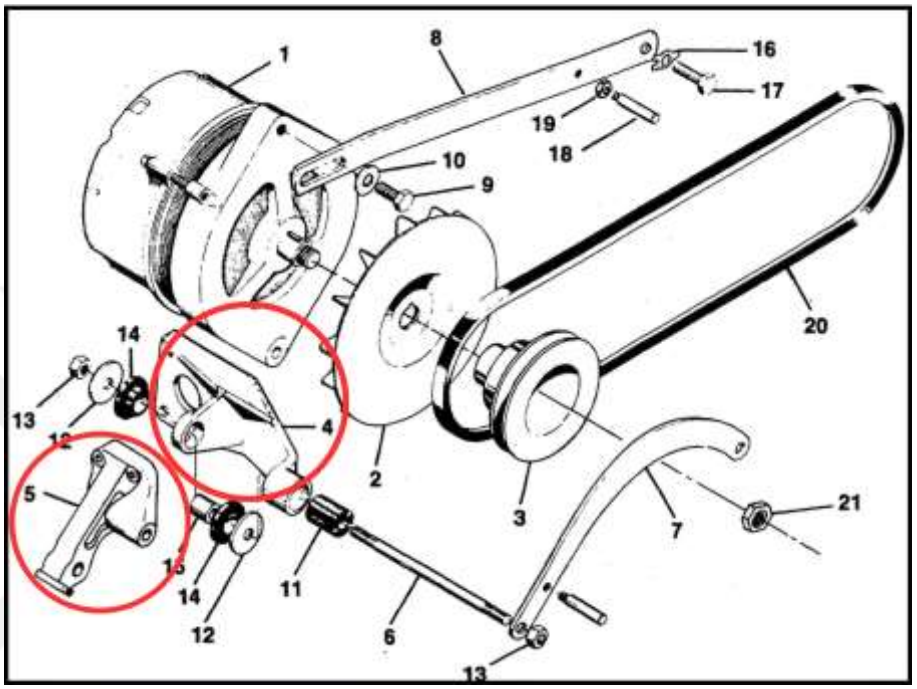
Şekil 37. O470A, B, E, G, J, K, L, M, P, R, S, U motor tiplerine ait crankcase teknik resmi [94].

TSIO520C, G, H, M, P, R motor tiplerinde 642266 numaralı parçanın motor montaj bölümünün teknik resmi Şekil 38'de sunulmuştur. 642266 numaralı parçanın motor montaj bölümü teknik çizimde 3 numara ile gösterilmektedir.



Şekil 38. TSIO520C, G, H, M, P, R motor tiplerine ait crankcase teknik resmi [95].

642266 numaralı parçanın alternatör destek braketi görevinde kullanımına ilişkin gösterim Şekil 39'da sunulmuştur. Şekilde 1 numaralı parça alternatör, 5 numaralı parça 642266 numaralı parçanın motor montaj bölümü ve 4 numaralı parça 642266 numaralı parçanın alternatör destek braketi bölümüne alternatif oluşturan bir parçadır.



Şekil 39. O470A, B, E, G, J, K, L, M, P, R, S, U motor tiplerine ait alternatör teknik resmi [96].

642272 numaralı parçanın maruz kaldığı yüklerin hesaplanabilmesi için Continental motor türlerinin kütleleri belirlenmiştir. Continental 470 serisi motorların kuru kütleleri Tablo 10'da sunulmuştur. Continental 470 serisi motorların en düşük kuru kütlesi 191.5 kg ve en yüksek kuru kütlesi 211.1 kg olarak belirtilmiştir.

Tablo 10. Continental 470 sersi motorların kuru kütleleri [97].

Model	**Kuru Kütle (kg)**	**Model**	**Kuru Kütle (kg)**
IO-470-L	211,1	O-470-R	193,6
IO-470-N	207	O-470-S	194,7
IO-470-U	203,2	O-470-U	191,5
IO-470-VO	203,8		

Continental 520 serisi motorların kuru kütleleri Tablo 11'de sunulmuştur. Continental 520 serisi motorların en düşük kuru kütlesi 184.2 kg ve en yüksek kuru kütlesi 259.4 kg olarak belirtilmiştir.

Tablo 11. Continental 520 sersi motorların kuru kütleleri [98].

Model	**Kuru Kütle (kg)**	**Model**	**Kuru Kütle (kg)**
IO-520-A	208,9	TSIO-520-E	215,6
IO-520-BB	209,9	TSIO-520-EB	214,9
IO-520-CB, F	206	TSIO-520-G	204,9
IO-520-D	207,5	TSIO-520-H	207,5
IO-520-E	212	TSIO-520-M, P, R	209,2
IO-520-J, L	207	TSIO-520-NB	223
IO-520-MB	205,4	TSIO-520-T	226
L/TSIO-520-AE	184	TSIO-520-UB	236,3
TSIO-520-AF	243,8	TSIO-520-VB	220,7
TSIO-520-BB	213,8	TSIO-520-WB	253,7
TSIO-520-BE	251,8	GTSIO-520-H	247,5
TSIO-520-C	217,3	GTSIO-520-L	259,4
TSIO-520-CE	238	GTSIO-520-M	255,3

642266 numaralı parça 470 ve 520 serisi motor tiplerinde kullanıldığı için parçanın maruz kaldığı ağırlığın hesaplamasında motor kütlesi olarak en düşük ve en yüksek motor kütlelerinin ortalaması alınmıştır. 470 ve 520 motor serileri içerisinde en düşük kuru kütle 184,2 kg ve en yüksek kuru kütle 259,4 kg olarak belirtildiği için bu iki kütlenin ortalaması alınmıştır.

184,2+259,4=443,6 kg

443,6/2=221,8 kg (3.1)

642266 numaralı parçanın maruz kaldığı motor ağırlığı çalışma kapsamında motor kütlesi 221,8 kg referans alınarak hesaplanmıştır. 642266 numaralı parçanın motor montaj bölümü motorda dört adet bulunmaktadır ve motoru dört noktadan uçağa sabitlemektedir. Bu sebeple motor ağırlığı dörde bölünerek 642266 numaralı parçanın maruz kaldığı motor ağırlığı belirlenmiştir. Hesaplamada yerçekimi ivmesi 9,80665 m/s^2 olarak alınmıştır. Motor montaj bölümünün maruz kaldığı ağırlık hesaplaması;

221,8x9,80665=2175,11497 N

2175,11497/4=543,7787425 N (3.2)

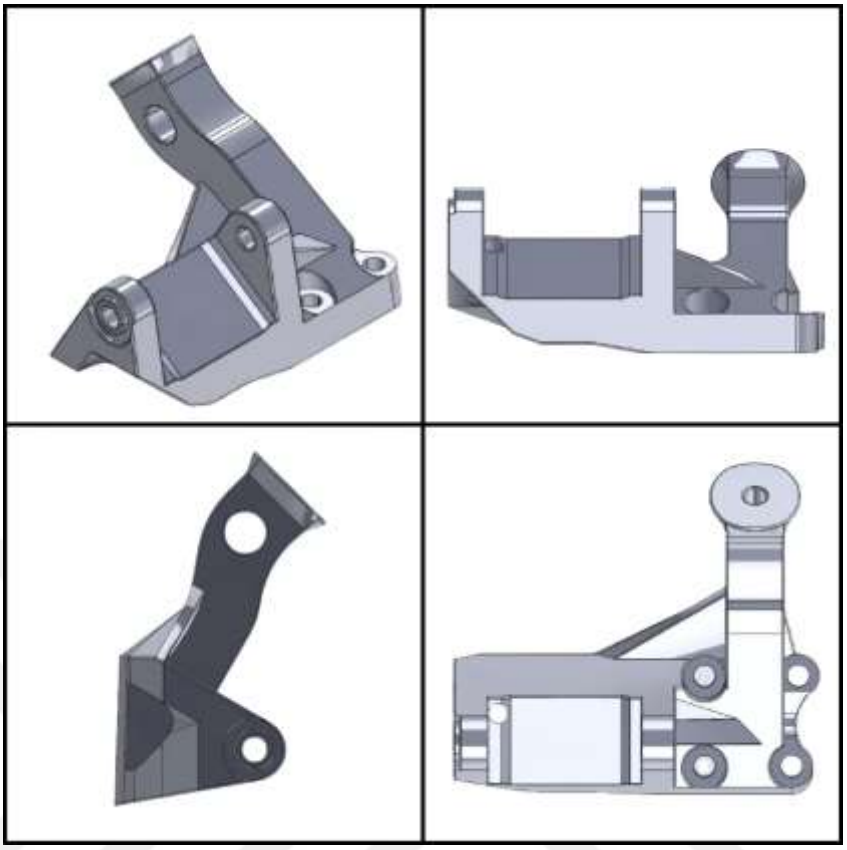
Hesaplamalar sonucunda 642266 numaralı parçanın motor montaj bölümünün maruz kaldığı ağırlık 543,7787425 N olarak belirlenmiştir. 642266 numaralı parçanın maruz kaldığı motor ağırlığı çalışma kapsamında 544 N olarak kullanılmıştır.

Alternatörlerin standart bir kütlesinin olmaması sebebi ile 642266 numaralı parçanın alternatör destek braketi bölümünün maruz kaldığı ağırlığın hesaplanmasında, ortalama bir alternatör kütlesi olarak 3 kg referans alınarak alternatörün ağırlığı hesaplanmıştır. Hesaplamada yerçekimi ivmesi 9,80665 m/s^2 olarak alınmıştır. Alternatör destek braketi bölümünün maruz kaldığı ağırlık hesaplaması;

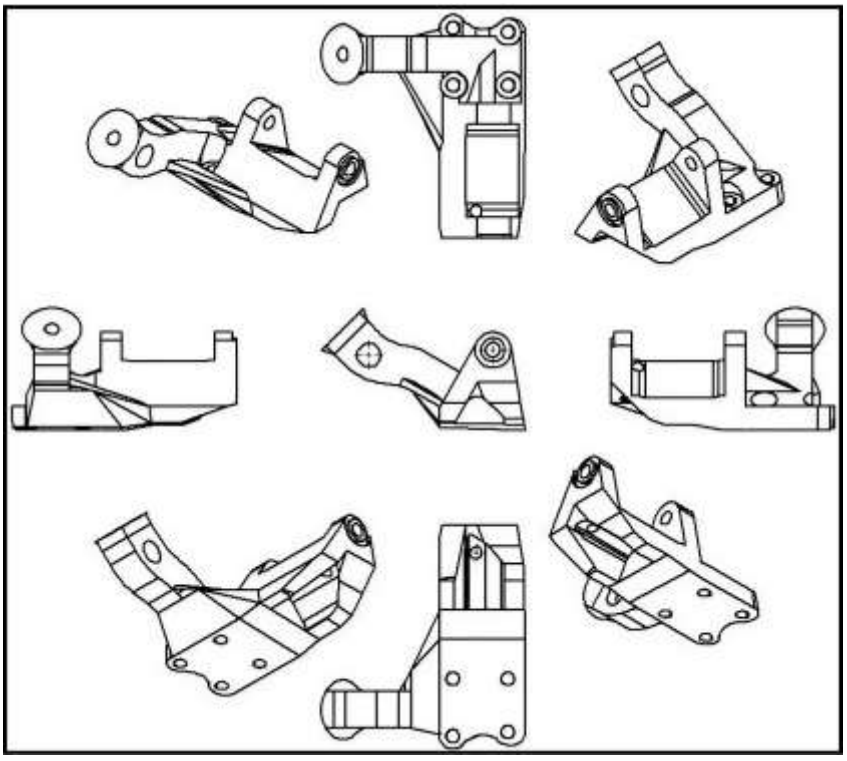
3x9,80665=29,41995 N (3.3)

Hesaplamalar sonucunda 642266 numaralı parçanın alternatör destek braketi bölümünün maruz kaldığı ağırlık 29,41995 N olarak belirlenmiştir. 642266 numaralı parçanın maruz kaldığı alternatör ağırlığı çalışma kapsamında 30 N olarak kullanılmıştır.

Hafifletilmek için seçilen Cessna uçaklarda kullanılan Continental motorlara ait 642266 numaralı parça Solidwork programı kullanılarak modellenmiştir. Parçanın 3D modellenmesi 1/1 ölçülerde yapılmıştır. Solidworks programı ile modellenen parça Şekil 40'ta gösterilmiştir. Parçanın çizimi gösterimi Şekil 41'de sunulmuştur.



Şekil 40. 642266 numaralı parçanın Solidworks görselleri.

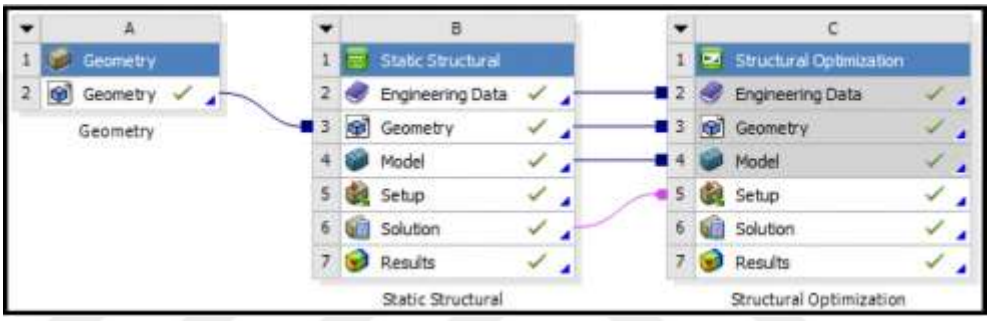


Şekil 41. 642266 numaralı parçanın çizim gösterimi.

3.3.2. Orijinal Parça Tasarımı

ANSYS Workbench 2022 R2 kullanılarak orijinal parça tasarımı üzerinde yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz uygulaması için ilk olarak Solidworks programında modellemesi yapılan orijinal parça tasarımının ANSYS Workbench 2022 R2'ye aktarılması sağlanmıştır. Parça tasarımının ANSYS Workbench 2022 R2 içerisindeki geometri tanımlaması Şekil 42'de "A" olarak gösterilmektedir.

ANSYS Workbench 2022 R2'de geometri tanımlamasına yapısal analiz şeması bağlanmıştır. Yapısal analiz şeması Şekil 42'de "B" olarak gösterilmektedir.



Şekil 42. ANSYS Workbench 2022 R2'ye ait ilerleyiş şeması.

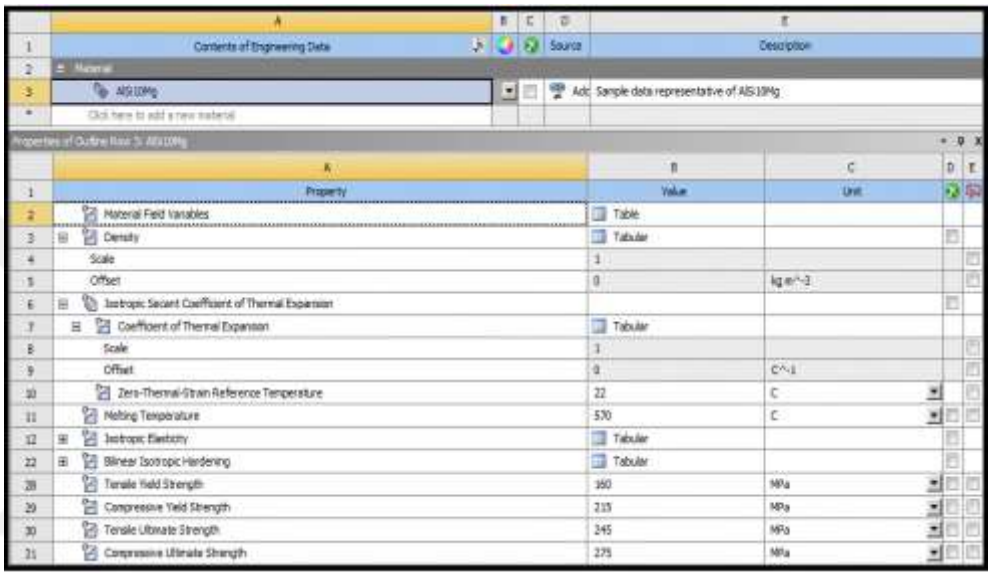
Yapısal analiz uygulamasında parçaya tanımlanan malzeme, analiz çıktısını doğrudan etkileyen bir parametredir. ANSYS Workbench 2022 R2'de varsayılan malzeme tanımlaması yapısal çelik olarak yer almaktadır. Dalga boyu dağılımlı x-ışını floresan spektrometresi (WD/XRF) kullanılarak seçilen parçanın üretildiği malzeme AlSi10Mg olarak belirlenmiştir. ANSYS Workbench 2022 R2'de AlSi10Mg malzeme tanımlaması Tablo 13'te belirtilen mekanik özellikler ile yapılmıştır. Malzeme tanımlamasının ANSYS Workbench 2022 R2 içerisindeki gösterimi Şekil 43'te gösterilmiştir. AlSi10Mg malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 12'de; malzemenin mekanik özellikleri Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 12. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	**Al**	**Si**	**Fe**	**Pb**	**Mn**	**Mg**	**Ni**	**Zn**	**Sn**	**Ti**
Oran (%)	Kalan	9,92	0,137	0,004	0,004	0,291	0,004	0,001	0,003	0,006

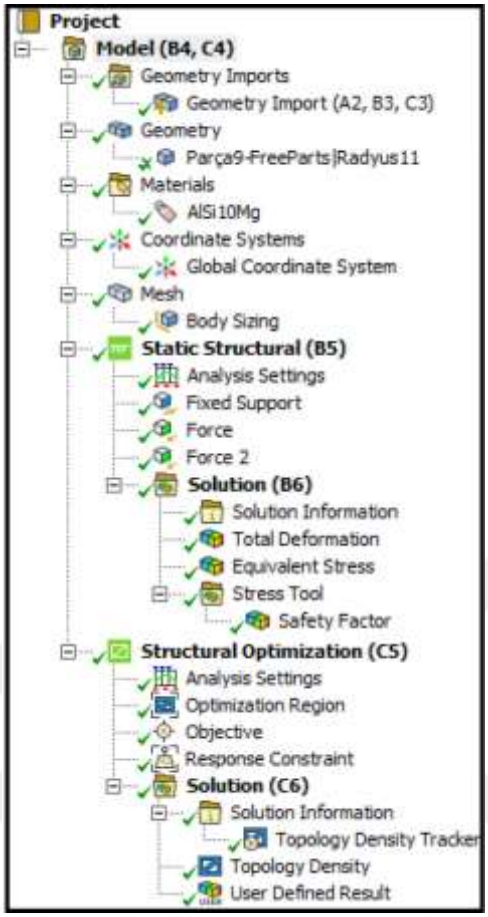
Tablo 13. AlSi10Mg alaşımının mekanik özellikleri.

Yoğunluk (g/Cm3)	**Ergime Sıcaklığı (°C)**	**Çekme Akma Dayanımı (MPa)**	**Basınç Akma Dayanımı (MPa)**	**Çekme Nihai Mukavemeti (MPa)**	**Basınç Nihai Mukavemeti (MPa)**	**Uzama (%)**	**Sertlik (HB)**
2.68	570	160	215	245	275	3	70



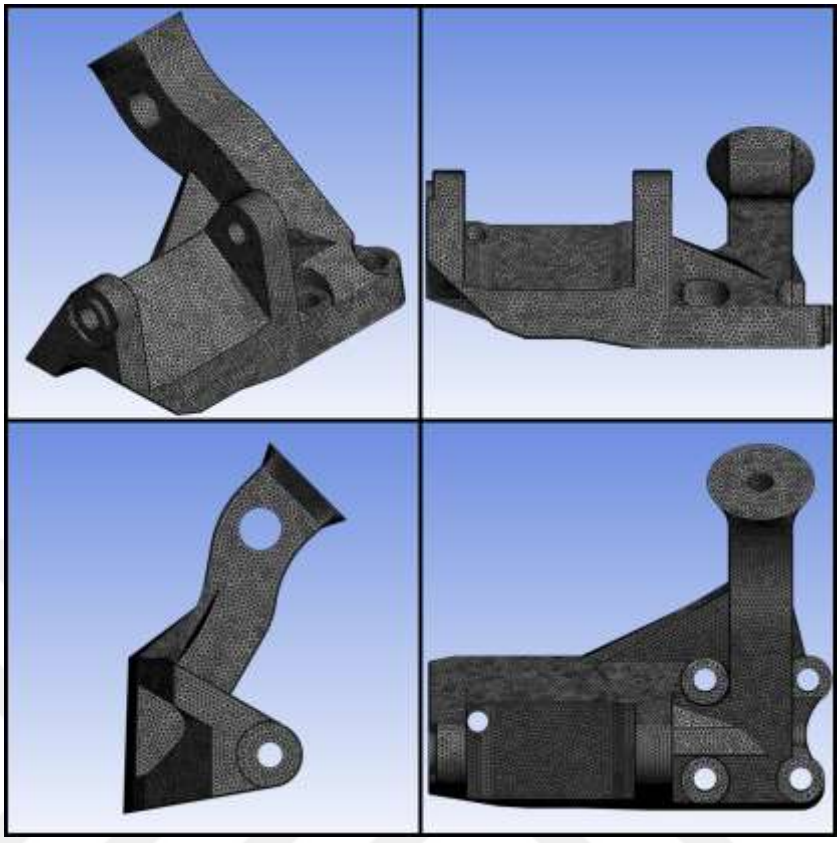
Şekil 43. ANSYS Workbench 2022 R2'de AlSi10Mg malzemesinin tanımlanması.

Yapılan tanımlamaların ardından yapısal analizin gerçekleştirilebilmesi için ANSYS Workbench Mechanical kullanılmıştır. ANSYS Workbench Mechanical'a ait ilerleyiş şeması Şekil 44'te sunulmuştur.



Şekil 44. ANSYS Workbench Mechanical'a ait ilerleyiş şeması.

Geometri ve yapısal analiz tanımlanan çalışmada sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi parçadan bütüne gitme prensibini kullanan bir yöntemdir. Yöntemde sonlu eleman, iki veya üç boyutlu yapıların bir parçasını oluşturmaktadır [99]. Sonlu elemanlar yönteminde mesh ataması işlemi orijinal tasarımın tamamına mesh büyüklüğü 2 mm olarak uygulanmıştır. Mesh ataması sonucunda parçada 812950 düğüm ve 576488 eleman sayılı bir yapı oluşturulmuştur. Mesh yapısına ait düğüm ve eleman sayısı Tablo 14'te sunulmuştur. Mesh atamasının parça üzerinde sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 45'te gösterilmiştir.

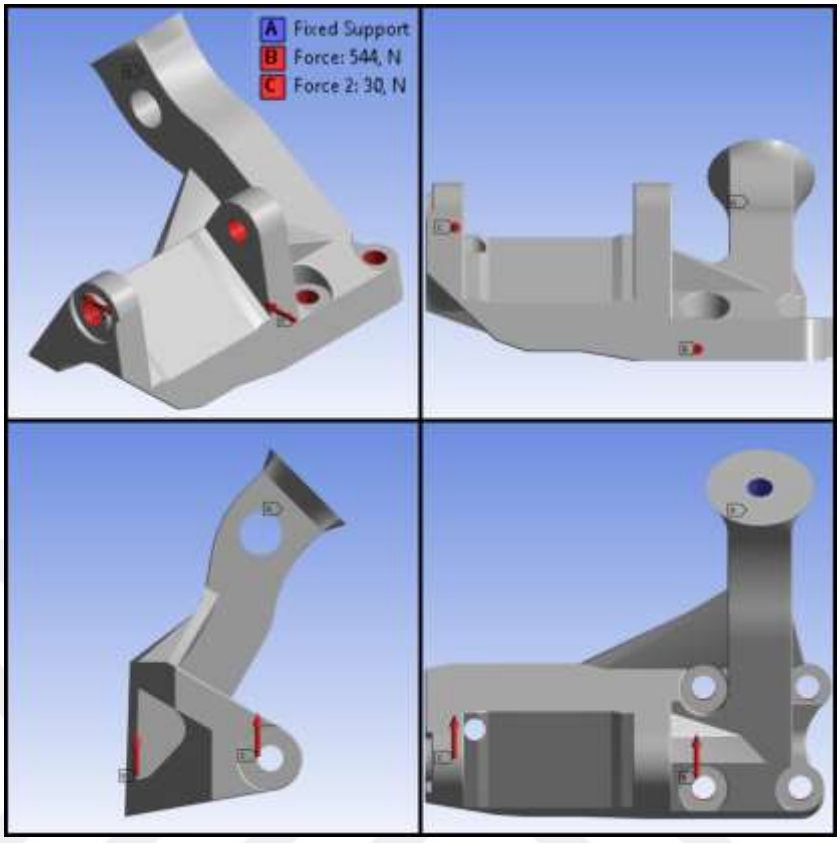


Şekil 45. Orijinal tasarıma ait sonlu elemanlar ağ yapısı.

Tablo 14. Orijinal parça üzerinde oluşan mesh yapısının düğüm ve eleman sayıları.

Düğüm sayısı	812950
Eleman sayısı	576488

Çalışmada sınır şartları belirlenerek yapısal analiz uygulanmıştır. Sınır şartlarının parça üzerinde gösterimi Şekil 46'da sunulmuştur. Orijinal parça tasarımı Şekil 46'da gösterilen A noktasından sabitlenmiştir. Parçanın maruz kaldığı yükler 544 N ve 30 N olarak belirlenmiştir. Orijinal parça tasarımı B noktasından Şekil 46'da gösterildiği yönde 544 N, C noktasından Şekil 46'da gösterildiği yönde 30 N yüke maruz bırakılmıştır. Sınır şartlarının tanımlanmasının ardından toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü yapısal analiz çıktısı olarak tanımlanmıştır.

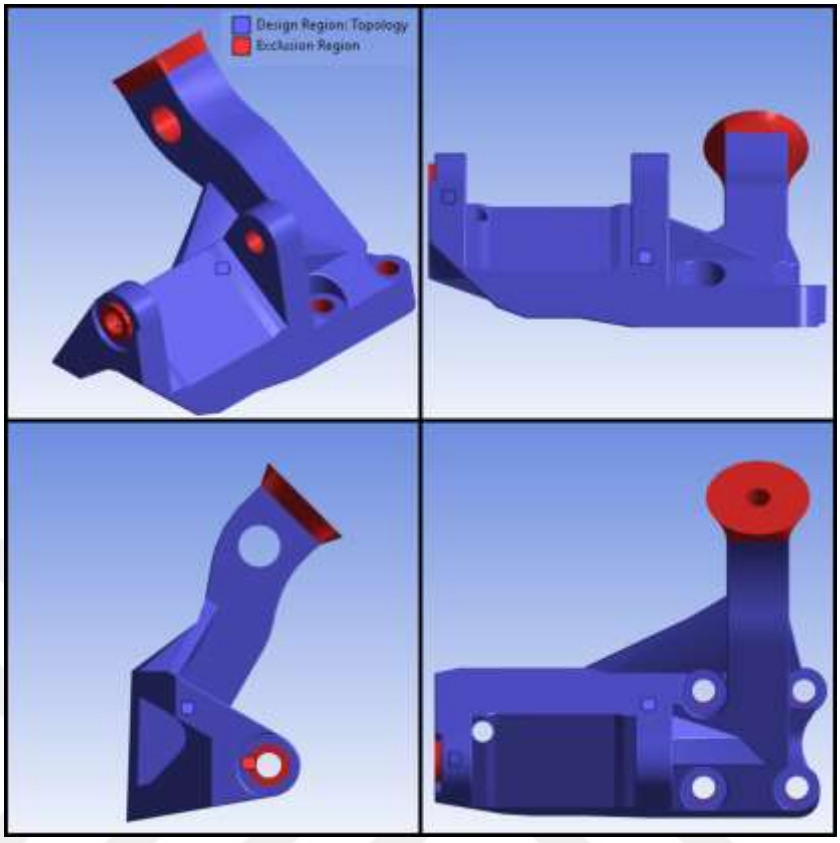


Şekil 46. Sınır şartlarının parça üzerinde farklı açılardan gösterimi.

ANSYS Workbench 2022 R2'de geometri ve yapısal analiz tanımlaması yapılan şemaya TO tanımlanmıştır. TO şeması Şekil 42'de "C" olarak gösterilmektedir.

TO'nun gerçekleştirilebilmesi için ANSYS Workbench Mechanical kullanılmıştır. ANSYS Workbench Mechanical'a ait ilerleyiş şeması Şekil 44'te sunulmuştur.

TO uygulamasında parçada bağlantı bölgeleri optimizasyondan muaf tutulmuştur. Şekil 47'de optimizasyon bölgeleri mavi renk ile optimizasyondan muaf bölgeler kırmızı renk ile gösterilmektedir.

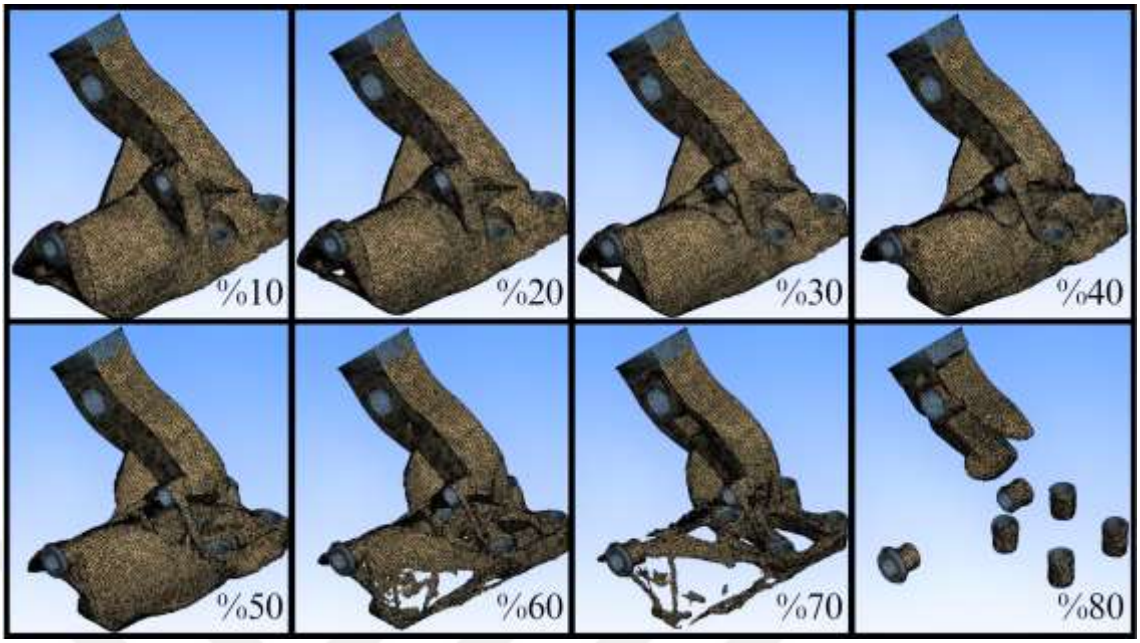


Şekil 47. Optimizasyon bölgelerinin parça üzerinde farklı açılardan gösterimi.

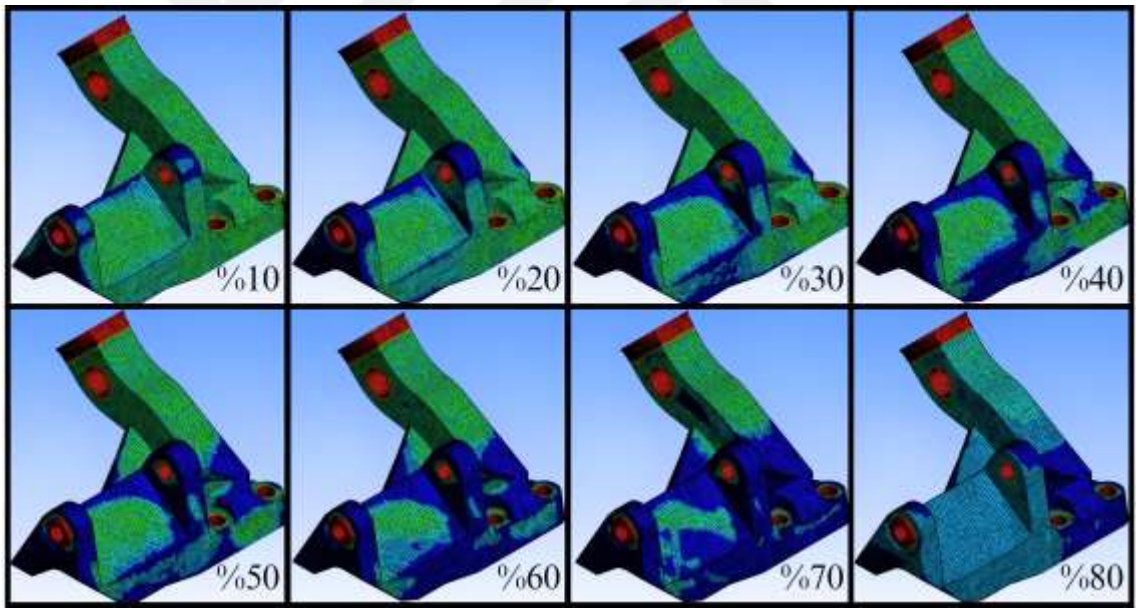
Optimum parça tasarımının belirlenebilmesi için farklı hafifletme oranları ile TO gerçekleştirilmiştir. Parçaya sırası ile %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70 ve %80 oranlarda hafifletme tanımlamaları yapılmıştır.

3.3.3. Yenilenmiş Parça Tasarımı

ANSYS Workbench Mechanical'da orijinal parçanın hacmi 5,1467e+005 (mm^3) ve kütlesi 1,3742 kg olarak belirlenmiştir. Orijinal ve yenilenmiş parça tasarımının kütle ve hacim değerlerine ilişkin bilgiler Tablo 15'te sunulmuştur. ANSYS Workbench Mechanical kullanılarak orijinal parça tasarımına uygulanan TO sonucunda farlı hafifletme oranlarında yeni parça tasarımları oluşturulmuştur. Şekil 48'de yenilenmiş parça tasarımlarının ön tasarımları yer almaktadır. TO sonucunda parçalardan çıkarılan bölgeler Şekil 49'da mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 48. TO sonucunda parçaların ön tasarımları.



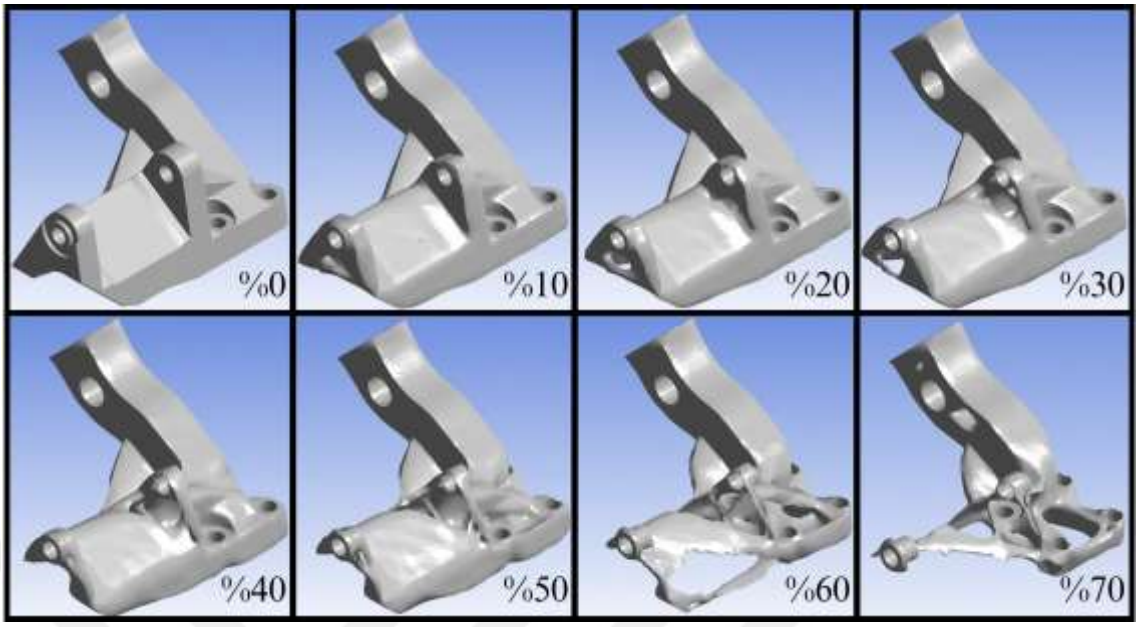
Şekil 49. TO sonucunda parçalardan çıkarılacak bölgeler.

%80'lik hafifletme oranı ile TO uygulanan parçanın yapısal bütünlüğü programın sunduğu ön tasarımda tamamen bozulmuştur. Optimizasyon sonucunda parçada yalnızca optimizasyondan muaf tutulan bölgeler kalmıştır. Bu sebeple hafifletme çalışması %80'lik oranda sonlandırılmıştır.

Tablo 15. Orijinal ve yenilenmiş tasarımlara ait final hacim ve kütle değerleri.

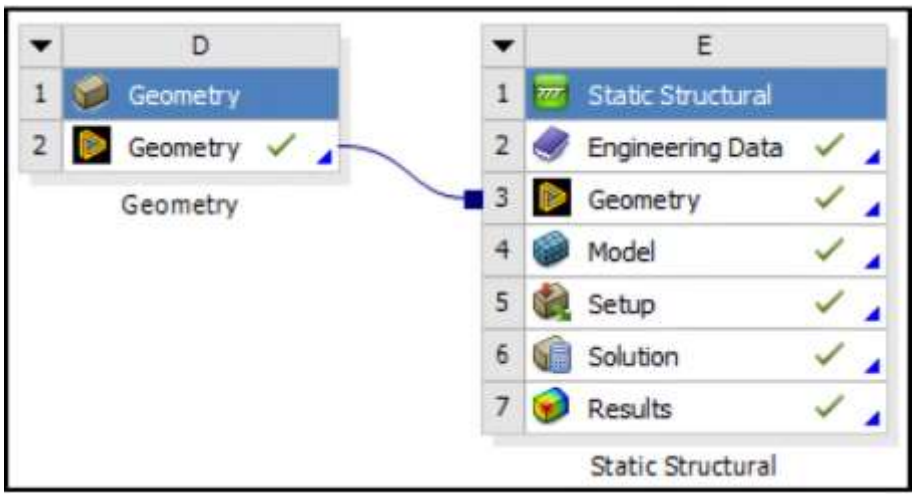
Hafifletme Oranları (%)	**Final Hacim (mm^3)**	**Final Kütle (kg)**
0	5,1467e+005	1,3742
10	4,6225e+005	1,2342
20	4,1439e+005	1,1064
30	3,631e+005	0,96948
40	3,1295e+005	0,83557
50	2,6361e+005	0,70385
60	2,1326e+005	0,5694
70	1,6332e+005	0,43607
80	1,3742e+005	0,14137

ANSYS Workbench Mechanical kullanılarak oluşturulan yenilenmiş parça tasarımları STL formatında dışarı aktarılmıştır ve yenilenmiş tasarımların yapısal analizlerinin yapılabilmesi için ANSYS Workbench Spaceclaim ile tasarımdaki kusurlar giderilmiştir. Tasarımı düzenlenen yenilenmiş parça tasarımları ANSYS Workbench Spaceclaim'de katı modele dönüştürülmüştür. Şekil 50'de ANSYS Workbench Spaceclaim'de kusurları giderilen ve düzenlenen yenilenmiş parça tasarımlarının ve orijinal parça tasarımının ANSYS Workbench Mechanical'da gösterimi yer almaktadır.



Şekil 50. Orijinal ve yenilenen parça tasarımlarının ANSYS Workbench Mechanical'da gösterimi.

ANSYS Workbench 2022 R2 kullanılarak yenilenmiş parça tasarımları üzerinde yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. ANSYS Workbench Spaceclaim kullanılarak kusurları giderilen ve düzenlenen yenilenmiş parça tasarımları ANSYS Workbench 2022 R2 içerisinde geometri tanımlaması olarak kullanılmıştır. Geometri tanımlaması Şekil 51'de "D" olarak gösterilmektedir.

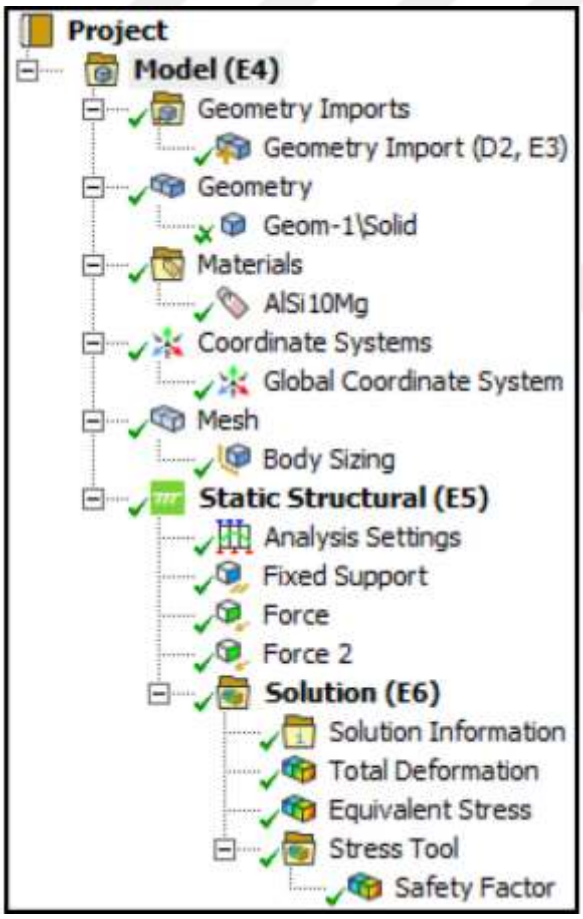


Şekil 51. ANSYS Workbench 2022 R2'ye ait ilerleyiş şeması.

ANSYS Workbench 2022 R2'de geometri tanımlamasına yapısal analiz şeması bağlanmıştır. Yapısal analiz şeması Şekil 51'de "E" olarak gösterilmektedir. Orijinal parça tasarımının yapısal analizinde tanımlanan AlSi10Mg malzemesi yenilenmiş

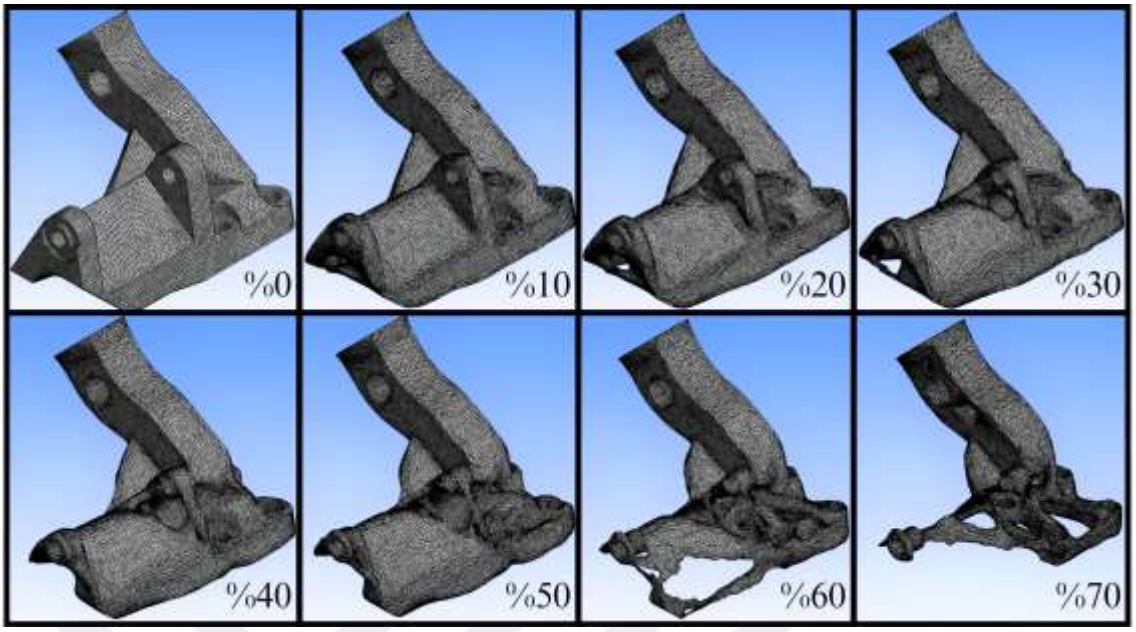
parçaların her birinin yapısal analizi için de tanımlanmıştır. Malzeme tanımlamasının ANSYS Workbench 2022 R2 içerisindeki gösterimi Şekil 43'te gösterilmiştir. Yenilenmiş parça tasarımlarının her birinin yapısal analizi için tanımlanan AlSi10Mg malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 13'te verilmiştir. AlSi10Mg malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 12'de yer almaktadır. ANSYS Workbench 2022 R2'de AlSi10Mg malzeme tanımlaması Tablo 13'te belirtilen mekanik özellikler ile yapılmıştır.

Yapılan tanımlamaların ardından yapısal analizin gerçekleştirilebilmesi için ANSYS Workbench Mechanical kullanılmıştır. ANSYS Workbench Mechanical'a ait ilerleyiş şeması Şekil 52'de sunulmuştur.



Şekil 52. ANSYS Workbench Mechanical'a ait ilerleyiş şeması.

Geometri ve yapısal analiz tanımlanan çalışmada FEM kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde mesh ataması işlemi yenilenmiş tasarımların tamamına mesh büyüklüğü 2 mm olarak uygulanmıştır. Yenilenmiş parça tasarımlarının mesh yapısına ait düğüm ve eleman sayıları Tablo 16'da sunulmuştur. Yenilenmiş parça tasarımları üzerinde sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 53'te gösterilmiştir.



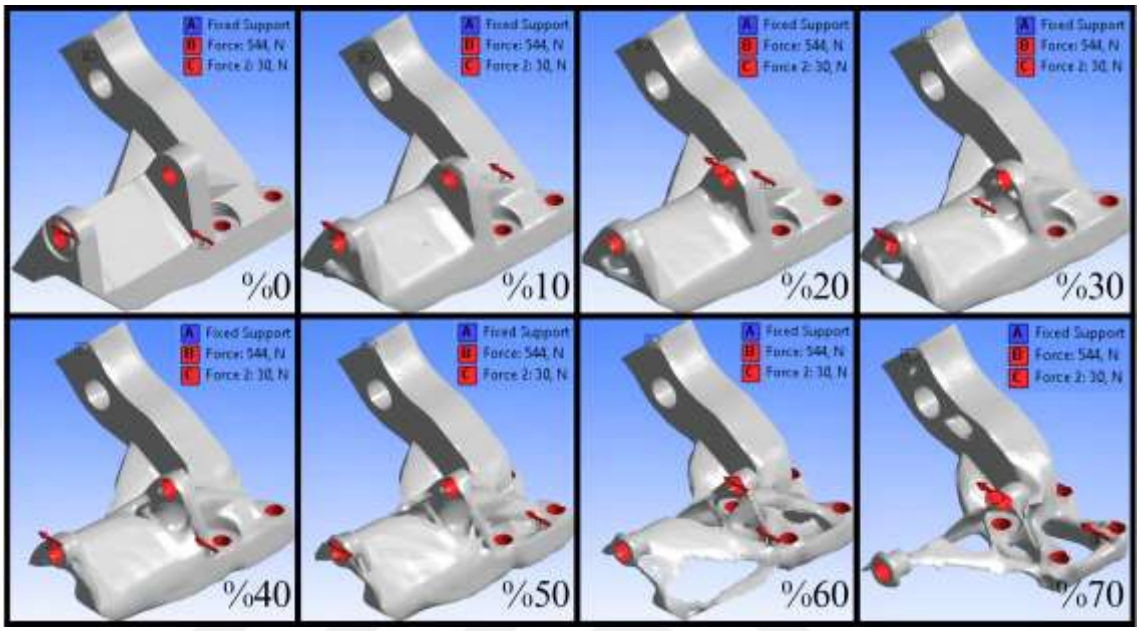
Şekil 53. Parça tasarımlarına ait sonlu elemanlar ağ yapısı.

Tablo 16. Yenilenmiş parça üzerinde oluşan mesh yapısının düğüm ve eleman sayıları.

Hafifletme Oranları (%)	**Düğüm Sayısı**	**Eleman Sayısı**
10	850991	577673
20	792813	532622
30	729502	483421
40	659521	431431
50	588612	378647
60	489751	310613
70	396856	249218

Sınır şartları belirlenerek yenilenmiş parça tasarımlarına yapısal analiz uygulanmıştır. Her bir hafifletme oranı için aynı noktalardan sabitleme ve yüklemeler yapılmıştır. Yenilenmiş parça tasarımlarının her biri orijinal parça tasarımının maruz kaldığı yüklerle özdeş (544 N ve 30 N) yüklere maruz bırakılmıştır. Şekil 54'te sınır şartlarının parça tasarımları üzerinde gösterimi sunulmuştur. Yenilenen parça tasarımları Şekil 54'te gösterilen A noktasından sabitlenmiştir. Yenilenen parça tasarımları B noktasından Şekil 54'te gösterildiği yönde 544 N, C noktasından Şekil 54'te gösterildiği yönde 30 N yüke

maruz bırakılmıştır. Sınır şartlarının tanımlanmasının ardından toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü yapısal analiz çıktısı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 54. Sınır şartlarının parça tasarımları üzerinde gösterimi.

4. BÖLÜM

BULGULAR

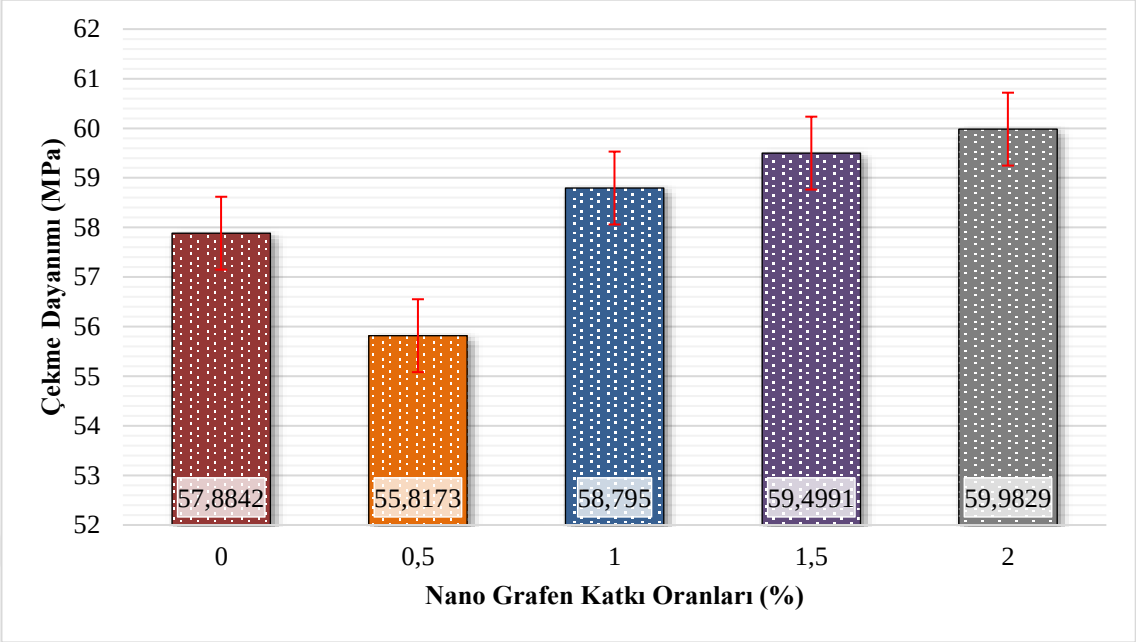
Çalışma kapsamında katkısız ve nano grafen katkılı polilaktik asit (PLA) filament kullanılarak eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi ile çekme numuneleri üretilmiştir. Çalışmada nano grafenin PLA filamentin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir ve değerlendirilmiştir. Orijinal ve yenilenmiş parça tasarımları üzerinde yapısal analiz uygulanmıştır. Her bir tasarım mesh kalitesi, toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü değerleri açısından incelenmiştir ve değerlendirilmiştir. Orijinal ve optimum tasarımının eklemeli imalat yöntemleri (Eİ) kullanılarak üretilebilirliğinin kanıtlanabilmesi ve sayısal hafifletme oranı ile üretim sonucu elde edilen hafifletme oranının karşılaştırılabilmesi için iki parça tasarımı da FDM yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

4.1. Çekme Testi

Nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için katkısız ve 1 kg PLA filamente ağırlıkça karıştırılan %0, %0,5 (5 g), %1,0 (10 g), %1,5 (15 g) ve %2,0 (20 g) katkı oranlarına sahip nano grafen katkılı PLA filamentler ile çekme numuneleri üretilmiştir. Üretilen çekme numuneleri çekme testine tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen çekme testi sonucunda deney numunelerinin çekme dayanımı, kopma uzaması ve Young modülü değerleri incelenmiştir.

4.1.1. Çekme Dayanımı

Çalışmanın bu bölümünde %0, %0,5, %1,0, %1,5, ve %2,0 nano grafen katkı oranlarına sahip PLA filamentler kullanılarak gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerleri yer almaktadır.



Şekil 55. Farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin çekme dayanımı sonuçları.

Tablo 17. Çekme dayanımının yüzdelik değişimleri.

Grafen Katkı Oranı (%)	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**
Çekme Dayanımı Değişimleri (%)	-3,57	+1,57	+2,79	+3,63

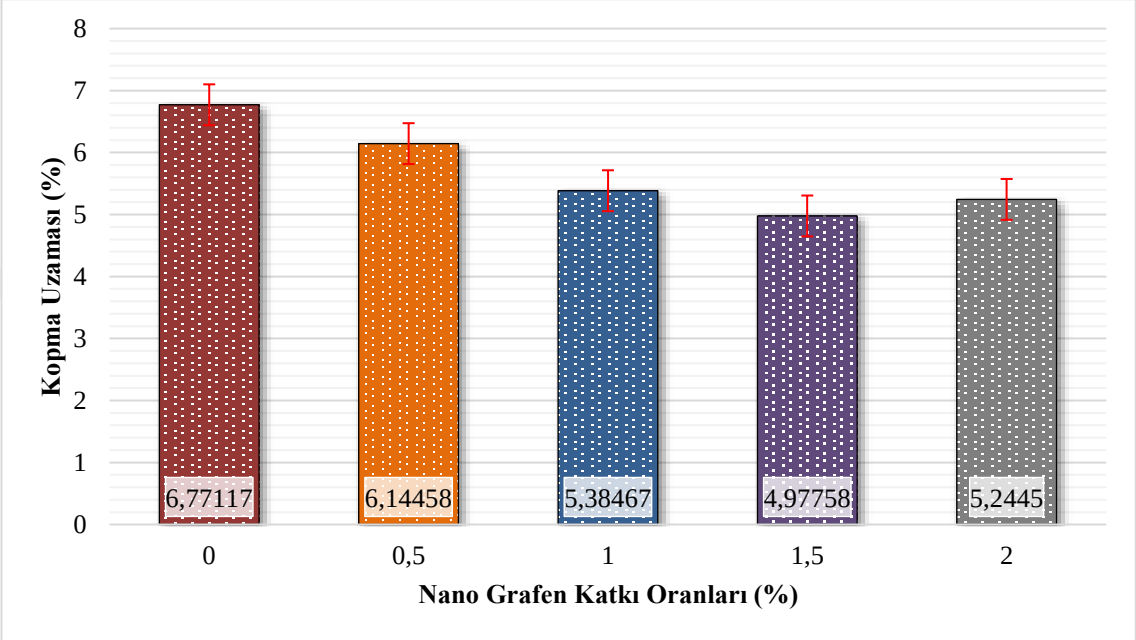
Farklı nano grafen katkı oranlı PLA filamentler ile gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda çekme dayanımı değerleri incelendiğinde nano grafen katkısız PLA filament 57,8842 MPa değerinde çekme dayanımı göstermiştir. %0,5 nano grafen katkılı PLA filamentte ise 55,8173 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Nano grafen katkısız PLA filamente kıyasla %0,5 nano grafen katkılı PLA filament %3,57 daha düşük çekme dayanımı göstermiştir. Nano grafen katkısı ile çekme dayanımında gözlemlenen bu düşüşün sebebi malzeme dağılımının düzensizliği olduğu düşünülmektedir. Ghani ve diğ. [100] yaptıkları çalışmada beş farklı nano grafen oranına (%0, %0,1, %0,3, %0,5 ve %1,0) sahip PLA filamentlerin çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada %0,5 ve %1,0 nano grafen katkılı PLA filamentlerde %0,3 nano grafen katkılı PLA filamente kıyasla daha düşük çekme dayanımı elde etmişelerdir. Ayrıca %1,0 nano grafen katkılı PLA filamentte katkısız PLA filamente kıyasla da daha düşük çekme

dayanımı elde etmişlerdir. Grafen katkısı ile gerçekleşen düşüşün sebebini malzeme dağılımının düzensizliği ve yapıda agregasyon olması ile açıklamışlardır.

%1,0, %1,5 ve %2,0 nano grafen katkılı PLA filamentler sırası ile, 58,795 MPa, 59,4991 MPa ve 59,9829 MPa değerlerinde çekme dayanımı göstermişlerdir. Şekil 55'te farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin çekme dayanımı değerleri yer almaktadır. %1,0, %1,5 ve %2,0 nano grafen katkı oranları PLA filamentin çekme dayanımı özelliğine olumlu bir etki göstermiştir ve bu katkı oranlarında katkısız PLA filamente kıyasla sırası ile %1,57, %2,79 ve %3,63 daha iyi çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Tablo 17'de grafen katkısı ile çekme dayanımının yüzdelik değişimleri yer almaktadır. Belirli oranlarda nano grafen katkısının çekme dayanımını artırmasının sebebi nano grafen katkısının mikro çatlakların oluşumunu ve ilerlemesini geciktirmesi, gerilim dağılımını homojenleştirmesi ve PLA matris ile güçlü bir ara yüzey oluşturması olduğu düşünülmektedir. Ghani ve diğ. [100] katkısız ve dört farklı nano grafen katkı oranına (%0,1, %0,3, %0,5 ve %1,0) sahip PLA filamentlerin çekme dayanımını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada %0,1, %0,3 ve %0,5 nano grafen katkılı PLA filamentlerde katkısız PLA filamente kıyasla daha iyi çekme dayanımı elde etmişlerdir. Belirli oranlarda nano grafen katkısının çekme dayanımını arttırmasının sebebini eşit dağılan nano grafenin PLA matris ile güçlü bir ara yüzey oluşturmasıyla açıklamışlardır. Gao ve diğ. [91] iki farklı tanecik boyutunda ve dört faklı nano grafen katkı oranına (%0, %5, %7 ve %10) sahip PLA filamentin çekme dayanımı özelliğini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada küçük ve büyük tanecik boyutuna sahip her iki PLA filamenti için de %5 ve %7 grafen katkılı PLA filamentlerin katkısız PLA filamente kıyasla daha iyi çekme dayanımı gösterdiğini belirlemişlerdir. Belirli nano grafen katkı oranlarında nano grafen katkısının çekme dayanımını iyileştirmesinin sebebini nano grafenin gerilme transferini daha iyi sağlaması olarak açıklamışlardır. Diğer bir çalışmada Chieng ve diğ. [101] altı faklı nano grafen katkı oranına (%0, %0,1, %0,3, %0,5, %0,7 ve %1,0) sahip PLA filamentlerin çekme dayanımı özelliğini incelemişlerdir. Tüm katkı oranlarında katkısız PLA filamente kıyasla daha iyi çekme dayanımı elde etmişlerdir. Nano grafen katkısının çekme dayanımını iyileştirmesinin sebebini nano grafenin homojen dağılarak güçlü bir ara yüzey etkileşimi oluşturması ile açıklamışlardır.

4.1.2. Kopma Uzaması

Çalışmanın bu bölümünde %0, %0,5, %1,0, %1,5, ve %2,0 nano grafen katkı oranlarına sahip PLA filamentler kullanılarak gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen kopma uzaması değerleri yer almaktadır.



Şekil 56. Farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin kopma uzaması sonuçları.

Tablo 18. Kopma uzamasının yüzdelik değişimleri.

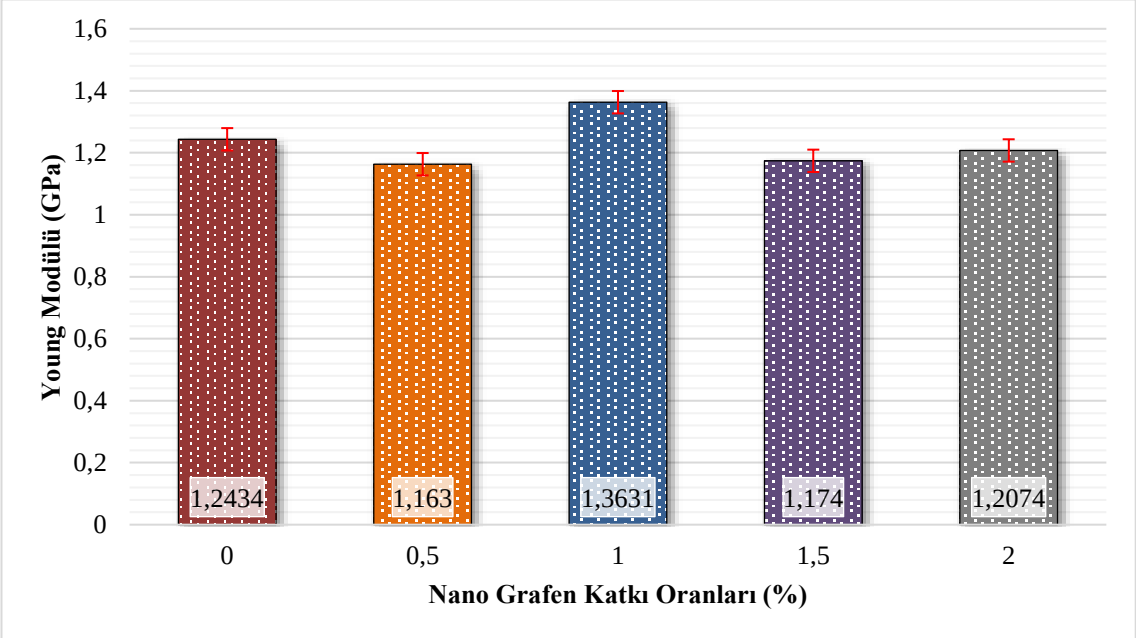
Grafen Katkı Oranı (%)	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**
Kopma Uzaması Değişimleri (%)	-9,25	-20,48	-26,48	-22,54

Farklı nano grafen katkı oranlı PLA filamentler ile gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda kopma uzaması değerleri incelendiğinde nano grafen katkısız PLA filament %6,77117 değerinde kopma uzaması göstermiştir. %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 nano grafen katkılı PLA filamentler sırası ile %6,14458, %5,38467, %4,97758 ve %5,2445 değerlerinde kopma uzaması göstermişlerdi. Şekil 56'da farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin kopma uzaması değerleri yer almaktadır. Nano grafen katkısız PLA filamente kıyasla sırası ile %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 nano grafen katkılı PLA filamentlerde %9,25, %20,48, %26,48 ve %22,54 daha düşük kopma uzaması değerleri

elde edilmiştir. Tablo 18'de grafen katkısı ile kopma uzamasının yüzdelik değişimleri yer almaktadır. Nano grafen katkısının PLA filamentin kopma uzamasını düşürmesinin sebebi nano grafen katkısının polimer matrisin sünekliliğini kısıtlaması olduğu düşünülmektedir. Gao ve diğ. [91] iki farklı tanecik boyutunda, katkısız ve üç faklı nano grafen katkı oranına (%5, %7 ve %10) sahip PLA filamentin kopma uzaması özelliğini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada küçük ve büyük tanecik boyutuna sahip nano grafen katkılı PLA filamentlerin tamamında, nano grafen katkısız PLA filamente kıyasla daha düşük kopma uzaması elde etmişlerdir. Nano grafen katkısının kopma uzamasını düşürmesinin sebebini nano grafen katkısının polimer matrisin sünekliliğini kısıtlaması olarak açıklamışlardır.

4.1.3. Young Modülü

Çalışmanın bu bölümünde %0, %0,5, %1,0, %1,5, ve %2,0 nano grafen katkı oranlarına sahip PLA filamentler kullanılarak gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen Young modülü değerleri yer almaktadır.



Şekil 57. Farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin Young modülü sonuçları.

Tablo 19. Young modülünün yüzdelik değişimleri.

Grafen Katkı Oranı (%)	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.0**
Young Modülü Değişimleri (%)	-6,46	+9,62	-5,58	-2,89

Farklı nano grafen katkı oranlı PLA filamentler ile gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda Young modülü değerleri incelendiğinde nano grafen katkısız PLA filament 1,2434 GPa değerinde Young modülü göstermiştir. %0,5, %1,5 ve %2,0 nano grafen katkılı PLA filamentler sırası ile 1,163 GPa, 1,174 GPa ve 1,2074 GPa değerlerinde Young modülü göstermişlerdi. Şekil 57'de farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin Young modülü değerleri yer almaktadır. Nano grafen katkısız PLA filamente kıyasla sırası ile %0,5, %1,5 ve %2,0 nano grafen katkılı PLA filamentlerde %6,46, %5,58 ve %2,89 daha düşük Young modülü değerleri elde edilmiştir. Tablo 19'da grafen katkısı ile Young modülünün yüzdelik değişimleri yer almaktadır. Nano grafen katkısının PLA filamentin Young modülünü düşürmesinin sebebi nano grafenin polimer zincirle doğrudan temas kurması ve polimer zincirler arasında köprüler oluşturması olduğu düşünülmektedir. Ghani ve diğ. [100] yaptıkları çalışmada beş farklı nano grafen oranına (%0, %0,1, %0,3, %0,5 ve %1,0) sahip PLA filamentlerin Young modüllerini incelemişlerdir. Nano grafen katkı oranlarının tamamında katkısız PLA filamente kıyasla daha düşük Young modülü elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada nano grafen katkısının Young modülünü düşürdüğünü belirlemişlerdir. Grafen katkısı ile gerçekleşen düşüşün sebebini nano grafenin polimer zincirle doğrudan temas kurması ve polimer zincirler arasında köprüler oluşturması ile açıklamışlardır.

%1,0 nano grafen katkılı PLA filamentte 1,3631 GPa değerinde Young modülü elde edilmiştir. Nano grafen katkısız PLA filamente kıyasla %1,0 nano grafen katkılı PLA filament %9,62 daha yüksek Young modülü göstermiştir. %1,0 nano grafen katkı oranında Young modülünün yükselmesinin sebebi nano grafen kümeleri arasında yakın temas oluşması ve bu durumun polimer matris içinde sert bir ağ yapısı oluşturması olduğu düşünülmektedir. Gao ve diğ. [91] katkısız PLA filament ve iki farklı tanecik boyutunda, üç faklı nano grafen katkı oranına (%5, %7 ve %10) sahip PLA filamentin Young modülü özelliğini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada küçük ve büyük tanecik boyutuna sahip

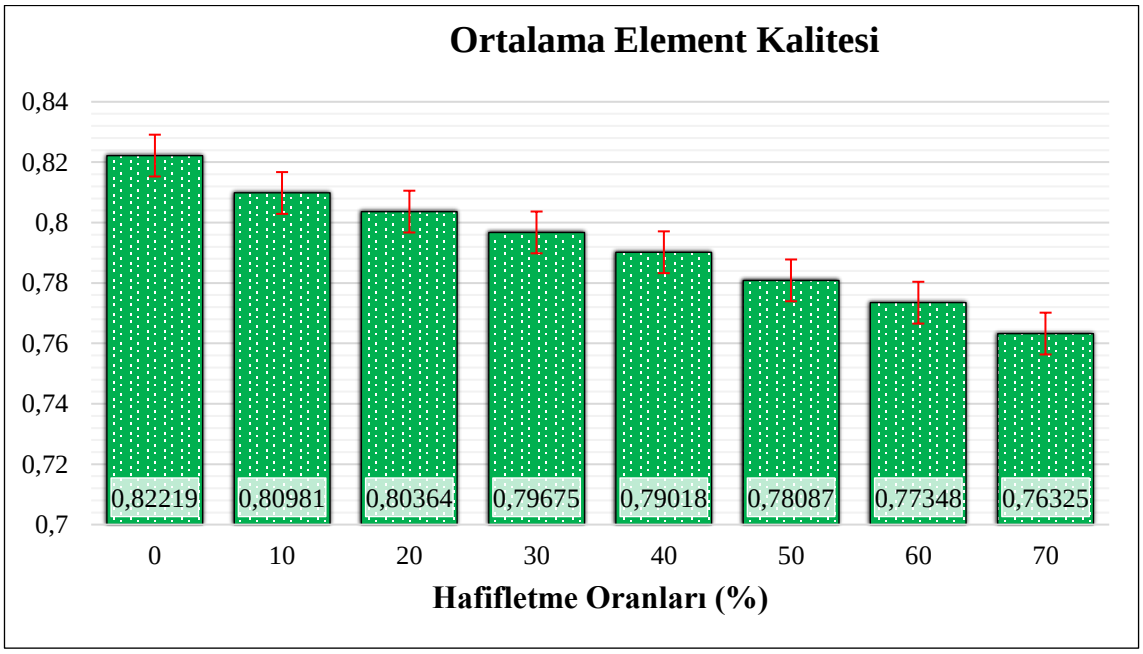
tüm nano grafen katkılı PLA filamentlerde nano grafen katkısız PLA filamente kıyasla daha yüksek Young modülü elde etmişlerdir. Nano grafen katkısının Young modülünü artırmasının sebebini nano grafen katkısının gerilim transferini daha etkili bir şekilde gerçekleştirmesi ve bu durumun polimer matris içinde sert bir ağ yapısı oluşturması ile açıklamışlardır.

4.2. Mesh Kalitesi

Mesh kalitesinin belirlenebilmesi için her bir tasarımın element kalitesi (element quality), en-boy oranı (aspect ratio) ve çarpıklık (skewness) parametreleri değerlendirilmiştir.

4.2.1. Element Kalitesi

Çalışmanın bu bölümünde mesh ataması sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen element kalitesi değerleri yer almaktadır. Element kalitesi parametresi bir mesh elemanının hacminin kenar uzunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Element kalitesi parametresinde "0" ve "1" değer aralıklarında oranlar mevcuttur. "0" değeri kötü bir element kalitesi, "1" iyi bir element kalitesi anlamına gelmektedir. Element kalitesi değeri 0'dan 1'e yaklaştıkça kalitesi artmaktadır. Parça üzerinde "0" kırmızı "1" mavi renk ile gösterilmektedir [102], [103].

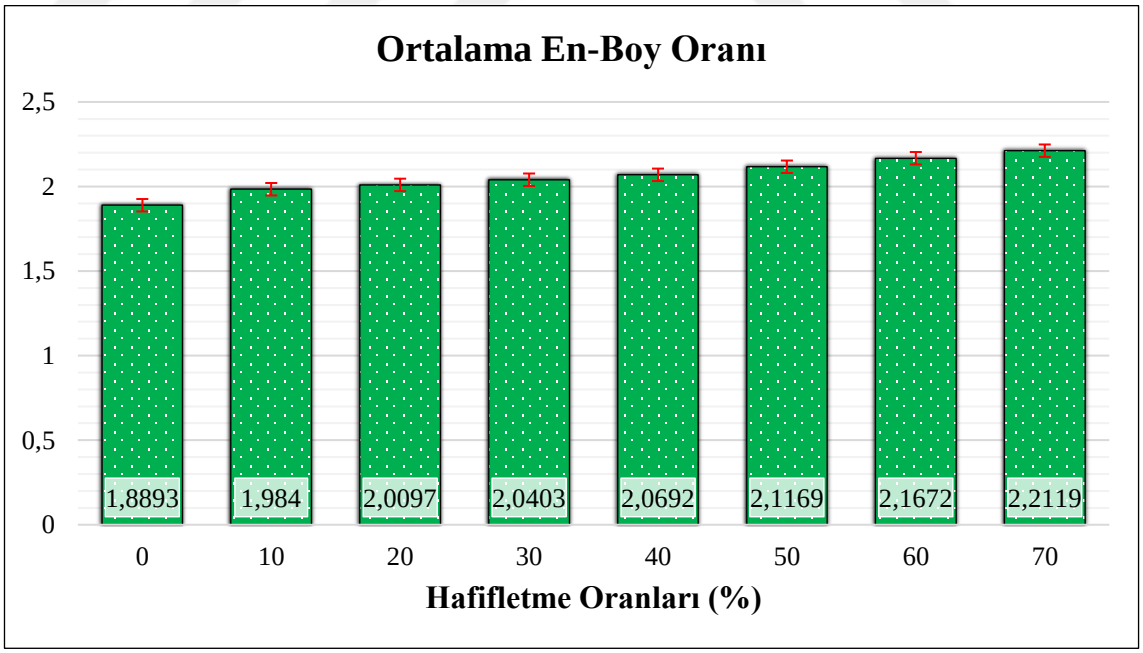


Şekil 58. Parça tasarımlarının ortalama element kalitesi değerleri.

Her bir parça tasarımının ortalama element kalitesi değerleri incelendiğinde 0.7 değerinin üzerinde bir değere sahip olduğu belirlenmiştir. %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarında 0,7-0,8 değer aralığında ortalama element kalitesi değerleri elde edilmiştir. Orijinal parça tasarımı, %10 ve %20 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parça tasarımları 0,8-0,9 değer aralığında yer alarak daha iyi bir ortalama element kalitesi yapısına sahip olmuşlardır. Parça tasarımlarının ortalama element kalitesi değerleri Şekil 58'de sunulmuştur.

4.2.2. En-Boy Oranı

Çalışmanın bu bölümünde mesh ataması sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen en-boy oranı değerleri yer almaktadır. En-boy oranı parametresi bir mesh elemanının uzun kenarının kısa kenarına oranı olarak tanımlanmaktadır. En-boy oranı parametresinde "1" ve "20 ve üzerinde" değer aralıklarında oranlar mevcuttur. "20 veya üzeri" değeri kötü bir en-boy oranı "1" iyi bir en-boy oranı anlamına gelmektedir. En-boy oranı değeri 20 veya üzerinden 1'e yaklaştıkça kalitesi artmaktadır. Parça üzerinde "20 veya üzeri" kırmızı "1" mavi renk ile gösterilmektedir [103], [104].



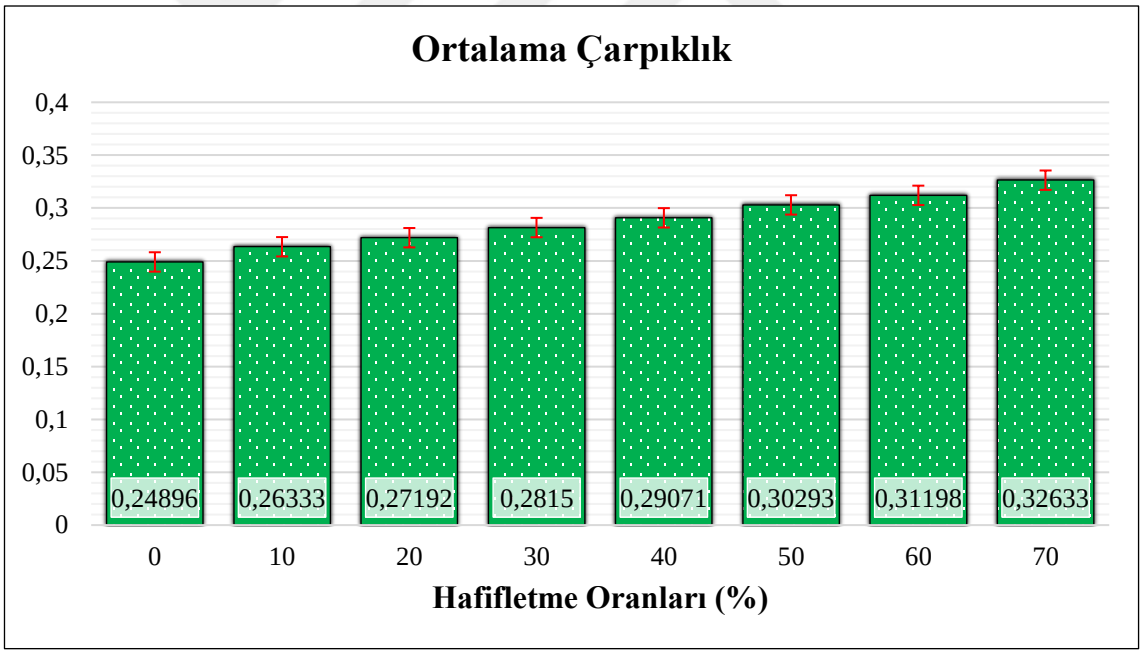
Şekil 59. Parça tasarımlarının ortalama en-boy oranı değerleri.

Her bir parça tasarımının ortalama en-boy oranı değerleri incelendiğinde 3 değerinin altında bir değere sahip olduğu gözlenmiştir. %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parçalarda 2 değerine yakın değerler elde edilerek

2-3 değer aralığında yer almıştır. Orijinal parça tasarımı ve %10 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parça tasarımı 1-2 değer aralığında yer alarak daha iyi bir ortalama en-boy oranı yapısına sahip olmuşlardır. Parça tasarımlarının ortalama en-boy oranı değerleri Şekil 59'da sunulmuştur.

4.2.3. Çarpıklık

Çalışmanın bu bölümünde mesh ataması sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen çarpıklık değerleri yer almaktadır. Çarpıklık parametresi optimum eleman boyutu ile aktif eleman boyutu arasındaki farkın optimum eleman boyutuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Çarpıklık parametresinde "0" ve "1" değer aralıklarında oranlar mevcuttur. "1" değeri kötü bir çarpıklık "0" iyi bir çarpıklık anlamına gelmektedir. Çarpıklık değeri 1'den 0'a yaklaştıkça kalitesi artmaktadır. Parça üzerinde "1" kırmızı "0" mavi renk ile gösterilmektedir [103], [104].



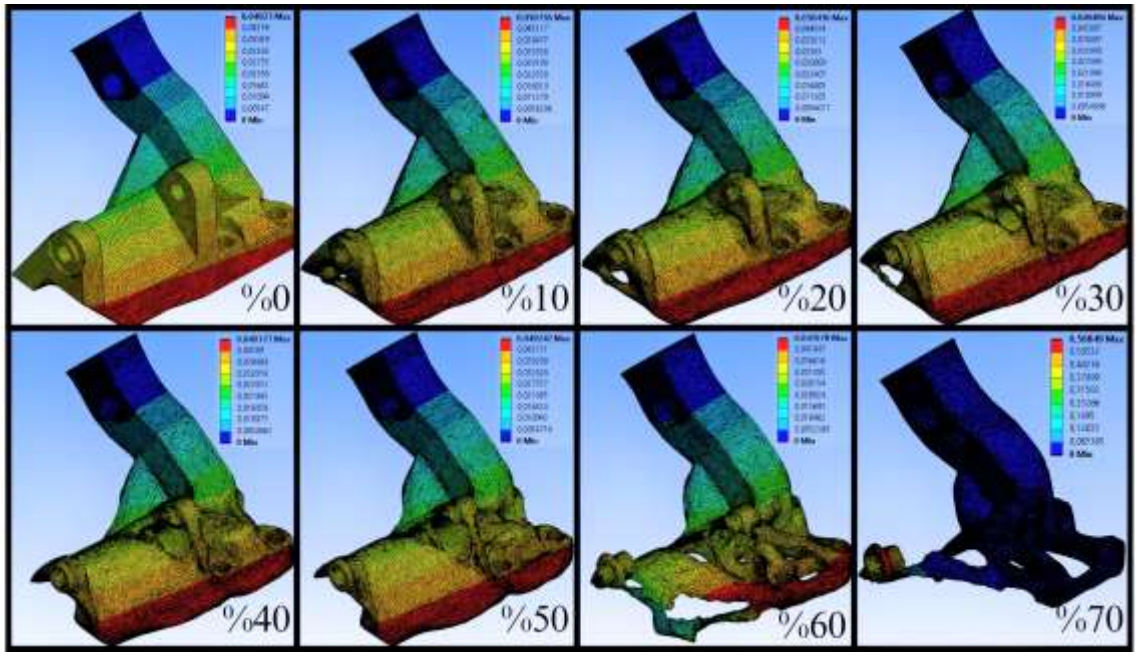
Şekil 60. Parça tasarımlarının ortalama çarpıklık değerleri.

Her bir parça tasarımının ortalama çarpıklık değerleri incelendiğinde 0,4 değerinin altında bir değere sahip olduğu gözlenmiştir. %50, %60 ve %70 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parçalarda 0,3-0,4 değer aralıklarında ortalama çarpıklık değeri gözlenmiştir. Orijinal parça tasarımı, %10, %20, %30 ve %40 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parça tasarımları 0,2-0,3 değer aralığında yer alarak daha iyi bir ortalama çarpıklık

yapısına sahip olmuşlardır. Parça tasarımlarının ortalama çarpıklık değerleri Şekil 60'ta sunulmuştur.

4.3. Toplam Deformasyon Sonuçları

Orijinal ve yenilenmiş parça tasarımlarına belirlenen sınır şartları altında yapısal analiz uygulanmıştır. Yapısal analiz çıktısı olarak toplam deformasyon değeri belirlenmiştir. Toplam deformasyonun parça tasarımları üzerinde gösterimi Şekil 61'de sunulmuştur.



Şekil 61. Toplam deformasyonun parça tasarımları üzerinde gösterimi.

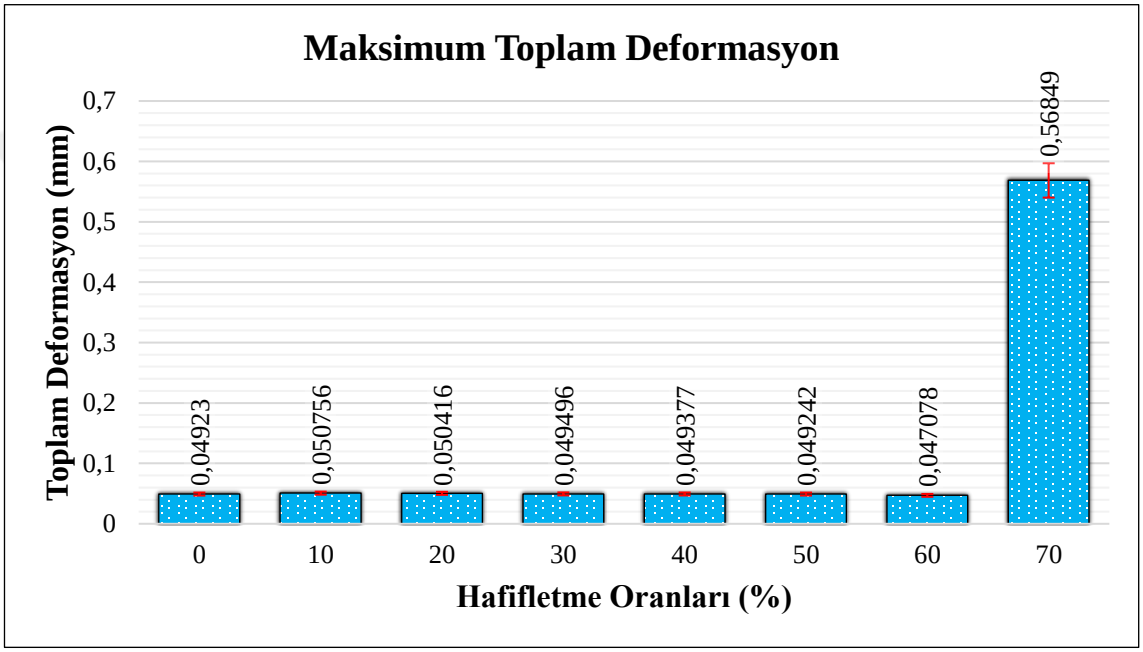
4.3.1. Minimum Toplam Deformasyon

Çalışmanın bu bölümünde yapısal analiz sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen minimum toplam deformasyon değerleri yer almaktadır. Minimum toplam deformasyon değeri tüm tasarımlar için 0 mm olarak elde edilmiştir. Nazlı ve Özsoy [105] bir otomobil salıncağının TO ile hafifletilmesi çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. TO optimizasyonu ile parça tasarımını %57 hafifletmişlerdir. Yaptıkları çalışmada orijinal ve hafiflettikleri parça tasarımlarının minimum toplam deformasyon değerlerini 0 mm olarak belirlemişlerdir. Benzer şekilde Koçak ve Korkut [104] bir insansız hava aracı burun iniş takımı çatalı için TO ile hafifletme çalışması yapmışlardır. TO optimizasyonu ile parça tasarımını yaklaşık %40.55 hafifletmişlerdir. Yaptıkları çalışmada orijinal ve hafiflettikleri parça tasarımlarının minimum toplam deformasyon değerlerini 0 mm olarak belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada Shanmugasunda ve diğ. [106] bir bağlantı

çubuğunun hafifletilmesi işlemini yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada orijinal parça tasarımını %3.5 hafifletmişlerdir ve iki parça tasarımının da minimum toplam deformasyonunu 0 mm olarak belirlemişlerdir.

4.3.2. Maksimum Toplam Deformasyon

Çalışmanın bu bölümünde yapısal analiz sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen maksimum toplam deformasyon değerleri yer almaktadır.



Şekil 62. Parça tasarımlarının maksimum toplam deformasyon değerleri.

Yapısal analiz sonucunda orijinal parça tasarımının maksimum toplam deformasyon değeri 0,04932 mm olarak ölçülmüştür. %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarında sırası ile 0,050756 mm, 0,050416 mm, 0,049496 mm, 0,049377 mm, 0,049242 mm, 0,047078 mm ve 0,56849 mm maksimum toplam deformasyon değerleri elde edilmiştir. Parça tasarımlarının maksimum toplam deformasyon değerleri Şekil 62'de sunulmuştur.

Tablo 20. Maksimum toplam deformasyonun yüzdelik değişimleri.

Hafifletme Oranları (%)	Maksimum Toplam Deformasyon Değişim (%)
10	+3,10
20	+2,41
30	+0,54
40	+0,30
50	+0,02
60	-4,37
70	+1053,48

Orijinal parça tasarımının maksimum toplam deformasyon değerine kıyasla %10, %20, %30, %40, %50 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarının maksimum toplam deformasyon değerlerinde sırası ile %3,10, %2,41, %0,54, %0,30, %0,02 ve %1053,48'lik artış meydana gelmiştir. Orijinal parça tasarımına kıyasla yenilenmiş parça tasarımlarının maksimum toplam deformasyon değerlerindeki yüzdelik değişimleri Tablo 20'de sunulmuştur. Nazlı ve Özsoy [105] TO ile bir otomobil salıncağının hafifletilmesi çalışmasında %57 hafifletme sağladıkları orijinal parça tasarımında 2,8 mm maksimum toplam deformasyon değeri, hafiflettikleri parça tasarımında 3,8 mm maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir. Hafiflettikleri parça tasarımında orijinaline kıyasla yaklaşık %35,71 daha yüksek maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir. Benzer şekilde Koçak ve Korkut [104] bir insansız hava aracı burun iniş takımı çatalının hafifletilmesi çalışmasında parçayı yaklaşık %40,55 oranında hafifletmişlerdir. Orijinal parça tasarımının maksimum toplam deformasyon değerini 0,14312 mm ve hafiflettikleri parça tasarımının maksimum toplam deformasyon değerini 0,14488 mm olarak belirlemişlerdir. Hafiflettikleri parça tasarımında orijinaline kıyasla yaklaşık %1,23 daha yüksek maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir. Bir diğer çalışmada Bodog ve Grebenişan [107] delikli bir plakanın TO ile hafifletilmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Orijinal plaka tasarımında 0,173 mm maksimum toplam deformasyon değeri, %50 hafifletme sağladıkları plaka tasarımında ise 0,198 mm maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir. Hafiflettikleri plaka tasarımının maksimum toplam deformasyon değerinin orijinaline kıyasla %14,45 daha yüksek maksimum toplam deformasyon değerine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Öğüçlü ve Yıldırım [108] yaptıkları çalışmada geri

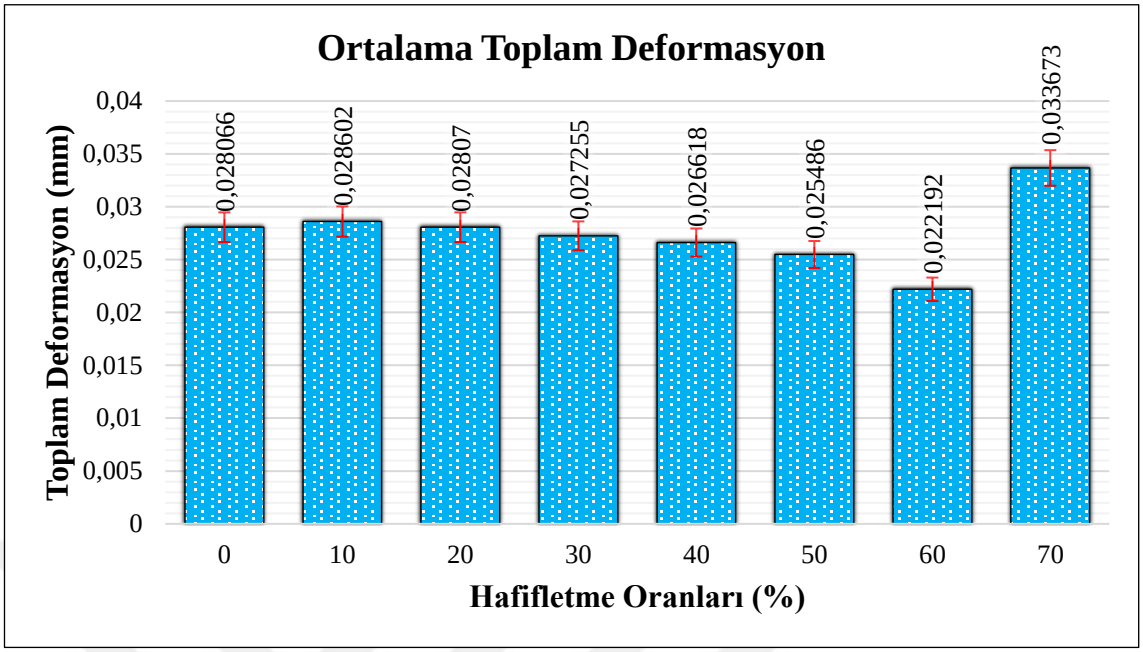
dönüşüm için kullanılan bir makinenin kesici üst çenesine ait bağlantı parçasının hafifletilmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yaklaşık %44 ve %25 oranlarında hafifletilmiş iki tasarım oluşturmuşlardır. Orijinal parça tasarımında 1,3155 mm maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir. %44 ve %25 hafif parça tasarımlarında sırası ile 1,5803 mm ve 1,4738 mm maksimum toplam deformasyon değerleri gözlemlemişlerdir. %44 ve %25 hafif parça tasarımlarında orijinal parça tasarımına kıyasla %16,76 ve %10,74 daha yüksek maksimum toplam deformasyon değerleri elde etmişlerdir.

%60 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parça tasarımında orijinal parça tasarımından daha düşük maksimum toplam deformasyon değeri elde edilmiştir. %60 hafifletme oranına sahip parça tasarımında orijinal parça tasarımına kıyasla %4,37 oranında daha az maksimum toplam deformasyon değeri elde edilmiştir. Shanmugasunda ve diğ. [106] yaptıkları çalışmada bir bağlantı çubuğunun TO ile hafifletilmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Orijinal parça tasarımında TO ile %3,5 hafifletme sağlamışlardır. Orijinal parça tasarımında yaklaşık 0,05 mm maksimum toplam deformasyon değeri, hafiflettikleri parça tasarımında yaklaşık 0,03 mm maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir. Hafiflettikleri parça tasarımında orijinaline kıyasla yaklaşık %40 daha düşük maksimum toplam deformasyon değeri elde etmişlerdir.

Yalnızca %60 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parça tasarımının maksimum toplam deformasyon değerinde azalma elde edilmiştir ve orijinal parça tasarımının maksimum toplam deformasyon değerinden daha düşük değere sahip olmuştur.

4.3.3. Ortalama Toplam Deformasyon

Çalışmanın bu bölümünde yapısal analiz sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen ortalama toplam deformasyon değerleri yer almaktadır.



Şekil 63. Parça tasarımlarının ortalama toplam deformasyon değerleri.

Yapısal analiz sonucunda orijinal parça tasarımının ortalama toplam deformasyon değeri 0,028066 mm olarak ölçülmüştür. %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarında sırası ile 0,028602 mm, 0,02807 mm, 0,027255 mm, 0,026618 mm, 0,025486 mm, 0,022192 mm ve 0,033673 mm ortalama toplam deformasyon değerleri elde edilmiştir. Parça tasarımlarının ortalama toplam deformasyon değerleri Şekil 63'te sunulmuştur.

Tablo 21. Ortalama toplam deformasyonun yüzdelik değişimleri.

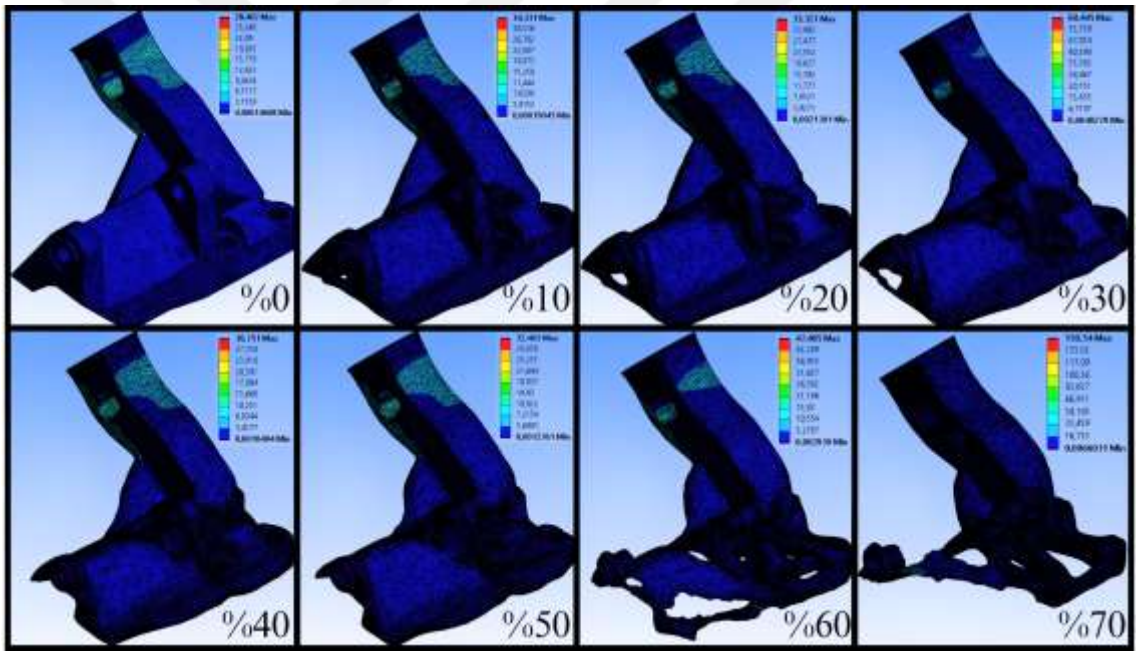
Hafifletme Oranları (%)	**Ortalama Toplam Deformasyon Değişim (%)**
10	+1,91
20	+0,014
30	-2,89
40	-5,15
50	-9,21
60	-20,94
70	+19,97

Orijinal parça tasarımının ortalama toplam deformasyon değerine kıyasla %10, %20 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarının ortalama toplam deformasyon değerlerinde sırası ile %1,91, %0,014 ve %19,97'lik artış meydana gelmiştir. %30, %40, %50 ve %60 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parça

tasarımında orijinal parça tasarımından daha düşük ortalama toplam deformasyon değeri elde edilmiştir. %30, %40, %50 ve %60'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımlarında orijinal parça tasarımına kıyasla %2,89, %5,15, %9,21 ve %20,94 oranlarında daha az ortalama toplam deformasyon değerleri elde edilmiştir. Orijinal parça tasarımına kıyasla yenilenmiş parça tasarımlarının ortalama toplam deformasyon değerlerindeki yüzdelik değişimleri Tablo 21'de sunulmuştur.

4.4. von-Mises Stres Sonuçları

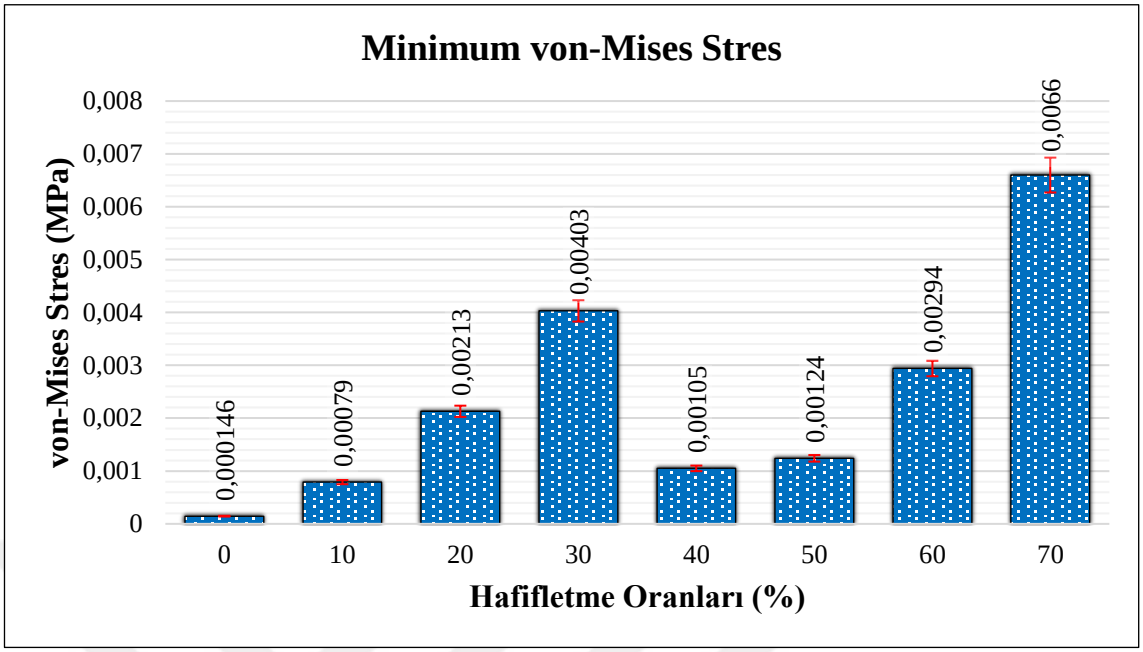
Orijinal ve yenilenmiş parça tasarımlarına belirlenen sınır şartları altında yapısal analiz uygulanmıştır. Yapısal analiz çıktısı olarak von-Mises stres değeri belirlenmiştir. von-Mises stresin parça tasarımları üzerinde gösterimi Şekil 64'te sunulmuştur.



Şekil 64. von-Mises stresin parça tasarımları üzerinde gösterimi.

4.4.1. Minimum von-Mises Stres

Çalışmanın bu bölümünde yapısal analiz sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen minimum von-Mises stres değerleri yer almaktadır.



Şekil 65. Parça tasarımlarının minimum von-Mises stres değerleri.

Yapısal analiz sonucunda orijinal parça tasarımının minimum von-Mises stres değeri 0,000146 MPa olarak ölçülmüştür. %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarında sırası ile 0,00079 MPa, 0,00213 MPa, 0,00403 MPa, 0,00105 MPa, 0,00124 MPa, 0,00294 MPa ve 0,0066 MPa minimum von-Mises stres değerleri elde edilmiştir. Parça tasarımlarının minimum von-Mises stres değerleri Şekil 65'te sunulmuştur.

Tablo 22. Minimum von-Mises stresin yüzdelik değişimleri.

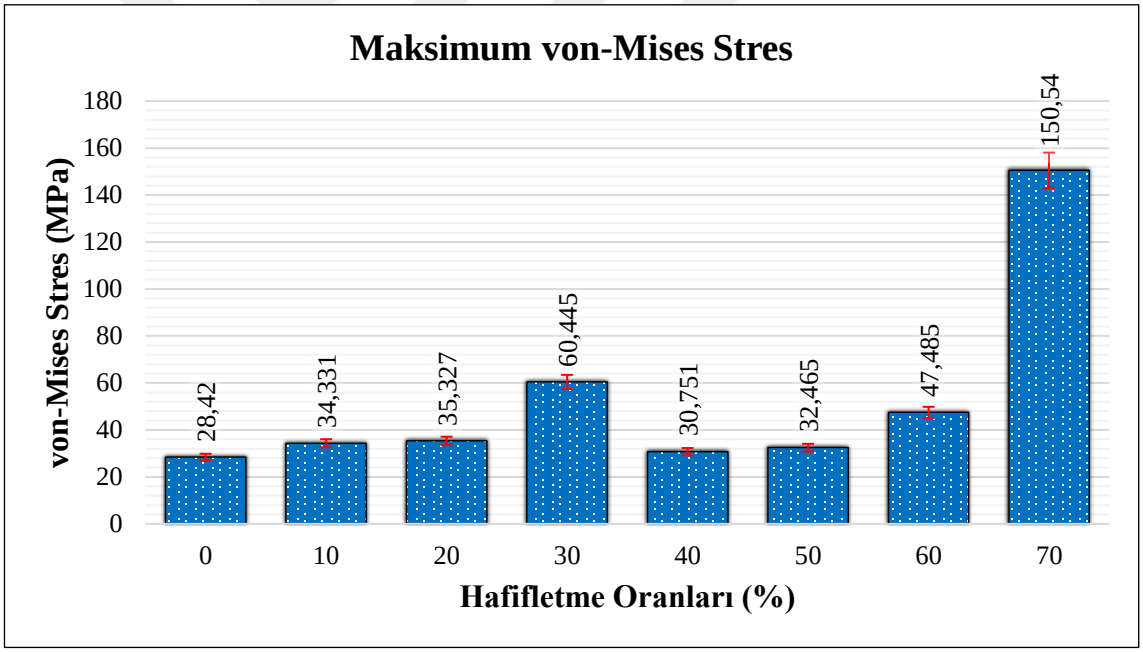
Hafifletme Oranları (%)	**Minimum von-Mises Stres Değişim (%)**
10	+509,5
20	+1355,2
30	+2651,4
40	+519,5
50	+745,4
60	+1912,5
70	+4422,3

Orijinal parça tasarımının minimum von-Mises stres değerine kıyasla %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarının minimum von-Mises stres değerlerinde sırası ile %509,5, %1355,2, %2651,4, %519,5,

%745,4, %1912,5 ve %4422,3'lük artış meydana gelmiştir. Orijinal parça tasarımına kıyasla yenilenmiş parça tasarımlarının minimum von-Mises stres değerlerindeki yüzdelik değişimleri Tablo 22'de sunulmuştur. Nazlı ve Özsoy [105] TO ile bir otomobil salıncağının hafifletilmesi çalışmasında %57 hafifletme sağladıkları orijinal parça tasarımında 0,0010196 MPa minimum von-Mises stres değeri, hafiflettikleri parça tasarımında 0,0013177 MPa minimum von-Mises stres değeri elde etmişlerdir. Hafiflettikleri parça tasarımında orijinaline kıyasla yaklaşık %29,24 daha yüksek minimum von-Mises stres değeri elde etmişlerdir.

4.4.2. Maksimum von-Mises Stres

Çalışmanın bu bölümünde yapısal analiz sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen maksimum von-Mises stres değerleri yer almaktadır.



Şekil 66. Parça tasarımlarının maksimum von-Mises stres değerleri.

Yapısal analiz sonucunda orijinal parça tasarımının maksimum von-Mises stres değeri 28,42 MPa olarak ölçülmüştür. %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarında sırası ile 34,331 MPa, 35,327 MPa, 60,445 MPa, 30,751 MPa, 32,465 MPa, 47,485 MPa ve 150,54 MPa maksimum von-Mises stres değerleri elde edilmiştir. Parça tasarımlarının maksimum von-Mises stres değerleri Şekil 66'da sunulmuştur.

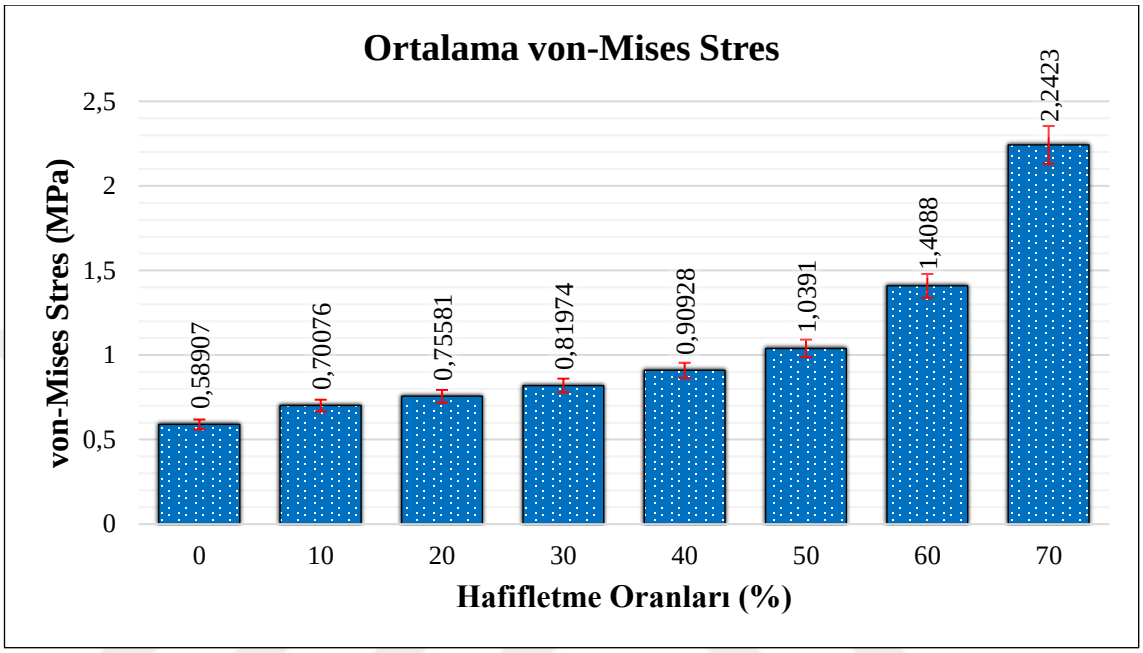
Tablo 23. Maksimum von-Mises stresin yüzdelik değişimleri.

Hafifletme Oranları (%)	Maksimum von-Mises Stres Değişim (%)
10	+20,8
20	+24,3
30	+112,9
40	+8,2
50	+14,2
60	+67,1
70	+429,2

Orijinal parça tasarımının maksimum von-Mises stres değerine kıyasla %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarının maksimum von-Mises stres değerlerinde sırası ile %20,8, %24,3, %112,9, %8,2, %14,2, %67,1 ve %429,2'lik artış meydana gelmiştir. Orijinal parça tasarımına kıyasla yenilenmiş parça tasarımlarının maksimum von-Mises stres değerlerindeki yüzdelik değişimleri Tablo 23'te sunulmuştur. Koçak ve Korkut [104] TO ile bir insansız hava aracı burun iniş takımı çatalının hafifletilmesi çalışmasında %40,55 hafifletme sağlamışlardır. Orijinal parça tasarımında 30,486 MPa maksimum von-Mises stres değeri, hafiflettikleri parça tasarımında 30,951 MPa maksimum von-Mises stres değeri elde etmişlerdir. Hafiflettikleri parça tasarımında orijinaline kıyasla yaklaşık %1,53 daha yüksek maksimum von-Mises stres değeri elde etmişlerdir. Benzer şekilde Bodog ve Grebenişan [107] delikli bir plakanın TO ile hafifletilmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Orijinal plaka tasarımında 142,85 MPa maksimum von-Mises stres değeri, %50 hafifletme sağladıkları plaka tasarımında ise 216,22 MPa maksimum von-Mises stres değeri elde etmişlerdir. Hafiflettikleri plaka tasarımının maksimum von-Mises stres değerinin orijinaline kıyasla %51,36 daha yüksek maksimum von-Mises stres değerine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Öğüçlü ve Yıldırım [108] yaptıkları çalışmada geri dönüşüm için kullanılan bir makinenin kesici üst çenesine ait bağlantı parçasını yaklaşık %44 ve % 25 oranlarında hafifletmişlerdir. Orijinal, %44 ve %25 hafif parça tasarımlarında sırası ile 571,83 MPa, 1016,90 MPa ve 751,95 MPa maksimum von-Mises stres değerleri elde etmişlerdir. %44 ve %25 hafif parça tasarımlarında orijinal parça tasarımına kıyasla %43,77 ve %23,95 daha yüksek maksimum von-Mises stres değerleri elde etmişlerdir.

4.4.3. Ortalama von-Mises Stres

Çalışmanın bu bölümünde yapısal analiz sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen ortalama von-Mises stres değerleri yer almaktadır.



Şekil 67. Parça tasarımlarının ortalama von-Mises stres değerleri.

Yapısal analiz sonucunda orijinal parça tasarımının ortalama von-Mises stres değeri 0,58907 MPa olarak ölçülmüştür. %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarında sırası ile 0,70076 MPa, 0,75581 MPa, 0,81974 MPa, 0,90928 MPa, 1,0391 MPa, 1,4088 MPa ve 2,2423 MPa ortalama von-Mises stres değerleri elde edilmiştir. Parça tasarımlarının ortalama von-Mises stres değerleri Şekil 67'de sunulmuştur.

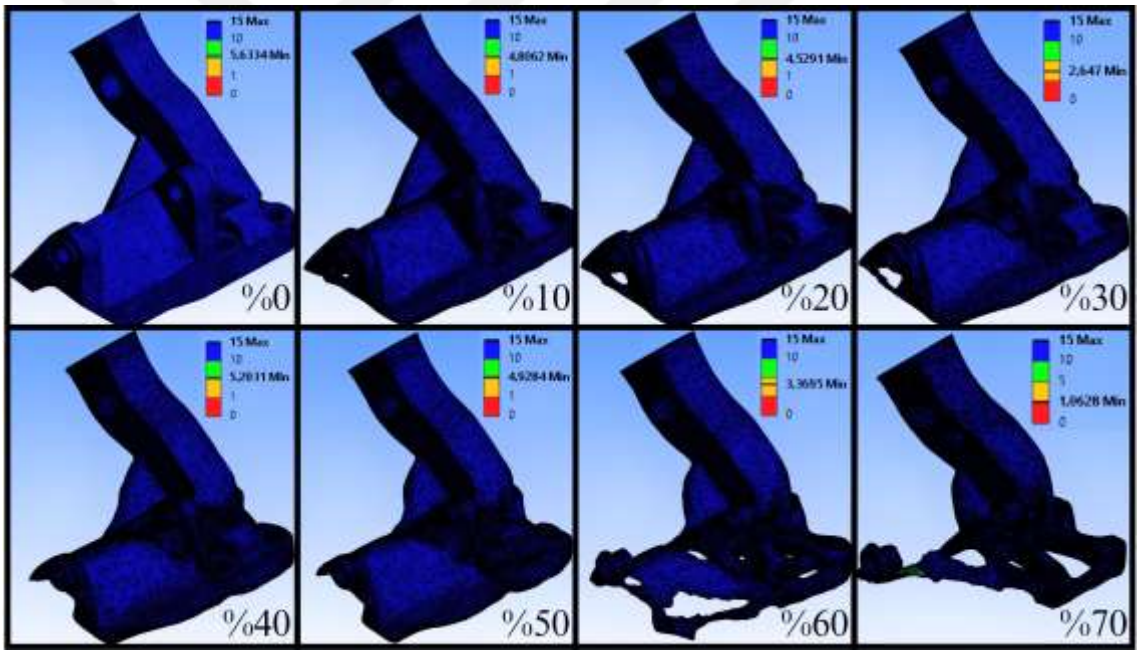
Tablo 24. Ortalama von-Mises stresin yüzdelik değişimleri.

Hafifletme Oranları (%)	**Ortalama von-Mises Stres Değişim (%)**
10	+18,98
20	+28,3
30	+39,2
40	+54,4
50	+76,4
60	+139,3
70	+280,3

Orijinal parça tasarımının ortalama von-Mises stres değerine kıyasla %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarının ortalama von-Mises stres değerlerinde sırası ile %18,98, %28,3, %39,2, %54,4, %76,4, %139,3 ve %280,3'lük artış meydana gelmiştir. Orijinal parça tasarımına kıyasla yenilenmiş parça tasarımlarının ortalama von-Mises stres değerlerindeki yüzdelik değişimleri Tablo 24'te sunulmuştur.

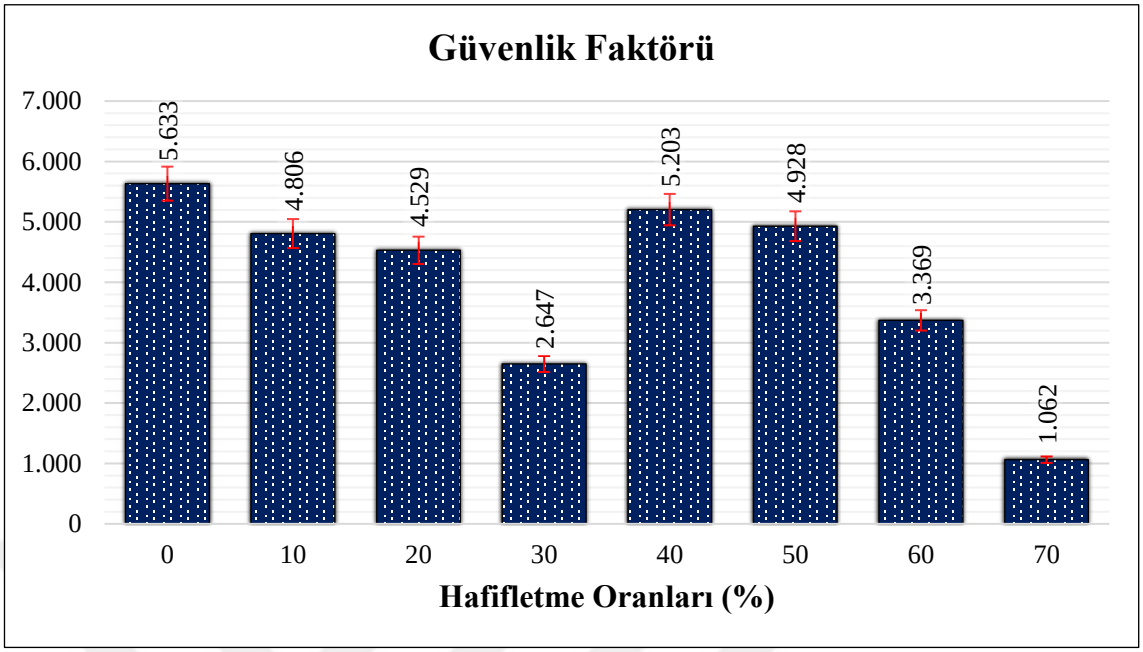
4.5. Güvenlik Faktörü Sonuçları

Orijinal ve yenilenmiş parça tasarımlarına belirlenen sınır şartları altında yapısal analiz uygulanmıştır. Yapısal analiz çıktısı olarak güvenlik faktörü değeri belirlenmiştir. Güvenlik faktörünün parça tasarımları üzerinde gösterimi Şekil 68'de sunulmuştur.



Şekil 68. Güvenlik faktörünün parça tasarımları üzerinde gösterimi.

Çalışmanın bu bölümünde yapısal analiz sonucunda her bir parça tasarımında elde edilen güvenlik faktörü değerleri yer almaktadır.



Şekil 69. Parça tasarımlarının güvenlik faktörü değerleri.

Yapısal analiz sonucunda orijinal parça tasarımının güvenlik faktörü değeri 5.633 olarak ölçülmüştür. %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarında sırası ile 4,806, 4,529, 2,647, 5,203, 4,928, 3,369 ve 1,062 güvenlik faktörü değerleri elde edilmiştir. Parça tasarımlarının güvenlik faktörü değerleri Şekil 69'da sunulmuştur.

Tablo 25. Güvenlik faktörünün yüzdelik değişimleri.

Hafifletme Oranları (%)	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**
Güvenlik Faktörü Değişimleri (%)	-14,7	-19,6	-53,0	-7,6	-12,5	-40,1	-81,1

Orijinal parça tasarımının güvenlik faktörü değerine kıyasla %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 hafifletme oranları ile tasarımları yenilenen parça tasarımlarının güvenlik faktörü değerlerinde sırası ile %14,7, %19,6, %53,0, %7,6, %12,5, %40,1 ve %81,1'lik düşüş meydana gelmiştir. Orijinal parça tasarımına kıyasla yenilenmiş parça tasarımlarının güvenlik faktörü değerlerindeki yüzdelik değişimleri Tablo 25'te sunulmuştur. Koçak ve Korkut [104] TO ile bir insansız hava aracı burun iniş takımı çatalının hafifletilmesi çalışmasında %40,55 hafifletme sağladıkları orijinal parça

tasarımında 16,5 güvenlik faktörü değeri, hafiflettikleri parça tasarımında 16,25 güvenlik faktörü değeri elde etmişlerdir. Hafiflettikleri parça tasarımında orijinaline kıyasla yaklaşık %1,52 daha düşük güvenlik faktörü değeri elde etmişlerdir.

4.6. Orijinal ve Optimum Parça Tasarımlarının Üretimi

Sayısal yapısal analiz testleri sonucunda %60 ve %70 hafifletme oranlarına sahip parça tasarımlarının toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü parametreleri incelendiğinde bazı parametreler için orijinal parça tasarımına yakın ya da daha iyi değerlere sahip oldukları fakat bazı parametreler için orijinal parça tasarımından uzak ve daha kötü değerlere sahip oldukları gözlenmiştir. %40 ve %50 hafifletme oranına sahip parça tasarımlarının toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü parametreleri incelendiğinde orijinal tasarıma yakın ya da daha iyi değerlere sahip oldukları gözlenmiştir. %40 ve %50 hafifletme oranlarına sahip parçaların toplam deformasyon, von-Mises stres ve güvenlik faktörü parametrelerinde birbirlerine yakın değerlere sahip olması fakat %50 hafifletme oranına sahip parçanın daha hafif olması sebebi ile %50 hafifletme oranına sahip parça çalışmada optimum parça tasarımı olarak seçilmiştir.

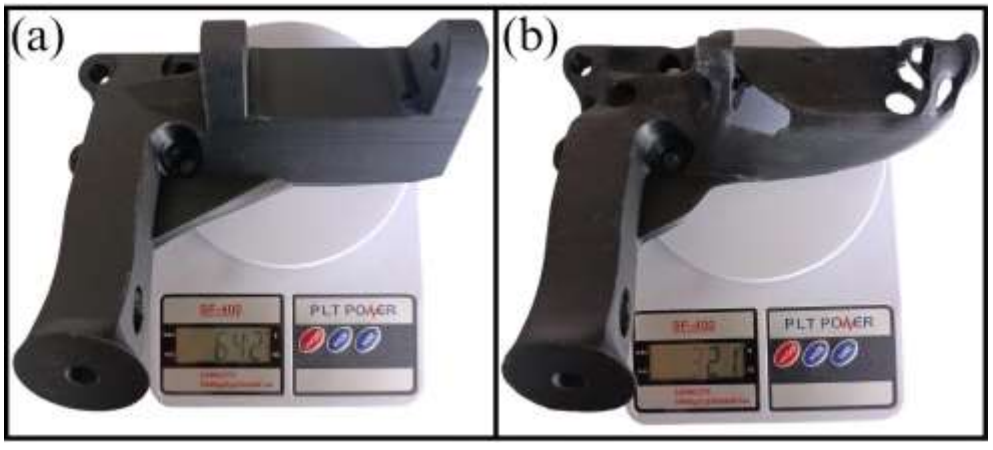
Orijinal ve optimum parça tasarımlarının üretimi Creality Ender-3 S1 FDM makinesi ile %100 dolulukta gerçekleştirilmiştir. Orijinal ve optimum parça tasarımlarının üretiminde çekme numunelerinin üretimi için kullanılan üretim parametreleri kullanılmıştır. Orijinal ve optimum parça tasarımlarının üretiminde kullanılan, dolgu yoğunluğu hariç üretim parametreleri Tablo 8’de yer almaktadır. Tasarımların üretiminde PLA filament kullanılmıştır. Şekil 70’te orijinal ve optimum parça tasımlarının FDM yöntemi kullanılarak üretimlerinin nihai halleri gösterilmiştir.



Şekil 70. Creality Ender-3 S1 makinesi kullanılarak üretilen (a) orijinal parça (b) optimum parça.

Üretim sonucunda orijinal parça tasarımının kütlesi 642 g ve optimum parça tasarımının kütlesi 321 g olarak ölçülmüştür. Şekil 71'de parçaların kütlelerinin ölçümleri yer almaktadır. Parça tasarımlarının üretimi sonucunda optimum parça tasarımında 321 g kütle azaltması elde edilerek orijinal tasarıma kıyasla %50 hafifletme sağlanmıştır.

Sayısal analizlerde elde edilen veriler ile üretim sonucu elde edilen veriler kıyaslandığında, sayısal verilerde hafifletmenin %48,78 olduğu fakat üretim sonucunda hafifletmenin %50 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 71. Creality Ender-3 S1 makinesi kullanılarak üretilen (a) orijinal parçanın kütlesi (b) optimum parçanın kütlesi.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Tartışma

Bu çalışmada, nano grafen katkısının polilaktik asit (PLA) filamentin mekanik özelliklerine etkisinin belirlenebilmesi için katkısız ve 1 kg PLA filamente ağırlıkça karıştırılan %0, %0,5 (5 g), %1,0 (10 g), %1,5 (15 g) ve %2,0 (20 g) katkı oranlarına sahip nano grafen katkılı PLA filamentler ile çekme numuneleri üretilmiş ve numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Grafen katkısı PLA filamentin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde iyi bir takviye elemanıdır. Nano grafen katkısı ile PLA filamentin mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi mümkündür. Nano grafen katkılı PLA filamentlerin üretiminde nano grafenin homojen dağılması ve tekdüze bir yapıda olması üretilen filamentin mekanik özelliklerini etkilemektedir.

Nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine etkisinin belirlenebilmesi çalışmasına ek olarak çalışmada hava araçlarında motor montaj ve alternatör destek braketi olarak görev yapan bir havacılık parçasının topoloji optimizasyonu (TO) ile hafifletilmesi ve eklemeli imalat yöntemlerinden (Eİ) olan eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi kullanılarak üretilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. %10'luk artışlar ile %10 ve %80 değer aralığında değişen farklı hafifletme oranlarında 8 farklı parça tasarımı elde edilmiştir ve elde edilen tasarımlara yapısal analiz uygulanması ile optimum parça tasarımı (%50 hafifletme oranı ile tasarımı yenilenen parça tasarımı) belirlenmiştir. TO ile mekanik gereksinimleri karşılayabilen hafifletilmiş parçalar tasarlamak mümkündür. Yüksek hafifletme oranları ile yenilenen tasarımlar karmaşık geometrili yapılarda olmaktadır ve bu tasarımların üretiminde Eİ'nin kullanılması geleneksel üretim yöntemlerine iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

5.2. Sonuç

Bu çalışmada, üç farklı çıktı elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen ilk çıktı nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine olan etkisidir. Çalışmadan elde edilen ikinci çıktı TO ve Eİ beraber kullanılması ile mekanik gereksinimleri karşılayabilen orijinalinden daha hafif parçaların üretilebilirliğidir. Çalışmadan elde edilen üçüncü çıktı ise sayısal ve üretim sonucu elde edilen hafifletme oranlarının karşılaştırılmasıdır.

Çalışma kapsamında elde edilen ilk çıktıya ait sonuçlar aşağıda yer almaktadır.

- En yüksek çekme dayanımı 59,9829 MPa değeri ile %2,0 nano grafen katkılı filamentle üretilen çekme numunesinde elde edilmiştir.
- En yüksek kopma uzaması %6,77117 değeri ile nano grafen katkısız filamentle üretilen çekme numunesinde elde edilmiştir.
- En yüksek Young modülü 1,3631 GPa değeri ile %1,0 nano grafen katkılı filamentle üretilen çekme numunesinde elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen ikinci çıktıya ait sonuçlar aşağıda yer almaktadır.

- Minimum toplam deformasyon değeri tüm tasarımlar için 0 olarak belirlenmiştir.
- Hafifletilen parça tasarımları içerisinde en düşük maksimum toplam deformasyon 0,047078 mm değeri ile %60'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımında gözlenmiştir.
- %60'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımında orijinal parça tasarımına kıyasla %4,37 oranında daha az maksimum toplam deformasyon değeri elde edilmiştir.
- Hafifletilen parça tasarımları içerisinde en düşük ortalama toplam deformasyon 0,022192 mm değeri ile %60'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımında gözlenmiştir.
- %30, %40, %50 ve %60'lık hafifletme oranlarına sahip parça tasarımlarında orijinal parça tasarımına kıyasla sırası ile %2,89, %5,15, %9,21, %20,94 oranlılarında daha az ortalama toplam deformasyon değerleri elde edilmiştir.

- Hafifletilen parça tasarımları içerisinde en düşük minimum von-Mises stres 0,00079045 MPa değeri ile %10'luk hafifletme oranına sahip parça tasarımında gözlenmiştir.

- %10'luk hafifletme oranına sahip parça tasarımında orijinal parça tasarımına kıyasla %509,5 oranında daha fazla minimum von-Mises stres değeri elde edilmiştir.

- Hafifletilen parça tasarımları içerisinde en düşük maksimum von-Mises stres 30,751 MPa değeri ile %40'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımında gözlenmiştir.

- %40'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımında orijinal parça tasarımına kıyasla %8,2 oranında daha fazla maksimum von-Mises stres değerleri elde edilmiştir.

- Hafifletilen parça tasarımları içerisinde en düşük ortalama von-Mises stres 0,70076 MPa değeri ile %10'luk hafifletme oranına sahip parça tasarımında gözlenmiştir.

- %10'luk hafifletme oranına sahip parça tasarımında orijinal parça tasarımına kıyasla %18,98 oranında daha fazla ortalama von-Mises stres değeri elde edilmiştir.

- Hafifletilen parça tasarımları içerisinde en yüksek güvenlik faktörü 5,203 değeri ile %40'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımında gözlenmiştir.

- %40'lık hafifletme oranına sahip parça tasarımında orijinal parça tasarımına kıyasla %7,6 oranında daha az güvenlik faktörü değeri elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen üçüncü çıktıya ait sonuç aşağıda yer almaktadır.

- TO sonucunda sayısal analizlerde %48,78, üretim sonucunda %50 hafifletme elde edilmiştir.

5.3. Öneriler

Bu çalışmada TO ve Eİ'nin beraber kullanılması ile mekanik gereksinimleri karşılayabilen orijinalinden daha hafif bir havacılık parçasının tasarlanması ve üretilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda sunulan öneriler aşağıda yer almaktadır.

- Bu çalışmada kullanılan nano grafen katkı oranlarından farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentler üretilerek nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine etkisi incelenebilir.
- Farklı boyutlarda ve oranlarda nano grafen katkısının PLA filamentin mekanik özelliklerine etkisi incelenebilir.
- Farklı üretim parametrelerinin farklı oranlarda nano grafen katkılı PLA filamentlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenerek her bir nano grafen katkı oranı için optimum üretim parametreleri belirlenebilir.
- Farklı nano malzemeler ile yeni PLA filamentler üretilerek mekanik özellikleri belirlenebilir.
- TO sonucunda program tarafından önerilen tasarımın iyi bir şekilde düzenlenmesi gerekmektedir.
- Mesh kalitesinin iyileştirilmesi ile daha iyi yapısal analiz sonuçları elde edilebilir.
- Farklı optimizasyon ve analiz programları ile veriler karşılaştırılabilir.
- Sayısal ve üretim sonucu hafifletme oranlarında oluşabilecek farkların sebebi araştırılabilir.

KAYNAKÇA

[1] B. Xie, X. Wu, L. Liu, ve Y. Zhang, 2023. "Topological Design of a Hinger Bracket Based on Additive Manufacturing", **Materials 2023, Vol. 16,** *Page 4061*, c. 16, sy 11, s. 4061.

[2] L. Meng *vd.*, 2019. "From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap", **Archives of Computational Methods in Engineering 27:3,** c. 27, sy 3, ss. 805-830.

[3] B. Yalçin, B. Ergene, ve G. Tarihi, 2024. "Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-D Eklemeli İmalat Yöntemi Ve Metalurjisi", **International Journal of Technological Sciences, c. 9**, sy 3, ss. 65-88, Ara. 2017, Erişim tarihi: Nisan 2024. Erişim adresi: **https://dergipark.org.tr/en/pub/utbd/issue/36156-/406618**

[4] G. Özer, 2020. "Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme", **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 9**, sy 1, ss. 606-621.

[5] Y. Ümit, G. Başcı, ve R. Yamanoğlu, 2021. "Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: Fdm İle Eklemeli İmalat", **International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, c. 5**, sy 2, ss. 339-352.

[6] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, ve M. Khorasani, 2020. "Additive manufacturing technologies", **Additive Manufacturing Technologies,** ss. 1-675.

[7] M. Pérez, D. Carou, E. M. Rubio, ve R. Teti, 2020. "Current advances in additive manufacturing", **Procedia CIRP,** c. 88, ss. 439-444.

[8] M. Armstrong, H. Mehrabi, ve N. Naveed, 2022. "An overview of modern metal additive manufacturing technology", **J Manuf Process,** c. 84, ss. 1001-1029.

[9] C. Chen *vd.*, 2020. "Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials", **Adv Funct Mater, c. 30**, sy 52.

[10] Z. Liu *vd.*, 2022. "Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control", **J Mater Sci Technol, c. 100**, ss. 224-236.

[11] W. Gao *vd.*, 2015. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering", **Computer-Aided Design, c. 69**, ss. 65-89.

[12] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman, ve S. Rab, 2021. "Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability", **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, c. 4**, sy 4, ss. 312-322.

[13] A. T. Koçak, 2024. "Uçak braketinde topoloji optimizasyonu ve analizi", Haz. 2023, Erişim: Eylül 2024. Erişim adresi: **http://acikerisim.aksaray.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12451/11403**

[14] "Designation: F2792 − 12a", doi: 10.1520/F2792-12A.

[15] İ. Karagöz, A. Daniş Bekdemir, ve Ö. Tuna, 2021. **3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme**, doi: 10.29130/dubited.877423.

[16] I. Gibson, D. Rosen, ve B. Stucker, 2015. "Vat Photopolymerization Processes", **Additive Manufacturing Technologies,** ss. 63-106.

[17] "Make : 3D printing CNC Machine Injection Molding - Dassault Systèmes®". Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **https://make.3dexperience.3ds.com/processes/photopolymerization**

[18] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, ve D. Hui, 2018. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", **Compos B Eng, c. 143**, ss. 172-196.

[19] H. K. Sürmen, 2019. "Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar", **Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, c. 24**, sy 2, ss. 373-392.

[20] "3D Printing Techniques - Additive Manufacturing Technologies - AMTech3D". Erişim tarihi: Eylül 2024. **Erişim adresi: https://amtech3d.com/3d-printing-techniques/**

[21] K. Chockalingam, N. Jawahar, K. N. Ramanathan, ve P. S. Banerjee, 2006. "Optimization of stereolithography process parameters for part strength using design of experiments", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology, c. 29**, sy 1-2, ss. 79-88.

[22] W. Gao *vd.*, 2015. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering", **Computer-Aided Design, c. 69**, ss. 65-89.

[23] "Both (A) continuous digital light processing (cDLP) and (B)... | Download Scientific Diagram". Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **https://www.researchgate.net/figure/Both-A-continuous-digital-light-processing-cDLP-and-B-stereolithography-SLA_fig1_259766072**

[24] D. Dean *vd.*, 2012. "Continuous Digital Light Processing (cDLP): Highly Accurate Additive Manufacturing of Tissue Engineered Bone Scaffolds", **Virtual Phys Prototyp, c. 7**, sy 1, ss. 13-24.

[25] P. Dudek, 2013. "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements", **Archives of Metallurgy and Materials, c. 58**, sy 4, ss. 1415-1418.

[26] "The 7 categories of Additive Manufacturing | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University". Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditi-vemanufacturing/**

[27] M. Paidar *vd.*, 2014. "3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials", **IOP Conf Ser Mater Sci Eng, c. 62**, sy 1, s. 012018.

[28] R. Udroiu ve I. C. Braga, 2017. "Polyjet technology applications for rapid tooling", **MATEC Web of Conferences,** c. 112.

[29] G. Rasiya, A. Shukla, ve K. Saran, 2021. "Additive Manufacturing-A Review", **Mater Today Proc, c. 47**, ss. 6896-6901.

[30] Y. L. Yap, C. Wang, S. L. Sing, V. Dikshit, W. Y. Yeong, ve J. Wei, 2017. "Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks", **Precis Eng, c. 50**, ss. 275-285.

[31] I. Q. Vu, L. B. Bass, C. B. Williams, ve D. A. Dillard, 2018. "Characterizing the effect of print orientation on interface integrity of multi-material jetting additive manufacturing", **Addit Manuf, c. 22**, ss. 447-461.

[32] "ExOne | Binder Jetting Technology". Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://www.exone.com/en-US/resources/case-studies/what-is-binder-jetting**

[33] W. King, A. T. Anderson, R. M. Ferencz, N. E. Hodge, C. Kamath, ve S. A. Khairallah, 2015. "Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory", **Materials Science and Technology, c. 31**, sy 8, ss. 957-968.

[34] Çelik, K., & Özkan, A. 2017. Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5**(1), 107-121.

[35] M. Vaezi, H. Seitz, ve S. Yang, 2013. "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology, c. 67**, sy 5-8, ss. 1721-1754.

[36] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, ve B. Kieback, 2019. "Powders for powder bed fusion: a review", **Progress in Additive Manufacturing, c. 4**, sy 4, ss. 383-397.

[37] P. Mercelis ve J. P. Kruth, 2006. "Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting", **Rapid Prototyp J, c. 12**, sy 5, ss. 254-265.

[38] Ö. Poyraz ve M. C. Kuşhan, 2018. "Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerin etkisinin incelenmesi", **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, c. 33**, sy 2, ss. 729-742.

[39] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, ve K. E. Evans, 2013. "Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting", **J Mater Process Technol, c. 213**, sy 4, ss. 589-597.

[40] "What are the types of 3D printers and what can they do? | Protolabs Network". Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing/**

[41] "What are the types of 3D printers and what can they do? | Protolabs Network". Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing/**

[42] A. Dass ve A. Moridi, 2019. "State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design", **Coatings, c. 9,** sy 7.

[43] "Laser metal deposition defined | Laser Focus World". Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14215980/laser-metal-deposition-defined**

[44] W. Li, J. Zhang, X. Zhang, ve F. Liou, 2017. "Effect of optimizing particle size on directed energy deposition of Functionally Graded Material with blown Pre-Mixed Multi-Powder", **Manuf Lett, c. 13**, ss. 39-43.

[45] K. V. Wong ve A. Hernandez, 2012. "A Review of Additive Manufacturing", **ISRN Mechanical Engineering,** c. 2012, ss. 1-10.

[46] "Mitsubishi Heavy Industries to Expand DED Metal 3D Printing Line - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing". Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **https://3dprint.com/276434/mitsubishi-heavy-industries-to-expand-ded-metal-3d-printing-line/**

[47] "Laminated Object Manufacturing (LOM)". Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing**

[48] B. G. Mekonnen, G. Bright, ve A. Walker, 2016. "A Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM)", **Lecture Notes in Mechanical Engineering,** ss. 207-216.

[49] C. K. Chua, S. M. Chou, ve T. S. Wong, 1998. "A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology, c. 14**, sy 2, ss. 146-152, 1998.

[50] O. Özsolak, 2019. "Eklemeli İmalat Yöntemleri Ve Kullanılan Malzemeler", **International Journal of Innovative Engineering Applications, c. 3**, ss. 9-14.

[51] I. Bahnini, M. Rivette, A. Rechia, A. Siadat, ve A. Elmesbahi, 2018. "Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology, c. 97**, sy 1-4, ss. 147-161.

[52] Ş. Erener[1], S. Yazar, ve S. Boz, 2021. "Modern Üretim Tekniklerinde Eklemeli İmalat Sistemlerinin Yeri Ve Kullanım Alanları", **Turkish Journal of Fashion Design and Management, c. 3**, sy 1, ss. 47-56, Şub. 2021, Erişim tarihi: Nisan 2024. Erişim adresi: **https://dergipark.org.tr/en/pub/tjfdm/issue/60484-/885949**

[53] S. Rouf *vd.*, 2022. "Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications", **Sustainable Operations and Computers, c. 3**, ss. 258-274.

[54] S. Negi, R. Kumar Sharma, ve S. Dhiman, 2013. "Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review", **Article in Journal of Manufacturing Technology Research · March, c. 5, sy 1.** Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://www.researchgate.net/publication/-281004567**

[55] J. Yang, B. Li, J. Liu, Z. Tu, ve X. Wu, 2024. "Application of Additive Manufacturing in the Automobile Industry: A Mini Review", **Processes 2024, Vol. 12, Page 1101**, c. 12, sy 6, s. 1101.

[56] K. Özsoy ve B. Duman, "Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği", **International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, c. 1**, sy 1, ss. 36-48, Ara. 2017, Erişim tarihi: Ağustos 2024. Erişim adresi: **https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/issue/-33982/376178**

[57] Y. Bozkurt, H. Ö. Gülsoy, ve E. Karayel, 2021. "Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı", **El-Cezeri, c. 8, sy 2,** ss. 962-980.

[58] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, ve D. Hui, 2018. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", **Compos B Eng, c. 143**, ss. 172-196.

[59] C. İ. Çalışkan ve Ü. Arpacıoğlu, "Yapı Üretiminde Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi", **Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, c. 25**, sy 2, ss. 1117-1136.

[60] B. Lu, D. Li, ve X. Tian, "Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing", **Engineering, c. 1,** sy 1, ss. 085-089, Mar. 2015, doi: 10.15302/J-ENG-2015012.

[61] T. Grzegorz Gaweł, 2020. "Review of Additive Manufacturing Methods", **Solid State Phenomena, c. 308**, ss. 1-20.

[62] M. Uzun ve Y. E. Erdoğdu, 2020. "Eriyik Yığma Modellemesi ile Üretimde Takviyesiz ve Takviyeli PLA Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması", **Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 10**, sy 4, ss. 2800-2808.

[63] Kaygusuz, B., & Özerinç, S. 2018. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen PLA bazlı yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. **Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 16**(1), 1-6.

[64] İ. Üner ve E. Dilara, 2012. "Poli(Laktik Asit)'in Kullanım Alanları Ve Nano Lif Üretimdeki Uygulamaları", ss. 22.

[65] A. Dalı ve H. Mühendislik, "İstanbul Teknik Üniversitesi ↔ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Ocak 2013 İndüktif Enerji Kaynaklı Ultrasonik Sprey Piroliz Sisteminde Nano-Metal, Nano-Metal Oksit ve Nano-Metal /METAL Oksit Karışık Tozları Üretimi Levent Kartal Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı Yapı Mühendisliği Programı".

[66] T. Metalurji ve M. Odası, "32. metalurji".

[67] H. Ates, E. Bahceci, G. Üniversitesi, T. Fakültesi, M. ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ve M. Kemal Üniversitesi, "Nano Malzemeler için Üretim Yöntemleri".

[68] M. Pul ve Muharrem pul, 2019. "Karbon Nanotüp (CNT) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi", **International Journal of Engineering Research and Development, c. 11**, sy 1, ss. 370-382.

[69] A. Narita, X. Y. Wang, X. Feng, ve K. Müllen, 2015. "New advances in nanographene chemistry", **Chem Soc Rev, c. 44**, sy 18, ss. 6616-6643.

[70] M. Can Şenel, A. Gör, M. Gürbüz, Y. Doç, ve E. Koç, "New Generatıon Composıtes Wıth Graphene Reınforced Alumınum Matrıx Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler Öz".

[71] M. Poyraz, 2015. "Bir Kamyon Şasisinin Yapısal Optimizasyonu", Fen Bilimleri Enstitüsü. Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **http://hdl.handle.net/11527/11602**

[72] "Topoloji optimizasyonu: Çatallı flanş uygulaması | AVESİS". Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **https://avesis.deu.edu.tr/yonetilen-tez/f716ba92-aac1-48b6-ab7f-9bd974bfeb90/topoloji-optimizasyonu-catalli-flans-uygulamasi**

[73] S. S. Rao, 2019. "Engineering optimization: Theory and practice", **Engineering Optimization: Theory and Practice,** ss. 1-798

[74] R. Larsson, "Methodology for Topology and Shape Optimization: Application to a Rear Lower Control Arm".

[75] "Yapısal Optimizasyon - Analiz Simulasyon". Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **https://analizsimulasyon.com/yapisal-optimizasyon/**

[76] A. M. Kılıç ve M. Sarıkanat, 2023. "Paletli Araçta Bulunan Bir Faydalı Yük Braketinin Topoloji Optimizasyonu ile Tasarımı ve Analizi", **Ulusal Üniversite-Sanayi İşbirliği, Ar-Ge ve İnovasyon Kongresi, ss. 2-2**, Ara. 2023, Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **http://openaccess.izmirakademi.org/-confpaper/8/2023/2**

[77] A. W. Gebisa, H. G. Lemu, T. Y. Lin, S. E. Baker, ve E. B. Duoss, 2017. "A case study on topology optimized design for additive manufacturing", **IOP Conf Ser Mater Sci Eng, c. 276**, sy 1, s. 012026.

[78] J. Üyeleri, A. Oral, ve T. Danışmanı, 2019. "Topoloji optimizasyonu yardımıyla bir alternatörün tasarım eniyilemesi", Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **http://dspace.balikesir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12462/5977**

[79] F. Durak, "Kayış-Kasnak Sisteminde Kullanılan Kasnağın Topoloji Optimizasyonu". Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp**

[80] "(PDF) Yenilikçi Tasarımlar İçin Topoloji Optimizasyonu". Erişim tarihi: Eylül 2024. Erişim adresi: **https://www.researchgate.net/publication/-366822819_Yenılıkcı_Tasarımlar_Icın_Topolojı_Optımızasyonu**

[81] O. Okorie, A. Perveen, D. Talamona, K. Kostas, ve K. Topology, 2023. "Topology Optimization of an Aerospace Bracket: Numerical and Experimental Investigation", **Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 13218**, c. 13, sy 24, s. 13218.

[82] Y. Chen *vd.*, 2021. "Topology Optimization Design and Experimental Research of a 3D-Printed Metal Aerospace Bracket Considering Fatigue Performance", **Applied Sciences, Vol. 11, Page 6671,** c. 11, sy 15, s. 6671.

[83] M. Işık *vd.*, 2021. "Topology optimization and manufacturing of engine bracket using electron beam melting", **Journal of Additive Manufacturing Technologies, c. 1**, sy 3, ss. 583-583.

[84] F. Yilmaz, M. Şahin, ve E. Gürses, 2021. "Weight reduction of an unmanned aerial vehicle pylon fitting by topology optimization and additive manufacturing with electron beam melting", **Journal of Additive Manufacturing Technologies, c. 1**, sy 2, ss. 553-553.

[85] G. Shı, C. Guan, D. Quan, D. Wu, L. Tang, ve T. Gao, 2020. "An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing", **Chinese Journal of Aeronautics, c. 33**, sy 4, ss. 1252-1259.

[86] W. Mansor *vd.*, 2023. "Mass Reduction of a Jet Engine Bracket using Topology Optimisation for Additive Manufacturing Application", *International Journal of Advanced Science and Technology*, c. 29, sy 8s, ss. 4438-4444 Erişim tarihi: Temmuz 2023. Erişim adresi: **https://www.researchgate.net/publication/-342378368**

[87] A. Merulla *vd.*, 2019. "Weight reduction by topology optimization of an engine subframe mount, designed for additive manufacturing production", **Mater Today Proc, c. 19**, ss. 1014-1018.

[88] D. Walton ve H. Moztarzadeh, 2017. "Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation", **Procedia CIRP, c. 60**, ss. 205-210.

[89] M. Seabra *vd.*, 2016. “Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes”, **Procedia Structural Integrity, c. 1**, ss. 289-296.

[90] M. Tomlin, 2011. “Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part”.

[91] Y. Gao, O. T. Picot, E. Bilotti, ve T. Peijs, 2017. “Influence of filler size on the properties of poly(lactic acid) (PLA)/graphene nanoplatelet (GNP) nanocomposites”, **Eur Polym J, c. 86**, ss. 117-131.

[92] “Maintenance and Overhaul Manual for O-470 and IO-470 Series Aircraft Engines”. Erişim tarihi: Aralık 2024. Erişim adresi: **http://www.aeroelectric.com/Reference_Docs/Cessna/cessna-maintenance-manuals/Continental_O-470_IO-470_mx_overhaul_11976.pdf**

[93] “Continental Aircraft Engines Models O-470-K O-470-L O-470-M Maintenance and Overhaul Manual”. Erişim tarihi: Aralık 2024. Erişim adresi: **https://www.csobeech.com/files/TCM-O470-MaintManual.pdf**

[94] “Contınental O-470 And IO-470 Serıes Illustrated Parts Catalog”. Erişim tarihi: Aralık 2024. Erişim adresi: **https://www.csobeech.com/files/TCM-470-PartsManual.pdf**

[95] “Illustrated Parts Catalog for TSIO-520 Series Aircraft Engines”. Erişim tarihi: Aralık 2024. Erişim adresi: **https://www.coyoteflight.com/resources/-Service_Manuals/Teleyne_Continental_TSIO-520_Parts_Catalogue.pdf**

[96] “O-470 Overhaul Manual”. Erişim tarihi: Aralık 2024. Erişim adresi: **https://www.xuefeiji.org/public/uploads/files/20211019/1_20211019151321e4774.pdf**

[97] “470 Avgas Engıne Serıes”. Erişim tarihi: Aralık 2024. Erişim adresi: **https://continental.aero/specsheets/Continental-specsheet-Avgas-470-Engine-Series-v2_WEB.pdf**

[98] “520 Avgas Engıne Serıes”. Erişim tarihi: Aralık 2024. Erişim adresi: **https://superioraviation.com.au/wp-content/uploads/2024/01/520Series-Datasheet.pdf**

[99] M. Sami Güler *vd.*, “Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler”, **Ordu University Journal of Science and Tecnology, c. 5**, sy 1, ss. 56-66, Şub. 2016,

Erişim tarihi: Mart 2025. Erişim adresi: **https://dergipark.org.tr/en/pub/ordubtd/issue/11069/132196**

[100] N. F. Ab Ghani, M. S. Z. Mat Desa, ve M. Bijarimi, 2021. "The evaluation of mechanical properties graphene nanoplatelets reinforced polylactic acid nanocomposites", **Mater Today Proc, c. 42**, ss. 283-287.

[101] B. W. Chieng, N. A. Ibrahim, W. M. Z. W. Yunus, ve M. Z. Hussein, 2014. "Poly(lactic acid)/Poly(ethylene glycol) Polymer Nanocomposites: Effects of Graphene Nanoplatelets", **Polymers 2014, Vol. 6, Pages 93-104,** c. 6, sy 1, ss. 93-104.

[102] N. Fatchurrohman ve S. T. Chia, 2017. "Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: Simulation approach", **IOP Conf Ser Mater Sci Eng, c. 257**, sy 1.

[103] Inc. ANSYS, ANSYS Meshing User's Guide, c. 13.0. 2010.

[104] M. R. Koçak ve İ. Korkut, 2023. "İnsansız Hava Aracı Burun İniş Takımı Çatalı için Topoloji Optimizasyonu Uygulaması", **Politeknik Dergisi, c. 26**, sy 4, ss. 1393-1403.

[105] A. Nazlı ve N. Özsoy, 2024. "Bir Otomobil Salıncağının Topoloji Optimizasyonu", **Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, ss. 607-622**.

[106] G. Shanmugasundar, M. Dharanidharan, D. Vishwa, ve A. P. Sanjeev Kumar, "Design, analysis and topology optimization of connecting rod", **Mater Today Proc, c. 46**, ss. 3430-3438.

[107] A. B. Bodog ve G. Grebenişan, 2022. "An integrated approach of topological optimization with parametric validation and response surfaces, using ANSYS®", **IOP Conf Ser Mater Sci Eng, c. 1256**, sy 1, s. 012014..

[108] "(PDF) Geri Dönüşüm Makinalarında Topoloji Optimizasyonu İle Ağırlık Azaltma UygulamASI". Erişim tarihi: Mart 2025. Erişim adresi: **https://www.researchgate.net/publication/359133780_Gerı_Donusum_Makınalarında_Topolojı_Optımızasyonu_Ile_Agırlık_Azaltma_Uygulaması**

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Hakan Yeşilkaya

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde Motor Bakım ABD	-
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü	2022
Lise	Özel Fentek Temel Lisesi, Kayseri	2018

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2024-Halen	Kapadokya Üniversitesi	Öğr. Gör.
2024-2024	Kayseri Kocasinan Belediyesi İnovasyon Merkezi	Eğitmen

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Hakan Yeşilkaya, Çağrı Vakkas Yıldırım, 2025. Topoloji Optimizasyonu Ve Eklemeli İmalat Kullanılarak Bir Havacılık Braketinin Ağırlığının Azaltılması Ve Nano Grafen Katkısının Pla Filament Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Ankara Internatıonal Congress On Scıentıfıc Research-XI, 621-630.