



**FARKLI TİCARİ TOPOLOJİ
OPTİMİZASYONU YAZILIMLARININ
STATİK VE DİNAMİK PROBLEMLER İÇİN
KARŞILAŞTIRILMASI VE EKLEMELİ
İMALATA YÖNELİK UYGULAMALARI**

Yüksek Lisans Tezi

Baturalp OĞUZ

Eskişehir 2025

**FARKLI TİCARİ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YAZILIMLARININ STATİK
VE DİNAMİK PROBLEMLER İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI VE EKLEMELİ
İMALATA YÖNELİK UYGULAMALARI**

Baturalp OĞUZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgür POYRAZ)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Nisan 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Baturalp OĞUZ'un FARKLI TİCARİ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YAZILIMLARININ STATİK VE DİNAMİK PROBLEMLER İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI VE EKLEMELİ İMALATA YÖNELİK UYGULAMALARI başlıklı çalışması 07/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Makine Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Üye

: Doç. Dr. Koray KILIÇAY

Üye

: Dr. Öğretim Üyesi Erdem ÖZYURT

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Baturalp OğUZ, FARKLI TİCARİ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YAZILIMLARININ STATİK VE DİNAMİK PROBLEMLER İÇİN KARŞILAşTIRILMASI VE EKLEMELİ İMALATA YÖNELİK UYGULAMALARI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

ÖZET

FARKLI TİCARİ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YAZILIMLARININ STATİK VE DİNAMİK PROBLEMLER İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI VE EKLEMELİ İMALATA YÖNELİK UYGULAMALARI

Baturalp OĞUZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Nisan 2025

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgür POYRAZ)

Topoloji optimizasyonu, belirli sınır şartları altında, tasarımın sahip olduğu malzeme miktarını, belirli imalat ve tasarım kısıtlarını göz önünde bulundurarak ve hedef fonksiyona hizmet edecek şekilde yeniden dağıtarak, hafifletme sağlayan bir yapısal tasarım metodudur. Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen geometriler genellikle karmaşık, ince detaylara sahip ve serbest form yüzeyler içeren yapılardır. Bu tür yapıların, üretiminde geleneksel imalat yöntemlerinin yetersiz kalması, yenilikçi imalat yöntemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Eklemeli imalat teknolojilerinin, bu gibi karmaşık yapılar için, yüksek potansiyele sahip bir imalat metodu olmasından dolayı, topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalata yönelik hem ticari hem de akademik alanlarda birçok vaka çalışması yapılmıştır. Ancak, pazarda bulunan ticari optimizasyon yazılımlarının, benzer problemlerin kurgulanmasındaki yetenekleri tartışmaya açıktır. Bu çalışmada ticari optimizasyon yazılımlarından olan Altair-HyperWorks, Ansys ve nTop yazılımları hem statik hem de dinamik problemlerin kurgulanması, çözülmesi, yorumlanması ve doğrulanması kabiliyetleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve eklemeli imalata yönelik uygulamaları çalışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli imalat, Statik topoloji optimizasyonu, Dinamik topoloji optimizasyonu, Deneysel doğrulama

ABSTRACT

COMPARISON OF DIFFERENT COMMERCIAL TOPOLOGY OPTIMISATION SOFTWARE FOR STATIC AND DYNAMIC PROBLEMS AND APPLICATIONS TO ADDITIVE MANUFACTURING

Baturalp OĞUZ

Department of Mechanical Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, April 2025

Supervisor: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

(Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Özgür POYRAZ)

Topology optimisation is a structural design method that provides lightweighting under certain boundary conditions by redistributing the amount of material available in the design to serve the objective function, taking into account certain manufacturing and design constraints. Due to the fact that the geometries obtained by topology optimisation usually have complex, thin elements and free-form surfaces, the capabilities of traditional manufacturing methods are insufficient, which has paved the way for the development of innovative manufacturing methods for the manufacturability of these structures. Due to the high potential of additive manufacturing technologies as a manufacturing method for such complex structures, there have been many case studies on topology optimisation and additive manufacturing in both commercial and academic fields. However, the ability of commercial optimisation software available in the market to construct similar problems is open to debate. In this study, commercial optimisation software such as Altair-HyperWorks, Ansys and nTop are comparatively examined for their ability to set up, solve, evaluate and validate for both static and dynamic problems and their applications to additive manufacturing are studied.

Keywords: Additive manufacturing, Static topology optimisation, Dynamic topology optimisation, Experimental validation.

TEŞEKKÜR

Hayatımın her anında, varlıklarını yanımda hissettiğim değerli ailem başta olmak üzere, çalışma sürem boyunca teknik tecrübelerinden faydalanma şansı bulduğum danışman hocalarım sayın Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK’a, sayın Dr. Öğr. Üyesi Özgür POYRAZ’a, tez sürecimdeki destekleri için çalışma arkadaşlarım, Barış PEHLİVANOĞULLARI, Pelin GÜLSEVEN, Hüseyin Enes ATİPLER ve Serkan ULUKUT’a teşekkür ederim. Ayrıca, akademik faaliyetime desteği için TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.’ye teşekkürlerimi sunarım.

Baturalp OĞUZ



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Baturalp OĞUZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

B.A.Ş.LİK SAYFASI.....I

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI..... II

DANIŞMAN ONAYI III

ÖZET IV

ABSTRACT..... V

TEŞEKKÜR VI

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....VII

İÇİNDEKİLER VIII

TABLolar DİZİNİ..... X

ŞEKİLLER DİZİNİ..... XI

SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ.....XV

1. GİRİŞ17

1.1. Eklemeli İmalat2

1.1.1. Eklemeli imalat avantaj ve dezavantajları3

1.1.2. Bağlayıcı püskürme (binder jetting)9

1.1.3. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (directed energy deposition).....11

1.1.4. Malzeme ekstrüzyonu (material extrusion).....14

1.1.5. Malzeme püskürtme (material jetting)15

1.1.6. Toz yatağında füzyon (powder bed fusion).....17

**1.1.6.1. Lazer ışını ile toz yatağında füzyon (laser beam powder
bed fusion).....18**

**1.1.6.2. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon (electron beam
powder bed fusion)20**

1.1.7. Levha/sac laminasyonu (sheet lamination)21

1.1.8. Stereolithografi (stereolithography).....22

1.2. Topoloji Optimizasyonu (Topology Optimisation)23

2. VAKA ÇALIŞMALARI.....31

2.1. Statik Topoloji Optimizasyonu Problemi	32
2.2. Dinamik Topoloji Optimizasyonu Problemi.....	40
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
3.1. Numune Üretimi ve Boyutsal Doğrulama.....	49
3.1.1. Numune üretimi	50
3.1.2. Boyutsal doğrulama	56
3.1.3. Statik optimizasyon sonuçlarının deneysel doğrulanması	63
3.1.4. Dinamik optimizasyon sonuçlarının deneysel doğrulanması.....	67
4. SONUÇLAR	72
KAYNAKÇA	75
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalata yönelik uygulamaların bulunduğu çalışmalar	28
Tablo 2.1. In718 ortotropik malzeme özellikleri [80].....	33
Tablo 2.2. Küp geometrisine uygulanan FEA sonuçları	35
Tablo 2.3. Ticari yazılımların statik optimizasyon performansları ve .STL çıktıları.....	37
Tablo 2.4. Final geometrilere uygulanan FEA sonucunda elde edilen maksimum gerilme ve deplasman değerleri	39
Tablo 2.5. Başlangıç modal analiz sonuçları	42
Tablo 2.6. Ticari yazılımların dinamik optimizasyon performansları ve .STL çıktıları.....	44
Tablo 2.7. Doğrulama analizleri sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri	47
Tablo 3.1. Deneyssel doğrulama faaliyetlerinde kullanılmak üzere üretilen numuneler	49
Tablo 3.2. Üç farklı oryantasyonda destek miktarları, katman sayıları ve sökülebilirlik	52
Tablo 3.3. Üç farklı oryantasyonda destek miktarları, katman sayıları ve sökülebilirlik	53
Tablo 3.4. Küp geometrilerinin 225 kN ve 260 kN yük değerlerindeki şekilde değiştirme (mm/mm) değerleri, ilk ve son boyları	66
Tablo 3.5. Braket geometrilerinin serbest şartlarda (ing. Free-free) modal analiz sonuçları.....	67
Tablo 3.6. Braket geometrilerinin çekiç testi sonucunda, 0-12800 Hz aralığında sahip oldukları mod sayıları ve karşılık gelen doğal frekans değerleri	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Eklemeli imalat süreç zinciri	2
Şekil 1.2. Eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü avantajına yönelik uygulamalar (a) TEI eklemeli imalat ile karmaşık motor parçası uygulaması [http-2] (b) TEI-TJ90 yanma odası uygulaması [http-3] (c) Isı eşanjörü uygulaması [http-4] (d) Cobra Aero hava soğutmalı silindir ve kafes uygulaması [http-5] (e) Biyomedikal spinal kafes implant uygulaması [http-6] (f) Optimize edilmiş kesici takım uygulaması [7]	4
Şekil 1.3. Eklemeli imalatın kişiselleştirme avantajına yönelik uygulamalar (a) Kişiye özel dental uygulamalar [http-7] (b) Kişiye özel kalça implantı [http-8] (d) Kişiye özel kraniyal implant [http-9]	5
Şekil 1.4. Eklemeli imalat ve çoklu malzemeler kullanılarak üretilen yapılar (a) Konsept yanma odası tasarımı [http-10] (b) Isı eşanjörü uygulaması [http-11] (c) Nikel matrisli metal kompozit malzemeden üretilmiş hava-yakıt karıştırıcısı [http-12]	6
Şekil 1.5. Eİ teknolojilerinde destek yapıları (a) LB-PBF destek yapıları [http-13] (b) EB-PBF destek yapıları [http-14] (c) FDM destek yapıları [http-15] (d) SLA destek yapıları [http-16]	7
Şekil 1.6. Destek yapılarına gereksinim (a) Çarpılmayı önlemek için oluşturulan ancak başarısız olan destek yapıları [http-17] (b) Desteksiz üretilen sarkan yüzeyler cüruf ve porozite oluşumu [8]	8
Şekil 1.7. EB-PBF yöntemi ile üretilmiş optimize çatal ucu parçası [http-18] (a) Ardıl işlemler öncesi (b) Ardıl işlemler sonrası	9
Şekil 1.8. Bağlayıcı püskürtme proses şeması [http-22]	10
Şekil 1.9. BJ ile üretilmiş parçalar (a) BJ teknolojisi ile üretilmiş silindir kapağı [http-23] (b) BJ teknolojisi ile üretilmiş In625 manifold [http-24] (c) BJ teknolojisi ile üretilmiş 17-PH swirler [http-24] (d) BJ teknolojisi ile üretilmiş In625 yağ-hava impelleri [http-24]	11
Şekil 1.10. DED proses şeması (a) Plazma enerji kaynağı (b) Lazer enerji kaynağı [15]	11
Şekil 1.11. DED uygulamaları (a) Rolls-royce BR715 motoruna ait yüksek basınç türbin case (ing. HPT case) parçasının DED teknolojisi ile tamir uygulaması [20] (b) DED teknolojisi ile paslanmaz çelik malzemeden üretilen türbin gövde muhafaza (ing. Turbine housing) parçası [20] (c) DED teknolojisi ile Ti ₆ Al ₄ V malzeme kullanılarak onarılan Rolls-royce BR715 motoruna ait yüksek basınç kompresör (ing. HPC drum) parçası [20]	13

Şekil 1.12. DED teknolojisi ile üretilen çoklu malzemeye sahip yapılar(a) In625 nikel süperalaşım ve 304L paslanmaz çelik malzemeler kullanılarak DED teknolojisi ile üretilen fonksiyonel geçişli numune [21] (b) P21 takım çeliği ve Ampcoloy 940 kullanılarak üretilen soğutma kalıbı [22]	13
Şekil 1.13. FDM proses şeması [27].....	14
Şekil 1.14. FDM uygulamaları (a) FDM ile inşaa edilen konut [http-25] (b) FDM ile üretilmiş kişiselleştirilmiş enstürman tasarımı [http-26] (c) FDM ile üretilmiş ayakkabı [http-27] (d) FDM ile üretilmiş tekne gövdesi [http-28] (e) FDM ile üretilmiş kişiye özel medikal kol desteği [http-29] (f) FDM ile üretilmiş kafatası modeli [http-30] (g) FDM teknolojisi ile üretilmiş araba gövdesi [http-31] (h) FDM ile üretilmiş barınak [http-31].....	15
Şekil 1.15. MJ proses şeması [32]	16
Şekil 1.16. MJ teknolojisi ile renklendirilerek üretilmiş modeller (a) MJ teknolojisi ile üretilmiş türbin döküm [28] (b,c) Renkli biyomedikal modeller [http-32].....	17
Şekil 1.17. LB-PBF proses şeması [46].....	18
Şekil 1.18. EB-PBF proses şeması [53].....	20
Şekil 1.19. EB-PBF ile üretilmiş TiAl türbin bıçakları [54]	21
Şekil 1.20. SL proses şeması [53].....	22
Şekil 1.21. SLA proses şeması [64].....	23
Şekil 1.22. Topoloji optimizasyonu akış şeması	24
Şekil 1.23. Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat uygulamaları (a) Optimize edilmiş Airbus A350 XWB kablo yönlendirme braketi [http-33] (b) Optimize edilmiş Sentinel uydu braketi [http-34] (c) Optimize edilmiş Airbus A380 kemer tokası [65] (d) Optimize edilmiş Airbus A350 XWB kabin braketi [65].....	26
Şekil 2.1. Küp geometrisine ait tasarım ve tasarım dışı uzay gösterimi.....	32
Şekil 2.2. Eleman tipleri (a) Hexahedral (b) Tetrahedral (c) Tetrahedral mesh geometri.....	33
Şekil 2.3. Yazılımlarda oluşturulan mesh geometrileri ve sınır şartları (a) HyperWorks modeli (b) Ansys modeli (c) nTop modeli	34
Şekil 2.4. Yazılımlarda alınan FEA sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop ...	34

Şekil 2.5. Cezalandırma faktörünün Ansys’de uygulanabilirliği (a) P:1 (b) P:3 (c) P:7 [http-38]	36
Şekil 2.6. Sınır cezalandırmasının etkisi (a) 0 değeri (b) 0.5 değeri (c) 1 değeri	36
Şekil 2.7. 0.3 eşik değerinde kalan tasarım uzayları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop	37
Şekil 2.8. .STL’den katı modele dönüştürülmüş topoloji optimizasyonu sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop	38
Şekil 2.9. Optimizasyon sonrası final geometrileri uygulanan FEA sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop	39
Şekil 2.10. Üçgen braket geometrisi (a) Başlangıç geometri ve (b) Tasarım uzayı ve tasarım dışı uzay	40
Şekil 2.11. Oluşturulan mesh geometri ve sınır şartları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop	41
Şekil 2.12. Modal analiz sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop	41
Şekil 2.13. Doğal frekans kısıtının optimizasyon sonucu üzerine etkisi (a) nTop doğal frekans kısıt eklenmemiş sonuç (b,c,d) sırasıyla 1. 2. ve 3. modların doğal frekanslarının kısıt olarak eklendiği durumda sonuçlar (e) HyperWorks doğal frekans kısıt eklenmemiş sonuç (f,g,h) sırasıyla 1. 2. ve 3. modların doğal frekanslarının kısıt olarak eklendiği durumda sonuçlar (i) Ansys doğal frekans kısıt eklenmemiş sonuç (j,k,l) sırasıyla 1. 2. ve 3. modların doğal frekanslarının kısıt olarak eklendiği durumda sonuçlar	43
Şekil 2.14. .STL’den katı modele dönüştürülmüş optimizasyon sonuçları (a,b,c) HyperWorks sırasıyla 1. 2. ve 3. modun kısıtlanması ile elde edilen sonuçlar (d,e,f) Ansys sırasıyla 1. 2. ve 3. modun kısıtlanması ile elde edilen sonuçlar (g,h,i) nTop sırasıyla 1. 2. ve 3. modun kısıtlanması ile elde edilen sonuçlar	46
Şekil 3.1. Küp geometrilerinin farklı oryantasyonlardaki destek ihtiyacı	51
Şekil 3.2. Braket geometrilerinin farklı oryantasyonlardaki destek ihtiyacı	53
Şekil 3.3. LB-PBF imalat düzeni	54
Şekil 3.4. LB-PBF imalat adımları (a) LB-PBF üretim adımı (b) LB-PBF imalat sonrası parçaların üretim platformu üzerinde ve destek yapıları halleri (c) Gerilim giderme ısıtma işlemi sonrası ve oluşan oksitlenen tabakası (d) Tel erozyon ile üretim platformundan ayırma işlemi (e) Küp geometrilerinin destek temizliği sonrası halleri (f) Braket geometrilerinin ayırma işlemi sonrası halleri	55

Şekil 3.5. Başlangıç üçgen braket geometrisinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması	57
Şekil 3.6. HyperWorks ile elde edilen braket ve küp geometrilerinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması ..	58
Şekil 3.7. Ansys ile elde edilen braket ve küp geometrilerinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması	60
Şekil 3.8. nTop ile elde edilen braket ve küp geometrilerinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması	61
Şekil 3.9. Simufact additive ortamında tekrar örülen mesh ile .STL dosyasının yüzeyi arasındaki sapma.....	62
Şekil 3.10. Basma testi öncesi taşlanan yüzeyler	63
Şekil 3.11. Küp geometrilerinin basma testi düzeneğinde yerleşimleri	64
Şekil 3.12. Küp geometrilerinin basma testi sonucunda elde edilen yük-şekil değiştirme eğrileri (a) HyperWorks küp sonucu (b) Ansys küp sonucu (c) nTop küp sonucu	65
Şekil 3.13. Braket geometrilerinin çekiç testi düzeneğinde yerleşimleri ve ivme ölçer pozisyonları (a) Başlangıç üçgen braket geometrisi (b) HyperWorks braket sonucu (b) Ansys braket sonucu (c) nTop braket sonucu	68
Şekil 3.14. Çekiç testi sonucunda elde edilen doğal frekans ve faz grafikleri (a) Başlangıç üçgen braket geometrisi (b) HyperWorks braket sonucu (c) Ansys braket sonucu (d) nTop braket sonucu	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

.STL	: Standart Triangular Language (Standart Üçgenleştirme Dili)
2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Testler Derneği)
BJ	: Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
DED	: Directed Energy Deposition (Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme)
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Lazer ile Metal Sinterleme)
DMP	: Direct Metal Printing (Doğrudan Metal Basımı)
EB-PBF	: Electron Beam Powder Bed Fusion (Elektron Işını ile Toz Yatağında Füzyon)
Eİ	: Eklemeli İmalat
FDM	: Fused Deposition Modelling (Ergiyik Yığarak Modelleme)
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
HIP	: Hot Isostatic Pressing (Sıcak İzostatik Presleme)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standart Organizasyonu)
LB-PBF	: Laser Beam Powder Bed Fusion (Lazer Işını ile Toz Yatağında Füzyon)
LMF	: Lazer Metal Fusion (Lazer ile Metal Füzyonu)
ME	: Material Extrusion (Malzeme Ekstrüzyonu)
MJ	: Material Jetting (Malzeme Jeti)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
PBF	: Powder Bed Fusion (Toz Yatağında Füzyon)
SIMP	: Solid Isotropic Material with Penalization (Cezalandırma Metodu)

SL	: Sheet Lamination (Levha/Sac Laminasyonu)
SLM	: Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
SLA	: Stereolithography (Stereolithografi)
TEI	: Tusas Engine Industries (Tusaş Motor Sanayi)
TO	: Topology Optimisation (Topoloji Optimizasyonu)
UV	: Ultraviole (Mor Ötesi)



1. GİRİŞ

Teknolojinin geçmişten günümüze devam eden gelişme süreci, kullanıcı ihtiyaçlarına cevap verme hedefiyle başlamış ve havacılık-uzay, enerji, tıp, endüstri gibi pek çok alanda mühendislik faaliyetlerini geliştirmeye ve hızlandırmaya zorlamıştır. Mühendislik faaliyetlerinin, kullanıcılar için yüksek performans ve etkin maliyetlerle sunulması gerekliliği, hem tasarım hem de imalat süreçlerinde yenilikçi teknoloji ve yöntemlerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Geleneksel imalat yöntemlerinin (ing. Conventional Manufacturing Methods), yenilikçi ve karmaşık tasarımların gerçekleşmesinde yetersiz kalmasından dolayı, gelişmiş imalat yöntemlerinin çeşitli sektörlerde kullanılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Eklemeli imalat teknolojileri (ing. Additive Manufacturing Technologies), geleneksel yöntemlerle birlikte kullanıldığında karmaşık tasarımların gerçekleştirilmesinde etkin bir rol üstlenmiş ve giderek daha popüler hale gelmiştir.

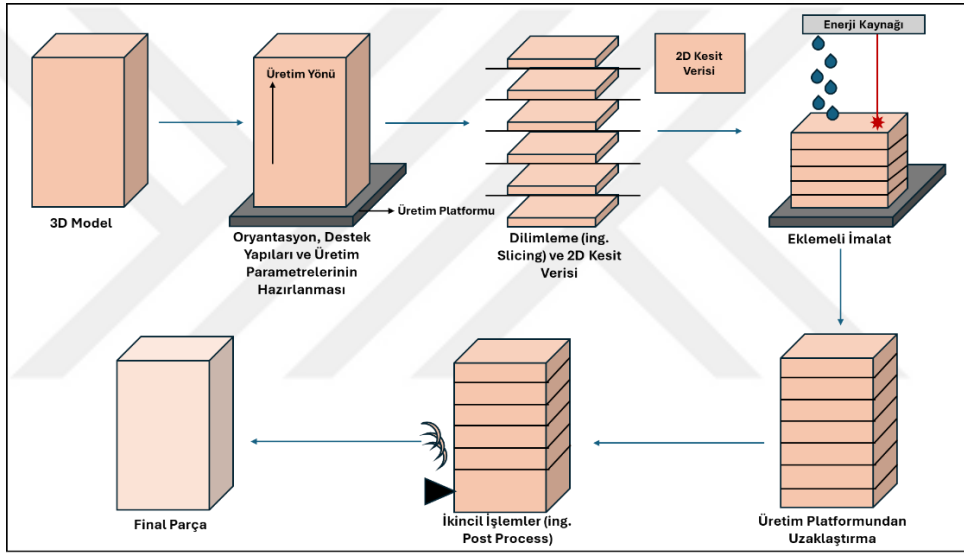
Özellikle, hammaddenin maliyetinin yüksek olduğu medikal, havacılık ve uzay sektörlerinde; hafifletilmiş, karmaşık tasarımların ve kişiye özel uygulamaların geleneksel yöntemlerle üretilmemesi veya yüksek takım/kalıp maliyetleri gerektirmesi gibi sorunlar, eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu yüksek tasarım özgürlüğü sayesinde çözümlenmiş ve bu teknolojilerin potansiyeli ortaya konulmuştur.

Havacılık ve uzay sektöründe, parça ağırlıklarının tasarım performansı ve uçuş maliyetleri üzerinde bir kısıt oluşturması, çeşitli parçaların hafifletilmesine yönelik girişimlere yol açmıştır. Bu süreç, literatürde topoloji optimizasyonu (ing. Topology Optimisation) olarak bilinen yapısal tasarım yönteminin temelini oluşturmuştur. Optimize edilmiş tasarımlar genellikle karmaşık tasarım uzaylarına sahip olması, eklemeli imalat teknolojileri için bir uygulama alanı oluşturmuş ve birlikte kullanıldıklarında hafifletilmiş, etkin maliyetli ürünlerin gerçekleştirilmesinde etkili bir çözüm olduğunu kanıtlamıştır.

Bu çalışmada, farklı ticari topoloji optimizasyonu (TO) yazılımlarının performansları hem statik hem de dinamik problemler açısından karşılaştırmalı bir perspektifle incelenmiş ve eklemeli imalata (Eİ) yönelik uygulamaları araştırılmıştır.

1.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat teknolojileri, bir parçanın üç boyutlu (3B) model verisinin, belirli bir üretim yönünde ve belirli bir katman (ing. Layer) kalınlığında dilimlenerek, iki boyutlu (2B) dilimlenmiş kesit verilerine ayrılması ve ardından farklı enerji kaynakları ve malzemeler kullanılarak bu 2B kesitlerin, üretim yönünde üst üste birleştirilmesi ile parça üretimi gerçekleştirmektedir [1]-[6]. Çeşitli bilgisayar destekli tasarım (ing. Computer Aided Design, CAD) yazılımlarından, standart üçgenleştirme dilinde (ing. Standart Triangular Language, STL) dışarıya aktarılan (ing. Export) model verisinden başlayarak final ürüne kadarki imalat süreci Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Eklemeli imalat süreç zinciri

ASTM F2792-12 standardı, eklemeli imalat teknolojilerini, yedi alt teknoloji olarak gruplamaktadır [http-1]. Bu teknolojiler şunlardır:

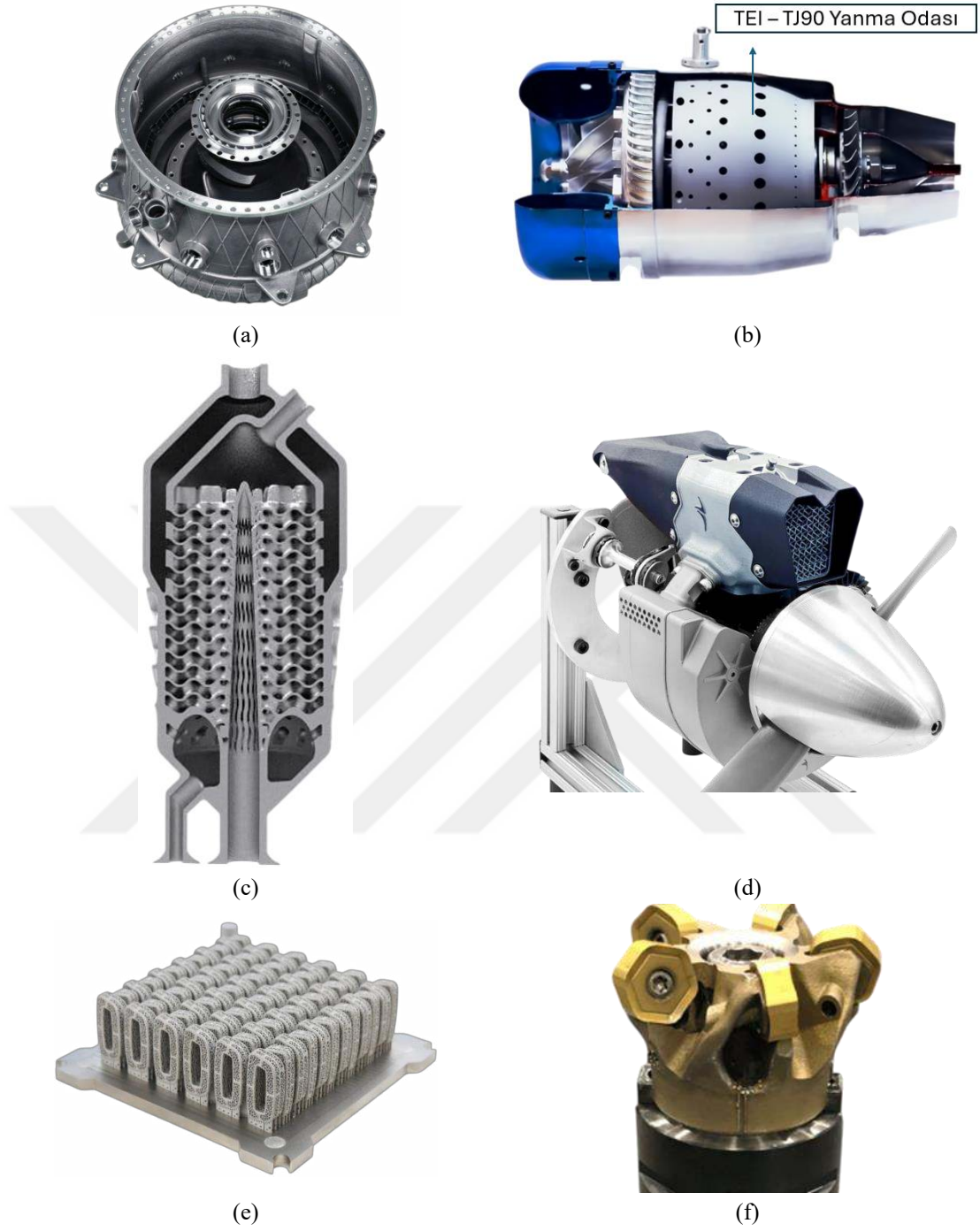
- Bağlayıcı püskürtme (ing. Binder jetting, BJ)
- Yönlendirilmiş enerji biriktirme (ing. Directed energy deposition, DED)
- Malzeme ekstrüzyonu (ing. Material extrusion, ME)
- Malzeme püskürtme (ing. Material jetting, MJ)
- Toz yatağında füzyon (ing. Powder bed fusion, PBF)
 - Lazer ışını ile toz yatağında füzyon (ing. Laser beam powder bed fusion, LB-PBF)

- Elektron ışını ile toz yatağında füzyon (ing. Electron beam powder bed fusion, EB-PBF)
- Levha/sac Laminasyonu (ing. Sheet lamination, SL)
- Stereolithografi (ing. Stereolithography, SLA)

1.1.1. Eklemeli imalat avantaj ve dezavantajları

Eklemeli imalat teknolojileri, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu durum eklemeli imalat teknolojilerinin tek başına geleneksel imalat yöntemlerinin yerini almasından ziyade, geleneksel yöntemlerle birlikte kullanıldığında, daha verimli çıktılar oluşturduğu gerçeğini ortaya koymaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerinin, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, avantajları şunlardır:

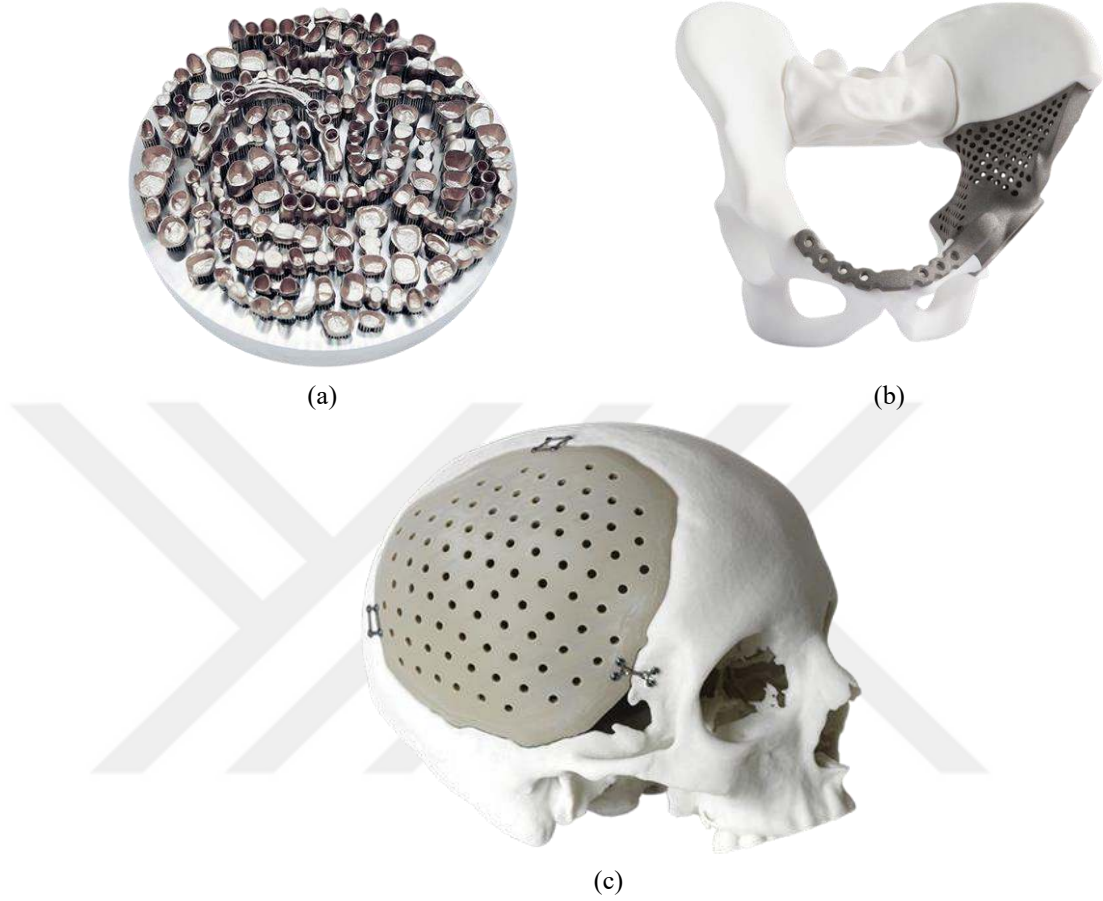
- **Tasarım özgürlüğü (ing. Design freedom):** Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor veya bir kaç farklı geleneksel yöntemden faydalanarak üretilebilecek tasarımlar, eklemeli imalat ile bütünleşik biçimde üretilebilir. Şekil 1.2a'da Eİ teknolojilerinin, tasarım özgürlüğü ve konsolidasyon avantajına örnek olarak, TEI (Tusas Engine Industries) tarafından LB-PBF yöntemi ile üretilmiş karmaşık motor parçası [http-2] ve Şekil 1.2b'de TEI-TJ90 Turbojet motoruna ait, 9 alt parçanın tek parça halinde tasarlandığı, In625 malzemeden LB-PBF yöntemi ile üretilmiş yanma odası gösterilmiştir [http-3]. Havacılık ve uzay uygulamalarında, karmaşık formda kafes yapıları (ing. Lattice structures), hafifletme ve ısı yönetimi (ing. Thermal management) uygulamalarında kullanılmaktadır. Şekil 1.2c ve Şekil 1.2d kafes yapılarının, havacılık ve uzay sektöründe, ısı yönetimi ve hafifletme amaçlı kullanımları ve LB-PBF teknolojisine yönelik uygulamaları gösterilmiştir. Eİ teknolojilerinin, tasarım özgürlüğü avantajının, biyomedikal kafes uygulamasındaki örneği Şekil 1.2e'de gösterilmiştir. Karmaşık kafes yapıları biyo-medikal implant uygulamalarında doğal fiksasyonu arttırmak amaçlı kullanılmaktadır. Tasarım özgürlüğü avantajına endüstriyel örnek olarak, Şekil 1.2f'de, performans arttırmaya yönelik optimize edilmiş kesici takım uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü avantajına yönelik uygulamalar (a) TEI eklemeli imalat ile karmaşık motor parçası uygulaması [http-2] (b) TEI-TJ90 yanma odası uygulaması [http-3] (c) Isı eşanjörü uygulaması [http-4] (d) Cobra Aero hava soğutmalı silindir ve kafes uygulaması [http-5] (e) Biyomedikal spinal kafes implant uygulaması [http-6] (f) Optimize edilmiş kesici takım uygulaması [7]

- **Kişiselleştirme (ing. Customisation):** Eİ teknolojileri, geleneksel üretim yöntemleri karşılaştırıldığında, takım, fişkür, kalıp vb. İhtiyacı olmaksızın parça üretimi gerçekleştirebilmektedir. Bu durum, kişiselleştirilmiş ürünlerin, prototiplenmesinde veya ardışık tasarım iterasyonlarının prototiplenmesinde

takvim ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Şekil 1.3'te Eİ ile üretilmiş kişiye özel dental ve biyomedikal implant uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Eklemeli imalatın kişiselleştirme avantajına yönelik uygulamalar (a) Kişiye özel dental uygulamalar [http-7] (b) Kişiye özel kalça implantı [http-8] (c) Kişiye özel kraniyal implant [http-9]

- **Çoklu malzeme uygulamaları (ing. Multi material applications):** PBF, DED, MJ, FDM gibi eklemeli imalat yöntemleri ile birden fazla malzemenin, aynı parçanın imalatında kullanılması mümkündür. Bu durum, tasarımların performansının artırılmasında bir avantaj oluşturmaktadır. Şekil 1.4a'da ve Şekil 1.4b'de LB-PBF yöntemiyle çoklu metal malzemelerden üretilmiş, konsept yanma odası tasarımı ve eşanjör uygulaması gösterilmiştir. Ek olarak, metal tozlarının çeşitli seramik katkılarla karıştırılarak, yüksek sıcaklık performansı artırılmış malzemeler ile üretim yapmak mümkündür. Şekil 1.4c'de ise NASA'ya [http-12] ait nikel metal matrisli kompozit malzemedan (GRX-810), LB-PBF yöntemi ile üretilmiş ve 2000 °F sıcaklıkta performans gösteren, yakıt-hava karıştırıcısı (ing. Fuel-air mixer) gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

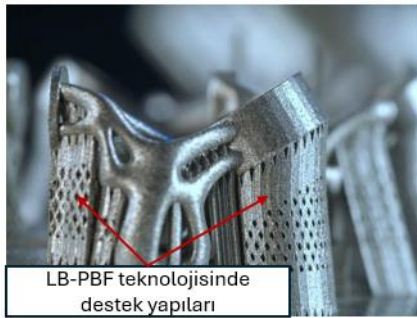
Şekil 1.4. Eklemeli imalat ve çoklu malzemeler kullanılarak üretilen yapılar (a) Konsept yanma odası tasarımı [http-10] (b) Isı eşanjörü uygulaması [http-11] (c) Nikel matrisli metal kompozit malzemeden üretilmiş hava-yakıt karıştırıcısı [http-12]

- **Küçük ölçekli seri üretim (ing. Mass production):** Eİ teknolojileri ile, küçük ölçekli parçaların, tek seferde ve yüksek miktarda üretilmesi mümkündür [1]-[2].
- **Hammadde avantajı (ing. Material advantage):** Talaşlı imalat (ing. Machining) gibi blok malzemeden boşaltmalı yöntemlere göre, Eİ teknolojileri ile finale yakın (ing. Near net shape) parça üretmek mümkündür. Bu durum daha düşük alış-uçuş oranına (ing. Buy-to-fly ratio) sahip parça imalatı açısından maliyet avantajı oluşturmaktadır [1]-[2].

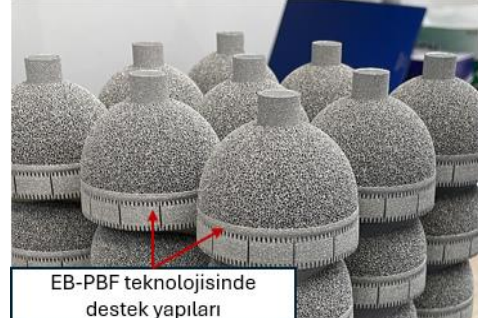
Eİ teknolojileri, sağladığı avantajlarla birlikte geleneksel yöntemlere üstünlük oluştursa da beraberinde getirdiği dezavantajlar nedeniyle, geleneksel imalat

yöntemlerini de içeren ikincil işlemlere (ing. Post processing) ihtiyaç duymaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerinin dezavantajları ve imalat kısıtlarına örnekler şöyledir:

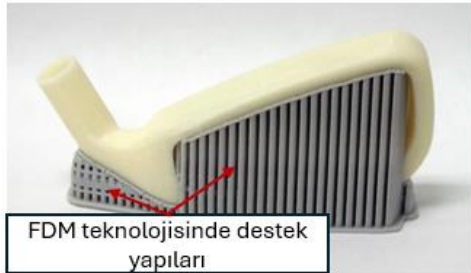
- **Destek yapıları (ing. Support structure):** Destek yapıları, LB-PBF, EB-PBF, SLA, FDM, MJ yöntemlerinde kullanılan ve parça ile birlikte üretilip, imalat sonrası parça üzerinden uzaklaştırılan atık malzemeyi (ing. Waste material) temsil etmektedir [1]-[2]. Tezgah üretim platformu ile arasında yaklaşık 40-45° açı değerinden daha küçük açı değerine sahip yüzeyler, sarkan yüzeyler (ing. Overhang surface) olarak anılmaktadır ve destek yapıları ile desteklenmelidir. (bkz. Şekil 1.5). Özellikle metal Eİ sistemlerinin yüksek termal çevrimlere sahip olması, parça üzerinde kalıntı gerilmelere (ing. Residual stress) ve dolayısıyla çarpılmalara (ing. Warping) neden olmaktadır (Bkz. Şekil 1.6a). Bu hususta destek yapıları parça üzerindeki ısıyı dağıtmak amaçlı kullanılmaktadır. [1]-[2]. Ayrıca, sarkan yüzeylerde, yüzey altı porozite (ing. Sub-surface porosity) ve cüruf oluşumunu (ing. Dross formation) engellemek (Bkz. Şekil 1.6b), parçayı üretim platformuna bağlamak ve yer çekimi, serici (ing. Re-coater) temas kuvvetlerinden etkilenmesini engellemek amaçlarıyla destek yapıları kullanılmaktadır.



(a)



(b)

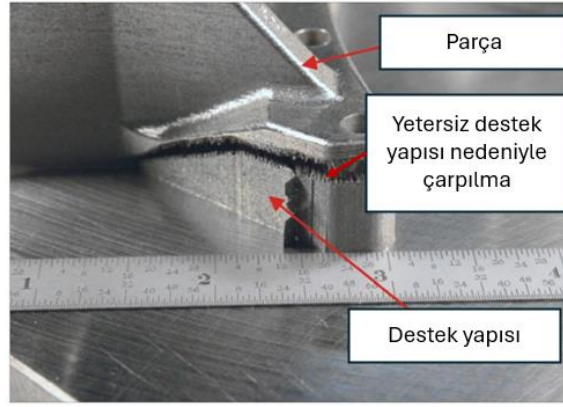


(c)

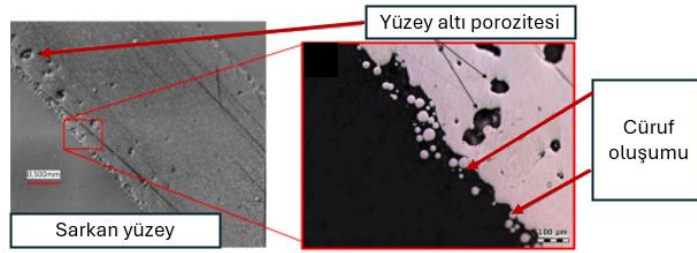


(d)

Şekil 1.5. Eİ teknolojilerinde destek yapıları (a) LB-PBF destek yapıları [http-13] (b) EB-PBF destek yapıları [http-14] (c) FDM destek yapıları [http-15] (d) SLA destek yapıları [http-16]



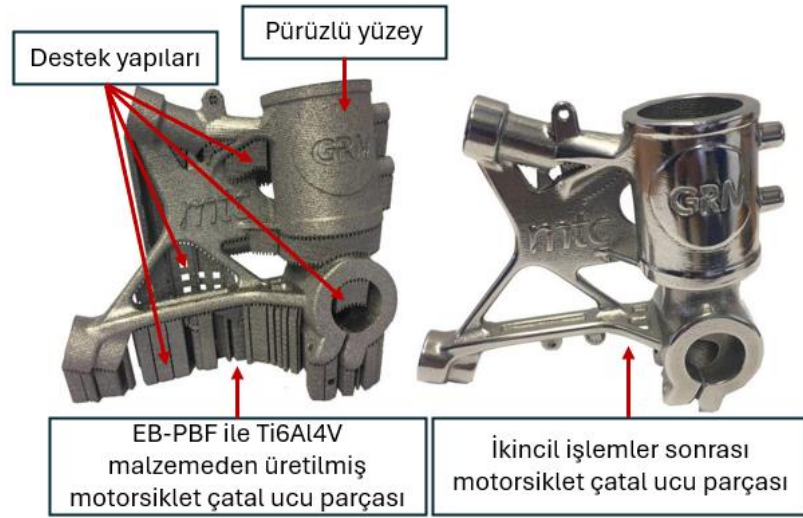
(a)



(b)

Şekil 1.6. Destek yapılarına gereksinim (a) Çarpılmayı önlemek için oluşturulan ancak başarısız olan destek yapıları [http-17] (b) Desteksiz üretilen sarkan yüzeyler cüruf ve porozite oluşumu [8]

- **Ardıl işlem gereksinimi (ing. Post processing):** Eİ teknolojileri ile üretilen parçalara, artık gerilmelerin uzaklaştırılması adına gerilim giderme (ing. Stress relief), kürleme (ing. Curing), anizotropinin giderilmesi ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi adına; sinterleme (ing. Sintering), yaşlandırma (ing. Ageing), tavlama (ing. Annealing), çözeltiye alma (ing. Solution heat treatment) veya sıcak izostatik presleme (ing. Hot isostatic pressing, HIP) gibi ikincil ısıl işlemler uygulanmaktadır [1]-[2]. Ayrıca, Eİ ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüklerinin yüksek olması, parçaların üretim platformu üzerinden ayrılması ve destek yapılarının uzaklaştırılması gerekliliği, ikincil kesme ve yüzey iyileştirme işlemlerine ihtiyaç oluşturmaktadır (Bkz. Şekil 1.7). Bu durum, parça başı maliyetler açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

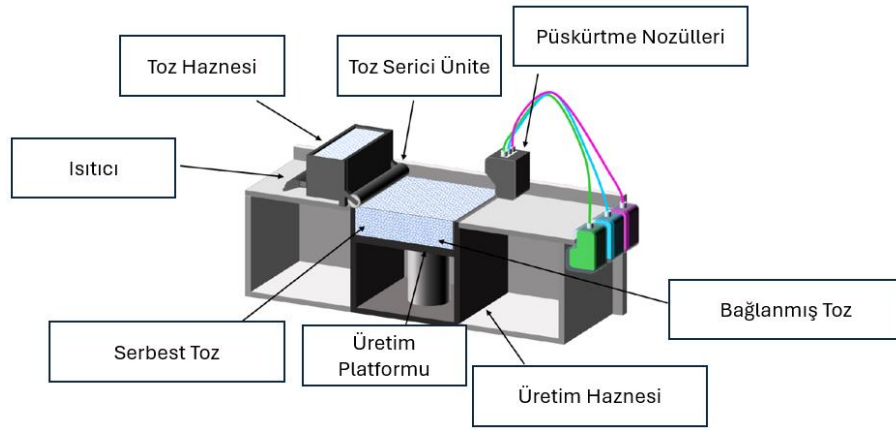


Şekil 1.7. EB-PBF yöntemi ile üretilmiş optimize çatal ucu parçası [http-18] (a) Ardıl işlemler öncesi (b) Ardıl işlemler sonrası

- **Kısıtlı üretim hacmi (ing. Limited build volume):** Üretilabilir parça boyutları, tezgah üretim hacmi ile kısıtlıdır. Ancak pazarda, yaklaşık 1-1.5 metre yüksekliğe kadar parça üretililecek metal ve polimer sistemler bulunmaktadır [http-19]-[http-21].
- **Kısıtlı malzeme seçeneği:** Eİ teknolojilerinin, kabiliyetinde olan malzeme seçenekleri, geleneksel yöntemlere göre daha kısıtlıdır.
- **Yüksek yatırım maliyetleri:** Özellikle, endüstriyel uygulamalar için kullanılan tezgah ve malzemelerin ilk yatırım maliyetleri yüksektir.

1.1.2. Bağlayıcı püskürme (binder jetting)

BJ teknolojisinde, bağlayıcı reçine bir püskürtme nozülü içerisinde, toz yatağı üzerin damlatılır ve ilgili katmandaki kesit alanı içerisindeki tozlar bu bağlayıcı ile birbirlerine bağlanır. Toz yatağının pozisyonu bir katman kalınlığı kadar alçaltılır ve yeni katman toz serilerek bağlayıcı damlatılır ve bu döngü parça yüksekliği boyunca tekrar eder [9]-[14]. Bağlayıcı püskürtme proses şeması Şekil 1.8’de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Bağlayıcı püskürtme proses şeması [http-22]

BJ teknolojisinin, diğer Eİ teknolojileri arasındaki önemli karakteristikleri şunlardır [9]-[14]:

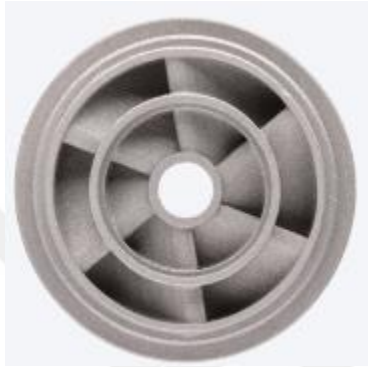
- PBF teknolojilerinde gerçekleşen hızlı ve ergime katılma çevrimleri nedeniyle oluşan artık gerilmeler, BJ teknolojisinin, herhangi bir ergime ve katılma çevrimine sahip olmamasından dolayı oluşmamaktadır. Bu nedenle destek yapısı (ing. Support structure) gereksinimi yoktur.
- Destek yapılarına ihtiyaç olmamasından dolayı, parçalar üretim hacmi içerisinde, farklı yükseklerde ve alternatif oryantasyonlarda istiflelenebilir.
- PBF teknolojilerine göre, daha hızlı ve ham malzeme açısından daha düşük maliyete sahip olmasından dolayı, otomotiv, endüstri, havacılık ve uzay sektöründe uygulama alanına sahiptir (bkz. Şekil 1.9).
- Kullanılan toz parçacıkları bir yapıştırma mekanizması ile birbirlerine bağlandıkları için üretilen ilk parçaya, yeşil parça (ing. Green part) denilmektedir. Yeşil parçanın boşluklu yapısından dolayı, yoğunluk ve mekanik performansı düşüktür. Bu nedenle, bağlayıcıyı uzaklaştırmak ve bağlama mekanizmasını güçlendirmek için arındırma (ing. Debinding), sinterleme (ing. Sintering) veya sıcak izostatik presleme (ing. Hot Isostatic Pressing, HIP) ardıl işlemleri yapılmaktadır.
- Sinterleme veya HIP nedeniyle, parça üzerinde boyutsal bozunmalar gerçekleşebilir.
- Bu teknoloji ile kullanılabilen ham malzemeler ise toz formdaki metal, seramik, polimer, biyomalzemeler ve kompozitlerdir.



(a)



(b)



(c)

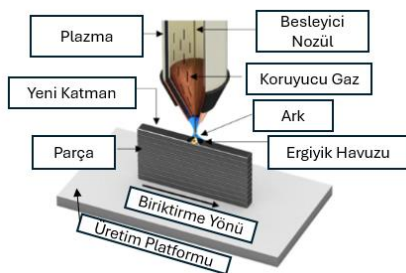


(d)

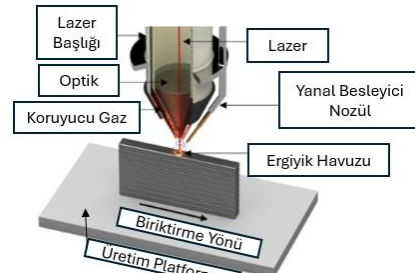
Şekil 1.9. BJT ile üretilmiş parçalar (a) BJT teknolojisi ile üretilmiş silindir kapağı [http-23] (b) BJT teknolojisi ile üretilmiş In625 manifold [http-24] (c) BJT teknolojisi ile üretilmiş 17-PH swirl [http-24] (d) BJT teknolojisi ile üretilmiş In625 yağ-have impelleri [http-24]

1.1.3. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (directed energy deposition)

DED teknolojisinde, ilgili 2B kesiti (katmanı) oluşturmak için, toz veya tel formdaki malzeme, üretim platformu üzerine, bir veya daha fazla nozül yardımı ile beslenirken, eş zamanlı olarak lazer ışını, elektron ışını veya plazma/elektrik ark enerjisi kullanılarak, koruyucu atmosfer altında ergitilir. Bu besleme-ergitme çevriminin parça yüksekliği boyunca tekrar ederek parça üretimi tamamlanır [15][22]. DED proses şeması Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



(a)

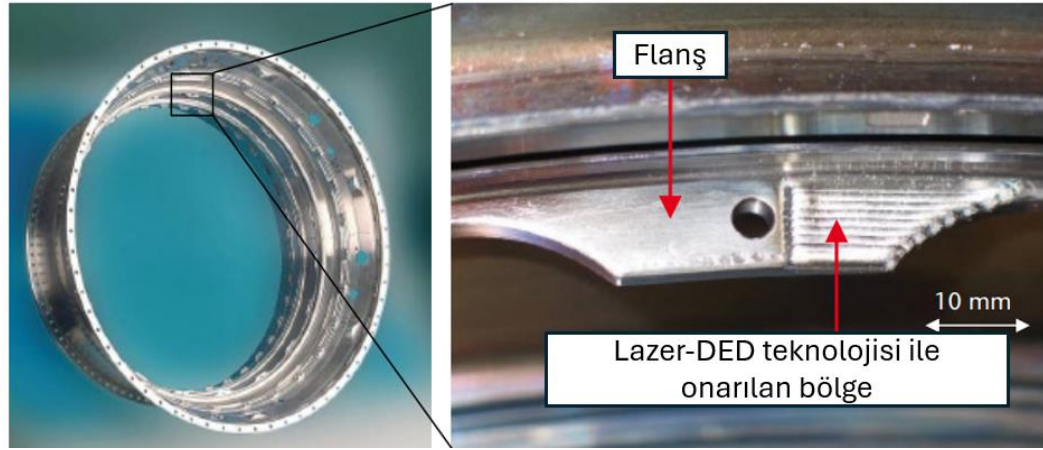


(b)

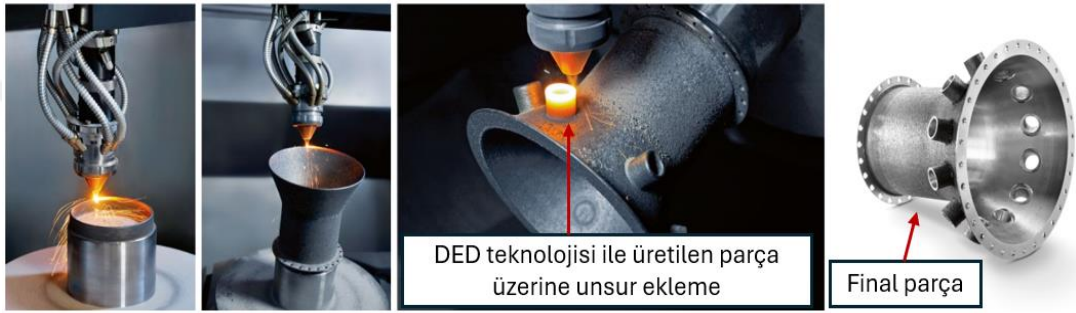
Şekil 1.10. DED proses şeması (a) Plazma enerji kaynağı (b) Lazer enerji kaynağı [15]

DED teknolojisinin, diğer Eİ teknolojileri arasındaki önemli karakteristikleri şunlardır [15]-[22]:

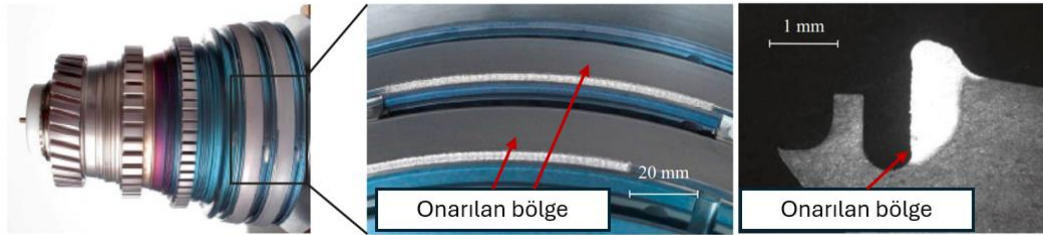
- Birden fazla malzeme besleyici nozülün bulunduğu sistemlerde, malzeme besleme oranlarını geliştirerek, proses esnasında alaşımlama yapmak mümkündür.
- Çok eksenli malzeme besleme nozüllerinin ve hareketli üretim platformunun bulunduğu veya enerji kaynağının robotik bir kol yardımı ile hareket ettirildiği sistemler ile daha karmaşık tasarımlar üretilebilir.
- Yarı mamül bir parça üzerine, çeşitli takviye unsurlar (ing. Rib) veya aksesuarlar eklenilebilir. Ayrıca, deforme olmuş bir parçada tamir uygulaması yapmak mümkündür (Bkz. Şekil 1.11).
- Kullanılan malzemeler arasında, metaller, yüksek entropili alaşımlar (ing. High entropy alloys), intermetalikler (ing. Intermetallics) , seramikler, kompozitler, şekil hafızalı alaşımlar (ing. Shape memory alloys) bulunmaktadır. Ayrıca, DED teknolojisi ile farklı malzemelerin fonksiyonel geçişli (ing. Functional graded) biçimde üretilmesi mümkündür (bkz. Şekil 1.12).



(a)

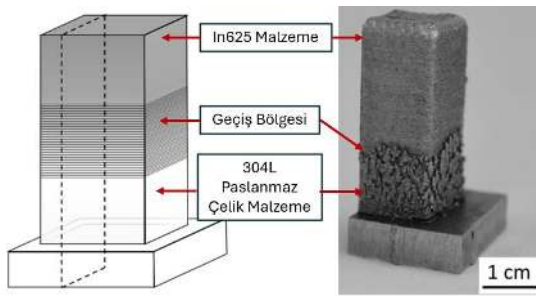


(b)

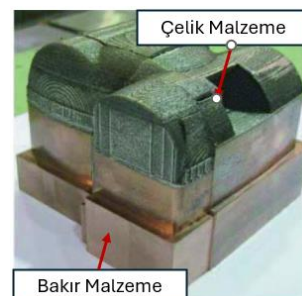


(c)

Şekil 1.11. DED uygulamaları (a) Rolls-royce BR715 motoruna ait yüksek basınç türbin case (ing. HPT case) parçasının DED teknolojisi ile tamir uygulaması [20] (b) DED teknolojisi ile paslanmaz çelik malzemeden üretilen türbin gövde muhafaza (ing. Turbine housing) parçası [20] (c) DED teknolojisi ile Ti_6Al_4V malzeme kullanılarak onarılan Rolls-royce BR715 motoruna ait yüksek basınç kompresör (ing. HPC drum) parçası [20]



(a)

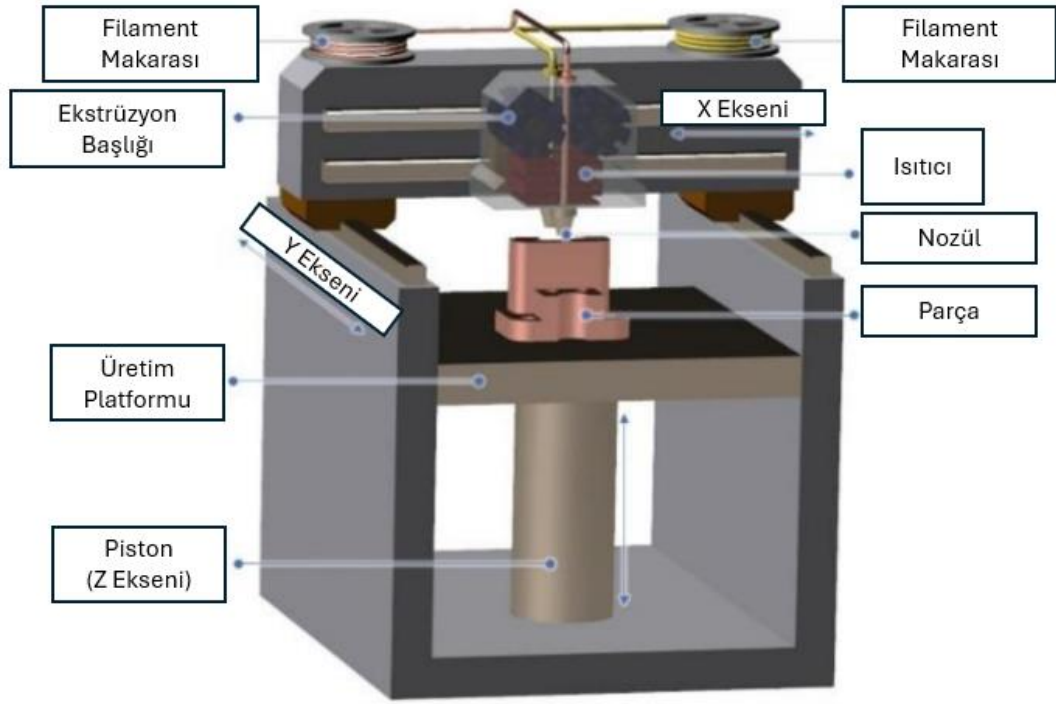


(b)

Şekil 1.12. DED teknolojisi ile üretilen çoklu malzemeye sahip yapılar (a) In625 nikel süperalaşım ve 304L paslanmaz çelik malzemeler kullanılarak DED teknolojisi ile üretilen fonksiyonel geçişli numune [21] (b) P21 takım çeliği ve Ampcoloy 940 kullanılarak üretilen soğutma kalıbı [22]

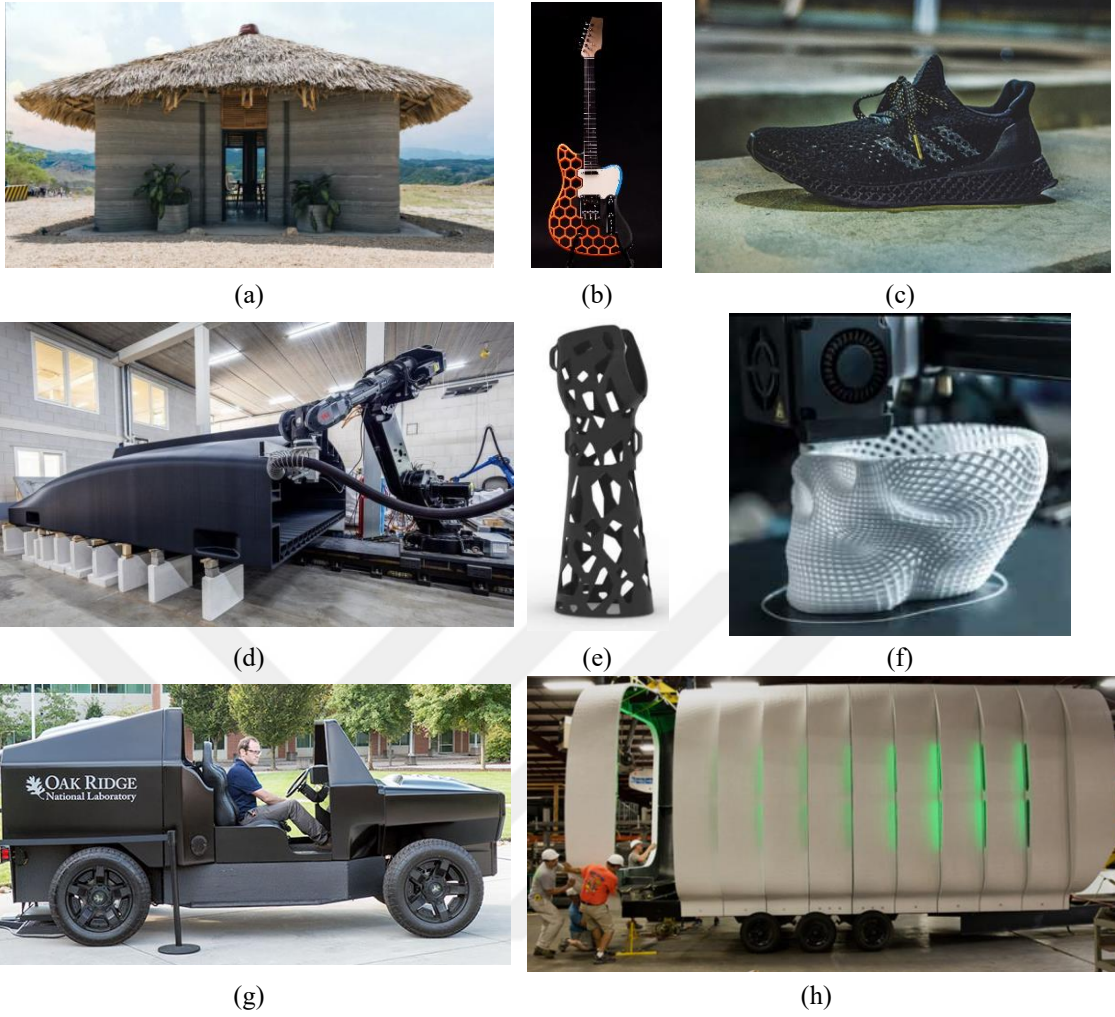
1.1.4. Malzeme ekstrüzyonu (material extrusion)

Malzeme ekstrüzyonu teknolojisi aynı zamanda “Fused Deposition Modelling (FDM)” olarak da literatürde bilinmektedir. Bu teknolojiye, tel formda olan; polimer, metal, biyo materyal, kompozit, seramik gibi mühendislik malzemeleri bir ya da daha fazla sürücü düzenek üzerinden, bir ya da daha fazla ısıtıcı ekstrüzyon nozülü kullanılarak, üretim platformu üzerine ergitilir. Her katman oluşturulduktan sonra, ekstrüzyon nozülü bir katman kalınlığı kadar yükselir ve yeni kesiti ergitilir (bkz. Şekil 1.13). Bu ergitme-yükselme çevrimi parça yüksekliği boyunca devam eder ve üretim tamamlanır [23]-[27].



Şekil 1.13. FDM proses şeması [27]

Şekil 1.14’te FDM teknolojisinin, eklemeli imalatın hızlı prototipleme yönünün öne çıkarıldığı uygulamalar gösterilmiştir. Hızlı prototiplemenin avantajı kişiselleştirilmiş ürünlerin imalatında, ev/ofis tipi uygulamalardan endüstriyel uygulamalara kadar farklı yönleriyle yer bulmuştur.

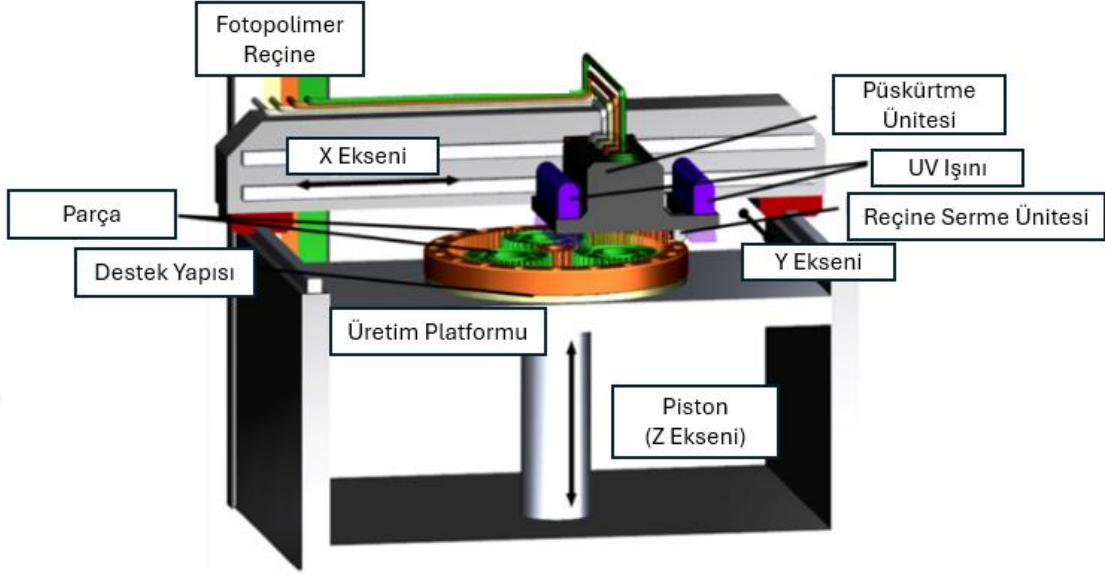


Şekil 1.14. FDM uygulamaları (a) FDM ile inşaa edilen konut [http-25] (b) FDM ile üretilmiş kişiselleştirilmiş enstürman tasarımı [http-26] (c) FDM ile üretilmiş ayakkabı [http-27] (d) FDM ile üretilmiş tekne gövdesi [http-28] (e) FDM ile üretilmiş kişiye özel medikal kol desteği [http-29] (f) FDM ile üretilmiş kafatası modeli [http-30] (g) FDM teknolojisi ile üretilmiş araba gövdesi [http-31] (h) FDM ile üretilmiş barınak [http-31]

1.1.5. Malzeme püskürtme (material jetting)

Malzeme püskürtme teknolojisi, literatüde ve pazarda “inkjet” veya “polyjet” teknolojisine olarak da anılmaktadır. Şekil 1.15’te gösterildiği üzere, bu teknolojiye, bağlayıcı fotopolimer reçine, püskürtme nozülleri kullanılarak üretim platformu üzerine, sürekli olarak (ing. Continuous mode) veya talebe yönelik (ing. Drop on demand mode) biçimde damlatılır ve damlatıldığı bölgede reçinenin dağılmaması veya belirlenen katman kalınlığının sağlanması için serici bir ünite ile damlatılan reçine seviyelendirilir (ing. Levelling), ardından mor ötesi (ing. Ultraviole, UV) ışın kullanılarak damlatılan reçine kürlenir (ing. Curing) ve ilgili katmandaki kesit oluşturulur. Kürlemenin tamamlanması ile üretim platformu bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilir ve yeni katmandaki kesiti

kürlemek için reçine damlatılır. Bu damlatma-kürleme çevrimi parça yüksekliği boyunca devam eder ve üretim tamamlanır [28]-[34].



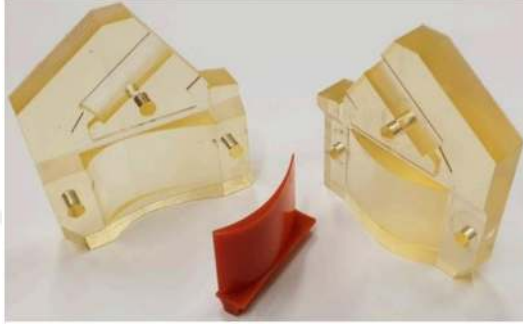
Şekil 1.15. MJ proses şeması [32]

MJ teknolojinin, diğer Eİ teknolojileri arasındaki önemli karakteristikleri şunlardır [28]-[34].

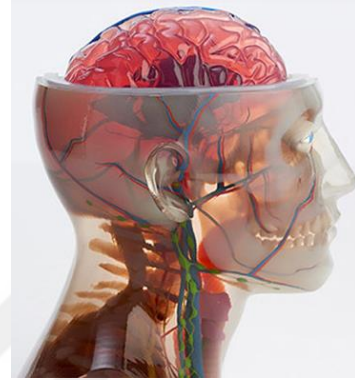
- MJ teknolojisinde, kullanılan katman kalınlığı parametresi sayesinde, diğer eklemeli imalat teknolojilerine göre daha iyi kalitede yüzey pürüzlülüğü elde etmek mümkündür.
- MJ teknolojisinde, çoklu püskürtme nozülleri ve reçine tankları sayesinde, çoklu ve renkli malzemeler ile uygulama yapmak mümkündür. Bu nedenle biyomedikal ve endüstriyel alanlarda uygulama alanına sahiptir (Bkz. Şekil 1.16).
- Kullanılan malzemeler arasında, metaller, seramikler, biyomateryaller, polimerler ve kompozitler bulunmaktadır.
- Diğer bağlayıcı bazlı Eİ teknolojisi olan BJ teknolojisine kıyasla, bağlayıcı damlacıkları bir toz yatağı üzerine değil, üretim platformu üzerinde kürlenmiş olan parçanın üzerine damlatılmaktadır.
- Üretim platformu ile arasında belirli bir açı değerinden daha düşük açı değerine sahip olan sarkan yüzeyler (ing. Overhang surfaces) destek yapıları ile desteklenmelidir. MJ teknolojisinde ikincil reçine malzemeler

kullanılarak, sıvı temasıyla çözünebilir veya ısıtma ile uçurulabilir destek yapıları üretmek mümkündür.

- Ardıl işlem olarak, parça yüzeyinde kalan reçineyi arındırmak için yıkama ve parçanın desteklerinden arındırıldıktan sonra çarpılmaması için ikincil bir kütleme işlemi uygulanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 1.16. MJ teknolojisi ile renklendirilerek üretilmiş modeller (a) MJ teknolojisi ile üretilmiş türbin döküm [28] (b,c) Renkli biyomedikal modeller [http-32]

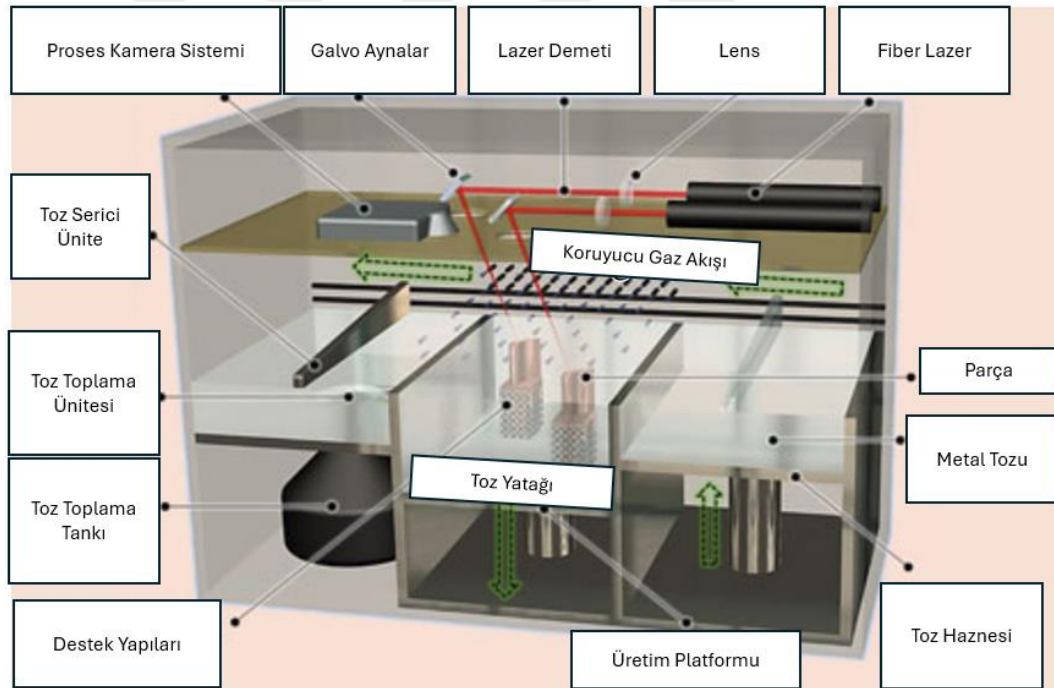
1.1.6. Toz yatağında füzyon (powder bed fusion)

Toz yatağında füzyon teknolojisi, kullanılan enerji kaynağına göre lazer ışını ile toz yatağında füzyon (ing. Laser beam powder bed fusion, LB-PBF) ve elektron ışını ile toz yatağında füzyon (ing. Electron beam powder fusion, EB-PBF) olarak iki gruba ayrılabilir. Bu teknolojiler metal malzemelerin eklemeli imalatında kullanılmaktadır. BJ teknolojisindeki gibi toz serme işlemine sahip olmalarına karşın, metal malzemenin ergime ve katılaşma süreçlerini bulunması nedeniyle, BJ teknolojisinden ayrılmaktadır. Ayrıca, yine lazer ışının enerji kaynağı olarak kullanıldığı seçici lazer sinterleme (ing.

Selective laser sintering) teknolojisinin çoğunlukla polimer uygulamalar için kullanılması yine LB-PBF teknolojisinden farklılık oluşturmaktadır.

1.1.6.1. Lazer ışını ile toz yatağında füzyon (laser beam powder bed fusion)

LB-PBF teknolojisinde (bkz. Şekil 1.17), koruyucu atmosfer altında, toz serici ünite kullanılarak, ön ısıtılan üretim platformu üzerine belirli bir katman kalınlığında serilen metal tozu, ilgili kesiti oluşturmak için bir veya daha fazla lazer tarafından taranarak ergitilir. Daha sonra, üretim platformu bir sonraki katman için aşağıya indirilir ve tekrar toz serimi gerçekleştirilir. Üretim platformu üzerine serilen metal tozunun fazlalığı, toz toplama haznesine atılır ve üretim sonrası elenerek (ing. Sieving) tekrar kullanılabilir. Serme ve ergitme çevrimi parça yüksekliği boyunca tekrar eder ve parça üretimi tamamlanır [35]-[46].



Şekil 1.17. LB-PBF proses şeması [46]

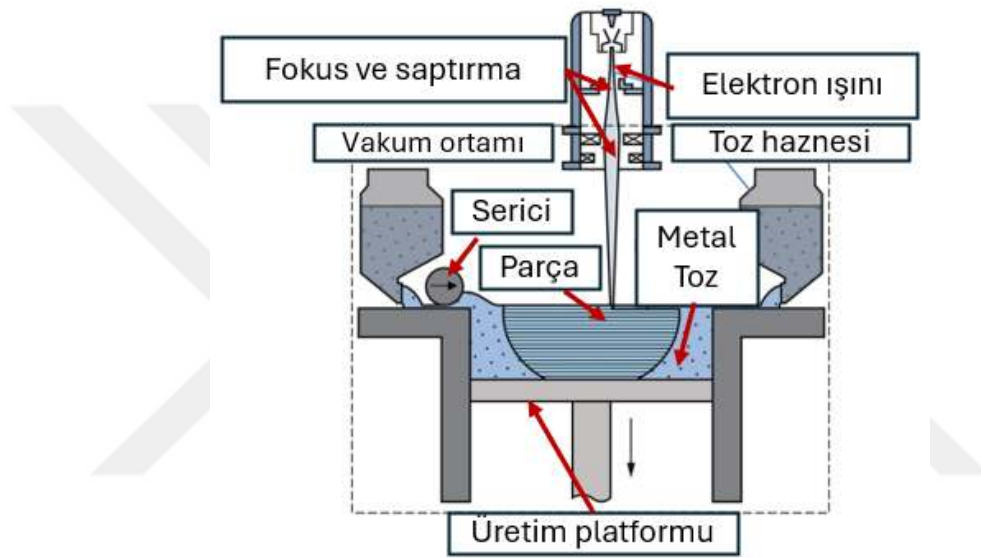
LB-PBF teknolojisinin, diğer Eİ teknolojileri arasındaki önemli karakteristikleri şunlardır [36][46]:

- Literatürde ve pazarda, “Direct Metal Laser Sintering (DMLS)”, “Selective Laser Melting (SLM)”, “Direct Metal Printing (DMP)”, “Laser Metal Fusion (LMF)” gibi alternatif isimlerle anılmaktadır.

- Kullanılan malzemeler arasında toz formda, çelikler, titanyum alaşımları, nikel speralaşımları, metal matrisli kompozitler, alüminyum alaşımları, bakır alaşımları, şekil hafızalı alaşımlar gibi metal malzemeler bulunmaktadır. Üretilen final parçanın mekanik performansı ve boyutsal doğruluğu üzerine, kullanılan toz malzemenin parçacık şekli (ing. Morphology), boyut dağılımı (ing. Particle size distribution), kimyasal kompozisyonu (ing. Chemical composition), akış özellikleri (ing. Flow characteristics), yoğunluğu (ing. Density) gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerinin etkisi bulunmaktadır.
- LB-PBF teknolojisinde hızlı ergime-katılaşma nedeniyle karmaşık bir ısıl geçmiş ortaya çıkmaktadır. Bu (ing. Residual stress). Özellikle retim platformu ile arasında 40-45°'den daha düşük açı değerine sahip sarkan yüzeyler, destek yapıları ile desteklenmelidir.
- Parça destek yapıları ile birlikte üretim platformu üzerindeyken, ikincil gerilim giderme ısıl işlemi (ing. Stress relief) uygulanır ve ardından parça önce üretim platformu üzerinden ayrılır daha sonra destek yapıları uzaklaştırılır. Gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmaksızın destek yapıları uzaklaştırılırsa, kalıntı gerilmeler nedeniyle parça üzerinde deformasyonlar gözlemlenebilir.
- Üretilen parçaların mekanik performansını arttırmak adına, yaşlandırma (ing. Ageing), çözeltiye alma (ing. Solution heat treating) veya HIP gibi ikincil ısıl işlemler ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek adına talaş kaldırma (ing. Machining), aşındırıcı akış ile işleme (ing. Abrasive flow machining), bilyalı dövme (ing. Shot peening), elektro kimyasal işleme (ing. Electrochemical machining) gibi yüzey işlemleri uygulanmaktadır.
- Havacılık ve uzay başta olmak üzere, kişiye özel biyomedikal ve dental implant üretimi, endüstriyel ürün imalatı, otomotiv, enerji sektörlerinde uygulama alanına sahiptir. Ayrıca, geliştirilmiş toz serme teknolojileri ile çoklu malzeme kullanarak parça üretimi yapmak mümkündür.

1.1.6.2. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon (electron beam powder bed fusion)

EB-PBF teknolojisinde (bkz. Şekil 1.18), her katmanın ergitilmesi öncesinde, vakum ortamında, yüksek enerjili elektron ışını ile, toz yatağı yaklaşık 1000 °C'lere kadar ön ısıtılır. Daha sonra elektron demetleri toz yatağı üzerine yüksek hızlarda çarptırılarak ergitme sağlanır. Ardından, üretim platformu tek katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve yeni katman serilerek ön ısıtma, ergitme ve toz serme işlemleri tekrarlanır. Bu çevrim parça yüksekliği boyunca devam eder [47]-[54].



Şekil 1.18. EB-PBF proses şeması [53]

EB-PBF teknolojisinin, diğer Eİ teknolojileri arasındaki önemli karakteristikleri şunlardır [47]-[54]:

- Literatürde ve pazarda alternatif olarak EBM (ing. Electron beam melting) ismiyle de anılmaktadır.
- LB-PBF teknolojisi ile benzer üretim modeline sahip olsada, kullanılan enerji kaynağı, vakum atmosferinin bulunması ve her katman öncesi yüksek ön ısıtma uygulanması gibi farklı yönleri vardır. Ayrıca, toz yatağının ön ısıtılması ile hızlı katılaşmanın engellenmesi, artık gerilmelerin azalmasını sağlamaktadır. Bu nedenle destek yapısı gereksinimi daha azdır (bkz. Şekil 1.5b ve Şekil 1.7).
- LB-PBF teknolojisine ile kıyaslandığında, daha az malzeme seçeneği bulunmaktadır. Ayrıca, daha büyük odak çapı (ing. Spot size) ve daha kalın

katman kalınlıkları kullanıldığı için ince ve küçük unsurların işlenebilme kabiliyeti (ing. Resolution) ve parça yüzey kalitesi daha düşüktür. Ancak, katılaştırma oranı (ing. Deposition ratio) dolayısıyla üretim hızı daha yüksektir.

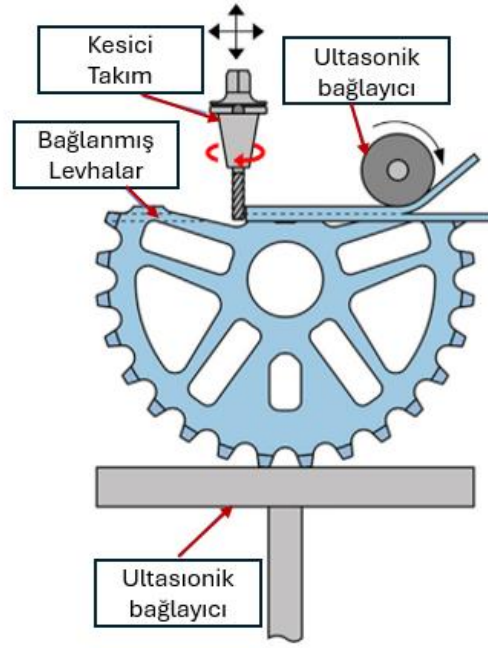
- Bu nedenle uygulama alanları özellikle biyo-medikal (bkz. 1.5b.), havacılık ve uzay sektörlerindedir. Havacılık ve uzay uygulamalarına örnek olarak Şekil 1.19’da “Avio Aero” tarafından TiAl malzemeden üretilen, GE9X motoruna ait türbin bıçakları (ing. Blade) gösterilmiştir. Bu geliştirme ile GE90 motorundaki nikel süperalaşım bıçak tasarımına göre hafifletme sağlanmış ve bu hafifletme %10 yakıt tasarrufu getirmiştir.



Şekil 1.19. EB-PBF ile üretilmiş TiAl türbin bıçakları [54]

1.1.7. Levha/sac laminasyonu (sheet lamination)

SL teknolojisinde (bkz. Şekil 1.20), belirli kalınlıkta ve levha formundaki, metal, kompozit, kağıt, seramik gibi malzemeler üst üste serilerek, ultrasonik bağlayıcı (ing. Sonotrode) yardımıyla, sıcaklık ve basınç altında birbirlerine bağlanır ve tasarıma ait kesit dışında kalan bölgeler, kesici takım, lazer vb. ile kesilerek uzaklaştırılır. Üretim platformunun bir katman kalınlığı (ing. Layer thickness) aşağıya indirilmesiyle, yeni levha platform üzerine serilir, ardından bağlama ve kesme işlemleri devam eder. Bu çevrim parça yüksekliği boyunca tekrar eder [55]-[56].



Şekil 1.20. SL proses şeması [53]

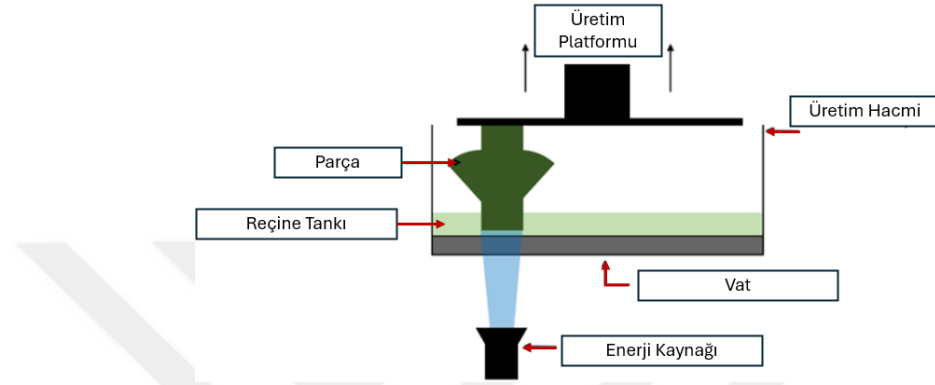
SL teknolojisinin, diğer Eİ teknolojileri arasındaki önemli karakteristikleri şunlardır [55]-[56]:

- Literatürde ve pazarda lamine obje imalatı (ing. Laminated object manufacturing) veya ultrasonik eklemeli imalat (ing. Ultrasonic additive manufacturing) gibi isimlerle de anılmaktadır.
- Düşük malzeme maliyetleri ve yüksek üretim hızları, prototipleme konusunda avantaj oluşturmaktadır.
- Ortaya çıkan final parçada merdiven etkisi (ing. Stair step effect) yüksektir. Bu nedenle ikincil yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulur.
- Diğer metal eklemeli imalat sistemlerinde görülen ergime-katılaşma çevrimi olmadığı için, porozite (ing. Porosity), çekme çizgileri (ing. Shrinkline) oluşma ihtimali düşüktür.

1.1.8. Stereolithografi (stereolithography)

SLA, teknolojisinde (Bkz. Şekil 1.21) üretim platformu, içerisi sıvı reçine (ing. Resin) dolu tanka batırılarak, tank altında yer alan lazer veya projeksiyon ünitelerinin sağladığı enerjiden faydalananarak, ilgili kesiti kürler. Daha sonra, üretim platformu bir miktar yükseltilir ve serici yardımı ile tank içerisindeki reçine, tank içerisinde olan ve

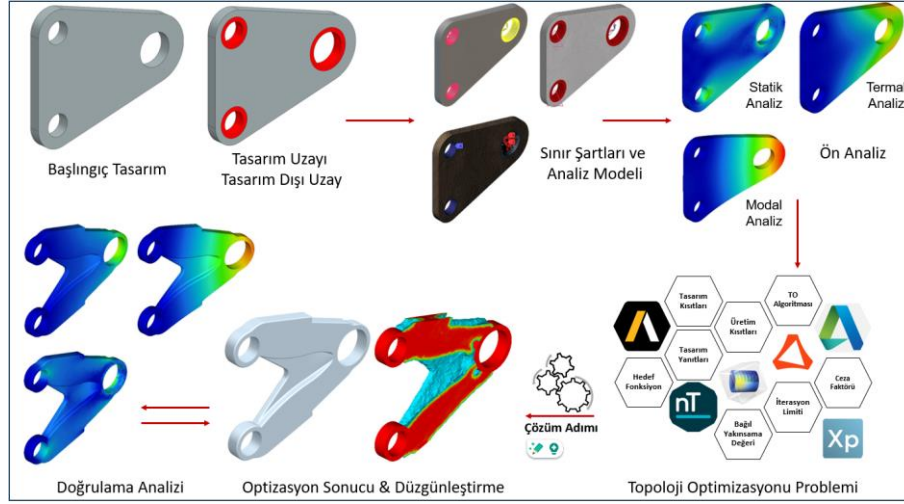
sürekli beslenen reçine, homojen olarak yayılır. Ardından, üretim platformu tank içerisine tekrar daldırılarak, bir sonraki katman kürlenir. Bu daldırma, serme ve kürlenme çevrimi parça yüksekliği boyunca devam eder. SLA teknolojisinde, üretim platformunun reçine tankına daldırıldığı sistemlerden farklı olarak, enerji kaynağının tezgahın üst kısmında yer aldığı ve tank içerisindeki parçanın tarandığı sistemleride mevcuttur [57][64].



Şekil 1.21. SLA proses şeması [64]

1.2. Topoloji Optimizasyonu (Topology Optimisation)

Topoloji optimizasyonu (TO), belirli sınır koşulları, yük durumları ve malzeme özellikleri altında, en yakınsak hedef fonksiyonu (ing. Objective function) elde etmek için, tasarım tepkilerini (ing. Design responses) ve kısıtlarını dikkate alarak, başlangıç tasarım uzayı (ing. Design space) içerisindeki malzemeyi yeniden dağıtan bir yapısal tasarım metodudur. Optimize edilmiş tasarımların, serbest formda yüzeylere ve karmaşık unsurlara sahip olması nedeniyle geleneksel imalat yöntemleri, üretilebilirlik anlamında yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, optimizasyon sonrası devam eden tasarım iterasyonlarının prototiplenmesi ve test edilmesinde ihtiyaç duyulan takım, kalıp ve fikstür ihtiyacı, sürdürülebilirlik anlamında dezavantaj oluşturmaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerinin sağladığı tasarım özgürlüğü ve ekstra takım, kalıp ve fikstür ihtiyacının bulunmaması, topoloji optimizasyonu uygulamalarındaki imalat kısıtlarını önemli ölçüde azaltmış ve hem akademik hem de ticari anlamda çalışmalara konu oluşturmuştur [65][75]. Şekil 1.22’de topoloji optimizasyonu sürecine ait akış şeması gösterilmiştir.



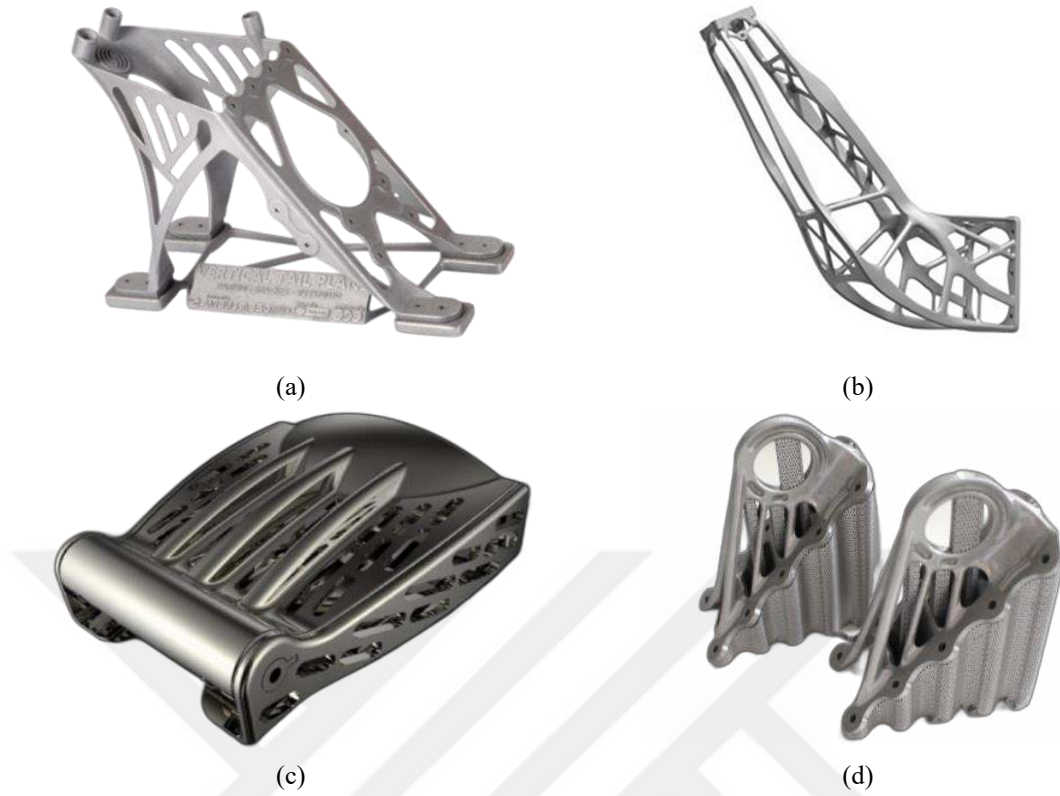
Şekil 1.22. Topoloji optimizasyonu akış şeması

Temel olarak optimizasyon kurgusu şu adımları takip eder:

- Tasarım uzağı ve tasarım dışı uzağın belirlenmesi.
 - Tasarım uzağı, optimizasyon probleminin uygulanacağı elemanları içeren bölgelerdir.
 - Tasarım dışı uzağı ise optimizasyon problemine dahil olmayan elemanları içeren bölgeleri ifade eder bu bölgeler optimizasyon sonucunda tasarımda korunacak bölgelerdir. Genellikle, tasarıma ait montaj arayüzleri, sabitleme ve yük bölgeleri veya tasarımda korunması istenilen herhangi bir unsur olabilir.
- Ağ (ing. Mesh) yapısının oluşturulması ve sınır şartlarının (ing. Boundary conditions) uygulanması ve analiz modelinin oluşturulması.
 - Sınır şartları, parçanın sabitleme koşulları, yük koşulları ve malzeme özellikleridir.
- Analiz adımının gerçekleştirilmesi ve yorumlanması.
 - Gerilme, deplasman, sıcaklık dağılımı, titreşim frekansı ve şekli.
- Optimizasyon probleminin kurulması.
 - Hedef fonksiyonun belirlenmesi.
 - Tasarım yanıtlarının belirlenmesi.
 - Tasarım yanıtları, kullanılan ticari optimizasyon yazılımına göre çeşitlendirilebilir. Hacim, ağırlık, gerilme, deplasman, doğal frekans gibi tasarım yanıtları, birer tasarım kısıtı olarak uygulanabilir.
 - İmalat kısıtlarının uygulanması.

- Minimum/maksimum unsur boyutu (ing. Minimum/maximum feature size, MAFS, MIFS)
- Sarkan yüzey kısıtı (ing. Overhang constraint, OC)
- Simetri kısıtı (ing. Symmetric constraint, SC)
- Ekstrüzyon kısıtı (ing. Extrusion constraint)
- Kalıp çekim yönü kısıtı (ing. Draw direction constraint, DDC)
- Optimizasyon sonucunun incelenmesi ve düzgünleştirme (ing. Smoothing)/yeniden tasarım (ing. Re-design) uygulanması.
 - Optimizasyon sonucunda elde edilen geometri, belirli boyutlardaki elemanlardan oluşmaktadır. Bu nedenle elde edilen optimizasyon sonucu düzenli yüzeylere sahip olmayabilir. Optimizasyon sonucu, ticari optimizasyon yazılımlarının arayüzünde düzgünleştirilebilir veya çeşitli CAD) yazılımlarında yeniden tasarlanabilir.
- Final tasarımın nümerik olarak analiz edilmesi ve tasarım iterasyonlarının uygulanması.
 - Elde edilen final tasarıma, nümerik analiz uygulanmalı ve optimize edilmiş geometrinin, sınır şartları altındaki davranışları incelenmelidir. Bu hususta parça üzerinde tasarım isterlerine aykırılık oluşturacak seviyede; gerilme, deplasman, sıcaklık, frekans vb. bulunuyor ise ilgili bölgelerde tasarım iterasyonu yapılarak, emniyetli çalışma şartı elde edilmelidir.
- Final tasarımın üretilmesi ve test edilmesi
 - Nümerik analizler sonucunda, deneysel doğrulamaya uygun final tasarım üretilmeli ve deneysel olarak test edilmelidir.

Özellikle havacılık ve uzay gibi parça ağırlığının, performans ve maliyet anlamında kısıt oluşturduğu sektörlerde, TO ve Eİ teknolojileri kullanılarak hafifletme ve konsolidasyon çalışmaları yapılmaktadır. Şekil 1.23a'da Airbus A350 XWB uçağına ait optimize edilmiş kablo yönlendirme braketi gösterilmiştir. Çalışma sonucunda ilk tasarıma göre %30 hafifleme sağlanmıştır ve ilk tasarımda 30 alt parça bulunurken, final tasarımda konsolidasyon uygulanmış ve tek parça olarak AlSi₁₀Mg malzemedan LB-PBF kullanılarak 19 saatte üretilmiştir. Şekil 1.23b'de Optimize edilmiş uydu braket gösterilmiştir. Çalışma sonucunda ilk tasarıma göre %40 hafifleme sağlanırken, minimum tasarım isterine göre %30 daha rijit bir tasarım elde edilmiştir. Ayrıca, parça AlSi₁₀Mg malzemedan LB-PBF yöntemiyle üretilmiştir.



Şekil 1.23. Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat uygulamaları (a) Optimize edilmiş Airbus A350 XWB kablo yönlendirme braketi [http-33] (b) Optimize edilmiş Sentinel uydu braketi [http-34] (c) Optimize edilmiş Airbus A380 kemer tokası [65] (d) Optimize edilmiş Airbus A350 XWB kabin braketi [65]

Dutta vd. 2017 [65], çalışmalarında (bkz. Şekil 1.23c) Airbus A380 kemer tokasına yapılan optimizasyon çalışmasını raporlamıştır. Çelik malzemeden geleneksel yöntemlerle üretilen parça, Ti6Al4V malzeme özellikleri kullanılarak optimize edilmiş ve %55 hafifletilerek LB-PBF yöntemi ile üretilmiştir. Elde edilen bu hafifletme ile uçak üzerinde yaklaşık 73 kg ağırlık avantajı sağlanmıştır. Şekil 1.23d’de Ti₆Al₄V malzeme özelliklerine göre optimize edilmiş ve LB-PBF yöntemi ile üretilmiş Airbus A350 XWB kabin braketi gösterilmiştir. Geleneksel yöntemlerle alüminyum malzemeden üretilen parça, optimizasyon sonucunda %35 hafifletilmiş ve LB-PBF yöntemi ile üretim süresi %70 kısalmıştır.

Literatürde ise, farklı tasarım isterlerinin bulunduğu ve eklemeli imalata yönelik uygulamaların yapıldığı ve hafifletme odaklı bir çok çalışma bulunmaktadır. Dağkolu vd. 2021 [66] çalışmalarında, yorulmaya (ing. Fatigue) çalışan, braket tipi uçak parçasını, Ti6Al4V malzeme özelliklerini kullanarak optimize etmiş ve %45 ağırlık avantajı sağlamışlardır. Ayrıca, yazarlar optimize edilen geometri üzerinde eklemeli imalata yönelik tasarım (ing. Design for additive manufacturing, DfAM) değişikliklerini

gerçekleştirerek final tasarımı çalışma şartlarında nümerik olarak doğrulamış ve LB-PBF yöntemi ile prototip seviyesinde çıktı oluşturmuşlardır. Peto vd. 2019 [67] çalışmalarında, ortotropik (ing. Orthotropic) SS316L malzeme özelliklerini kullanarak, kişiye özel diz implantının optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Yazarlar, optimizasyon sonrası %30 hafifletilmiş yeni tasarımı nümerik olarak doğrulamış ve LB-PBF yöntemi ile prototiplemişlerdir. Süß vd. 2016 [68] çalışmalarında yüksek ve düşük yorulma çevrimlerinin bulunduğu şartlarda, helikoptere ait dişli kutusunun, EB-PBF odaklı, optimizasyon, konsolidasyon ve iterasyon üzerine çalışmış ve ~%50 ağırlık avantajı elde etmişlerdir. Berrocal vd. 2019 [69] çalışmalarında, Al7075, AlSi10Mg ve Ti6Al4V gibi alaşımların izotropik malzeme özelliklerinden faydalanarak, farklı havacılık komponentlerinin optimizasyonu ve konsolidasyonu üzerine çalışmıştır. Yazarlar optimize edilen komponentlerin hafifleme oranlarının %19 ila %63 arasında değiştiğini bildirmiş, statik ve modal tasarım isterlerinin karşılandığını nümerik olarak doğrulamış ve LB-PBF yöntemi ile prototiplenebilir olduklarını kanıtlamıştır. Walton vd. 2017 [70] çalışmalarında, geleneksel yöntemlerle alüminyum malzemeden üretilen süspansiyon parçasını, izotropik Ti6Al4V malzeme özellikleri kullanarak optimize etmiş ve EB-PBF prosesine göre yeniden tasarlamıştır. Yazarlar, EB-PBF prosesi ile üretilen yeni tasarımın %36 daha hafif olduğunu, emniyet faktörünün %76 arttırıldığını, atık malzeme oranının %86 oranında azaltıldığını bildirmişlerdir. Park vd. 2018 [71] çalışmalarında, ABS malzemesinin ortotropik malzeme özelliklerini kullanarak, havalı tüfek kabzasını optimize etmiş ve nümerik olarak doğrulamıştır. Gerçekleştirilen tasarım iterasyonlarının ardından, final tasarım FDM teknolojisi ile üretilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Yazarlar, deneysel doğrulama sonucunda, optimize edilmiş geometrinin basma dayanımının %40 arttığını bildirmiştir. Vaverka vd. 2019 [72] çalışmalarında, AlSi10Mg malzemesinin ortotropik özelliklerini kullanarak, formula yarış aracına ait aks taşıyıcısının optimizasyonunu, LB-PBF teknolojisi ile prototiplenmesini ve deneysel doğrulanmasını çalışmıştır. Tasarımın, eski malzemesinin akma dayanımının (ing. Yield strength), AlSi10Mg'ye göre iki kat fazla olmasına rağmen, LB-PBF ile üretilen prototip test sonucunda %20 daha az deformasyon göstermiştir. Nvss vd. 2022 [73] çalışmalarında, ABS malzemenin izotropik özelliklerini kullanarak, insansız hava aracı (İHA) gövdesinde, hafifletme amaçlı topoloji optimizasyonu ve montaj arayüzlerini elemek için konsolidasyon çalışması yürütmüştür. Final tasarım FDM teknolojisi ile üretilmiş ve yapısal, titreşim ve yorulma karakteristikleri nümerik ve deneysel olarak

incelenmiştir. Yazarlar, gövdenin, sınır şartları altında 2 Kg'lık bir ağırlığa dayanabildiğini ve İHA toplam ağırlığının %30'unu oluşturduğunu bildirmiştir. Saeber vd. 2016 [74] çalışmalarında, izotropik Ti6Al4V malzeme özelliklerini kullanarak, alüminyum malzemeden tasarlanmış braket tipi hedef geometri üzerinde optimizasyon çalışması yürütmüş ve final tasarımı LB-PBF teknolojisi ile prototipleyerek deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirmiştir. Çalışma sonuçlarında, yeni tasarımın ağırlığının %28 daha az olduğu ve malzeme değişimi etkisiyle emniyet faktörünün 2 kat arttığı bildirilmiştir. Sedlacek vd. 2023 [75] çalışmalarında, ortotropik AlSi10Mg malzeme verisinden yararlanarak, yarış arabasının direksiyon kutusunda bulunan muhafaza parçası üzerinde optimizasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Yazarlar, hafifletme oranının yaklaşık ~%44 olduğunu ve yeni tasarımın LB-PBF yöntemi ile üretilerek çalışma şartlarında denendiğini ve 200 saat üzerinde çalışma performansı gösterdiğini bildirmiştir.

Tablo 1.1'de literatürden özetlenen çalışmalara ait, kurgulanan optimizasyon problemleri, kullanılan üretim kısıtları, kullanılan yazılımlar, kullanılan malzeme ve imalat teknolojileri ve doğrulama yöntemleri özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalata yönelik uygulamaların bulunduğu çalışmalar

Ref.	Hedef Fonksiyon	Tasarım Kısıtları	İmalat Kısıtları	Malzeme & Teknoloji	Yazılım	Doğrulama
[66]	Min. Yapısal Esneklik (ing. Min. Compliance)	Gerilme (ing. Stress) Kısıtı & Ağırlık Kısıtı	Belirtilmemiş	İzotropik Ti6Al4V & LB-PBF	HyperWorks	Nümerik
[67]	Min. Şekil değiştirme (ing. Strain)	Ağırlık Kısıtı	Belirtilmemiş	Ortotropik SS316 L & LB-PBF	Abaqus	Nümerik
[68]	Min. Yapısal Esneklik	Hacim Kısıtı	Belirtilmemiş	İzotropik Ti6Al4V & EB-PBF	Belirtilmemiş	Nümerik

Tablo 1.1. (Devam) *Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalata yönelik uygulamaların bulunduğu çalışmalar*

[69]	Ağırlık Azaltımı (ing. Min. Mass)	Doğal Frekans (ing. Natural frequency) Kısıtı & Gerilme Kısıtı	Belirtilmemiş	İzotropik AlSi10Mg & LB-PBF	HyperWorks	Nümerik
	Ağırlık Azaltımı (ing. Min. Mass)	Gerilme Kısıtı		İzotropik AlSi10Mg & LB-PBF		
	Ağırlık Azaltımı (ing. Min. Mass)	Gerilme Kısıtı & Deplasman (ing. Displacement) Kısıtı		İzotropik Ti6Al4V & LB-PBF		
[70]	Min. Yapısal Esneklik	Ağırlık Kısıt & Gerilme Kısıtı	Min. Üye Boyutu & Max. Üye Boyutu & Simetri Kısıtı	İzotropik Ti6Al4V & EB-PBF	HyperWorks	Nümerik
[71]	Min. Yapısal Esneklik	Hacim kısıtı	Belirtilmemiş	Ortotropik ABS & FDM	Ansys	Nümerik & Deneysel
[72]	Min. Yapısal Esneklik	Hacim Kısıtı	Min. Üye Boyutu	Ortotropik AlSi10Mg & LB-PBF	Inspire	Nümerik & Deneysel
[73]	Min. Yapısal Esneklik	Ağırlık Kısıtı & Gerilme Kısıtı	Sarkan Yüzey (ing. Overhang) Kısıtı	İzotropik ABS & FDM	Ansys	Nümerik & Deneysel

Tablo 1.1. (Devam) *Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalata yönelik uygulamaların bulunduğu çalışmalar*

[74]	Min. Yapısal Esneklik	Hacim Kısıtı	Simetri Kısıtı	İzotropik Ti6Al4V & LB-PBF	HyperWorks	Nümerik & Deneysel
[75]	Min. Şekil değiştirme	Ağırlık Kısıtı	Sarkan Yüzey Kısıtı & Min. Üye Boyutu	Ortotropik AlSi10Mg & LB-PBF	Nastran	Nümerik & Deneysel

Literatürde, çeşitli ticari optimizasyon yazılımları ile bir çok tasarım yanıtının, hedef fonksiyon veya kısıt fonksiyon olarak kullanıldığı, ayrıca ticari optimizasyon yazılımlarının kabiliyeti dahilinde olan üretim kısıtlarının kullanıldığı gözlemlenmektedir.

2. VAKA ÇALIŞMALARI

TO probleminin, gerçek şartlara olabildiğince yakın kurgulanabilmesi hususunda ticari optimizasyon yazılımlarının kabiliyetleri ön plana çıkmaktadır. Ticari optimizasyon yazılımları, sağlayabildiği tasarım yanıtları, üretim kısıtları, optimizasyon algoritmaları, analiz kabiliyetleri, ardıl işlem (ing. Post-process) kabiliyetleri, malzeme kütüphanesi vb. parametrelere göre, karmaşık problemlerin çözümlenmesinde avantaj/dezavantaj oluşturmaktadırlar. Tyflopoulos vd. 2021 [76] çalışmalarında, optimizasyon yazılımlarının %69'luk kısmının ticari, %31'lik kısmının ise açık kaynaklı olduğunu ve ticari optimizasyon yazılımlarının %44'lük kısmının akademik lisansa sahip olduğunu raporlamıştır. Ayrıca yazarlar, optimizasyon yazılımlarının, %80'lik büyük bir kısmının optimizasyon algoritması olarak, literatürde cezalandırma metodu (ing. Penalization method) veya yoğunluk metodu (ing. Density method) olarak bilinen, SIMP (ing. Solid isotropic material with penalization) metodunu kullandıklarını bildirmiştir.

SIMP metodunda, tasarımdaki elemanların yoğunlukları birer tasarım değişkeni olarak, optimizasyon sonucunda, 0 ile 1 aralığında değer almaktadırlar. Optimizasyon sonucunda, tasarımcı tarafından girdi verilen ve yine 0 ile 1 arasında değişen eşik değerinden (ing. Treshold value), daha düşük yoğunluğa sahip olan elemanların yoğunluğu “0” kabul edilir ve tasarım uzayından uzaklaştırılır, eşik değerinden daha büyük yoğunluğa sahip elemanların yoğunluğu “1” kabul edilir ve tasarım uzayında tutulur. Cezalandırma metoduna ait matematiksel formül denklem 2.1’de gösterilmiştir [http-35].

$$K = \rho^P \bar{K} \quad (2.1)$$

K: Cezalandırılmış rijitlik matrisi

ρ : Eleman yoğunluğu

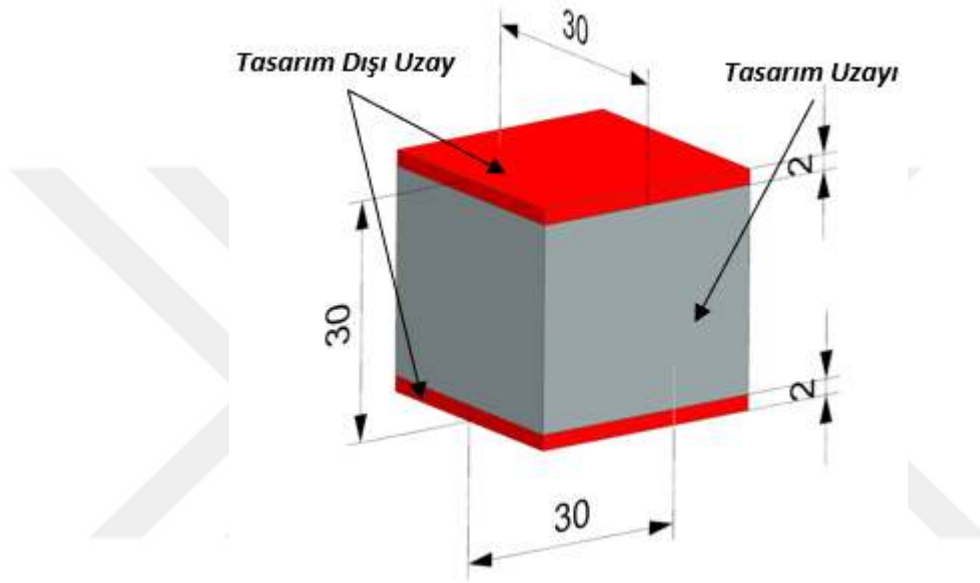
P: Ceza faktörü

$\bar{K}$: Cezalandırılmış rijitlik matrisi

SIMP metodunun uygulanabildiği ve hem statik hem de dinamik optimizasyon problemlerinin karşılaştırılmasına yönelik kullanılacak ticari optimizasyon yazılımları; Altair HyperWorks, Ansys Workbench ve nTop’dur. Tüm çözümler ve analizler aynı bilgisayar kullanılarak alınmıştır.

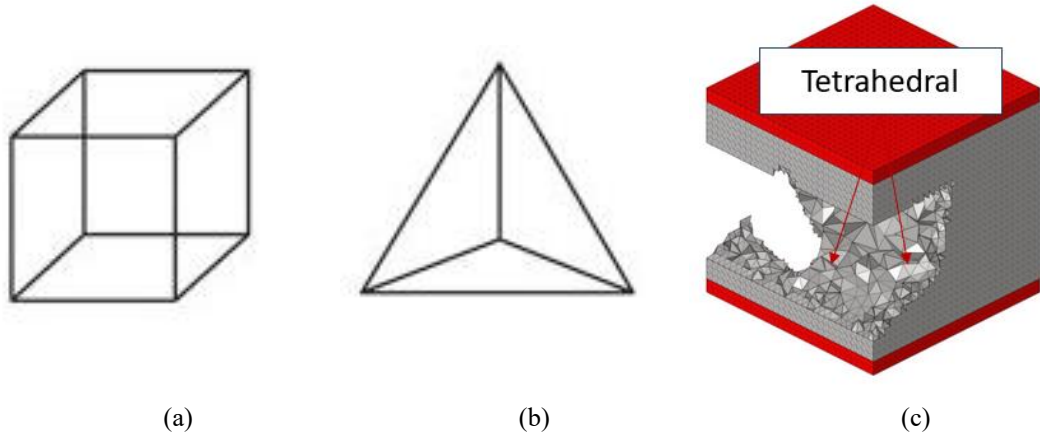
2.1. Statik Topoloji Optimizasyonu Problemi

Optimizasyon probleminin çözümlenmesinde, gösterildiği üzere ilk adım, tasarım ve tasarım dışı uzayı belirlemektir. Bu nedenle, Şekil 2.1’de gösterilen 30 x 30 x 30 mm boyutlara ve 27000 mm³ hacime sahip küp geometrisinde, parçanın sabitlendiği ve yükün uygulandığı yüzeylerin dahil olduğu ve 2 mm kalınlığa sahip prizmatik bölgeler tasarım dışı uzay olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.1. Küp geometrisine ait tasarım ve tasarım dışı uzay gösterimi

Optimizasyon probleminin oluşturulmasında sonraki adım ise sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasıdır. Bu nedenle, mesh geometrinin oluşturulması, sınır şartlarının ve malzeme özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Literatürde benzer küp geometrileri için hexahedral kübik (bkz. Şekil 2.2a) elemanlar kullanılmıştır. Ancak nTop yazılımında hexahedral eleman kullanılmadığı için 1 mm boyunda, tetrahedral (bkz. Şekil 2.2b) elemanlar tercih edilmiştir ve elemanların en-boy oranı (ing. Aspect ratio) maksimum 5 olacak şekilde düzenlenmiştir. Tasarım uzayı ve tasarım dışı uzaya ait geometriler arasında temas yüzeyleri (ing. Contact surfaces) bulunduğu için bu yüzeylerdeki düğümler (ing. Nodes) 0.01 mm tolerans değerinde denklenmiştir (ing. Equivalence). Ayrıca, ticari yazılımların verdikleri çözümlerde, mesh kaynaklı değişkenliği engellemek için, mesh geometrisi, HyperWorks ortamında oluşturulmuş (bkz. Şekil 2.2c) ve diğer yazılımlarda içeriye alınmıştır (ing. Import). Oluşturulan mesh geometrisinde 81041 adet eleman ve 16249 adet düğüm (ing. Node) bulunmaktadır.



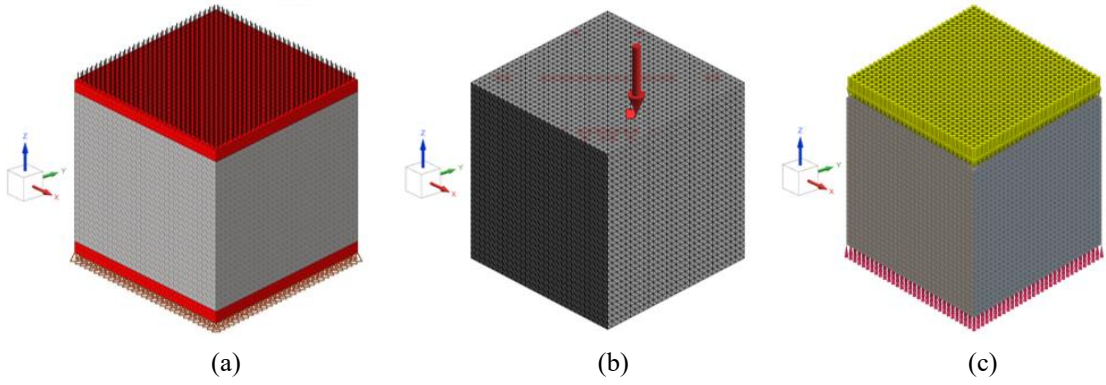
Şekil 2.2. Eleman tipleri (a) Hexahedral (b) Tetrahedral (c) Tetrahedral mesh geometri

In718, yüksek sıcaklıklarda gösterdiği mekanik performans, yorulma karakteristiği, yüksek korozyon ve oksidasyon direnci sayesinde gaz türbinli motorlar, enerji reaktörleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen bir nikel süperalaşımıdır ve metal eklemeli imalat teknolojileri ile kullanılabilir. [77]-[80]. Karşılaştırılan ticari optimizasyon yazılımlarında, yöne bağlı değişen malzeme verileri uygulanabilir. Bu nedenle Tablo 2.1’de gösterilen ortotropik In718 malzeme özellikleri optimizasyon problemlerinde kullanılmıştır.

Tablo 2.1. In718 ortotropik malzeme özellikleri [80]

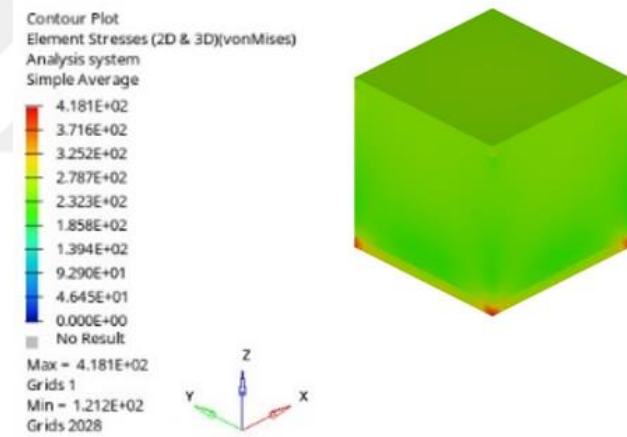
In718 Malzeme Özellikleri	Birim	Ortotropik Malzeme Özellikleri
Yoğunluk (ρ)	Kg/m ³	8220
Poisson Oranı (ν)	-	$\nu_x = 0.3$ $\nu_y = 0.3$ $\nu_z = 0.3$
Elastesite (ing. Young/Elastic) Modülü	GPa	$E_x = 149$ $E_y = 149$ $E_z = 125$
Kesme (ing. Shear) Modülü	GPa	$G_x = 57.3$ $G_y = 57.3$ $G_z = 48.07$

Mesh geometrinin oluşturulması ve malzeme özelliklerinin uygulanmasının ardından, yük ve sabitleme şartlarının uygulanması gerekmektedir. Şekil 2.1’de gösterildiği üzere, bu şartlar, tasarım dışı uzay olarak ayrılan bölgelere, sırasıyla üst yüzeyde (-Z) yönünde 250 MPa basınç yükü ve alt yüzeye 3 eksenel 3 rotasyonel eksenle hareketi kısıtlayacak şekilde sabitleme uygulanmıştır (Bkz. Şekil 2.3).

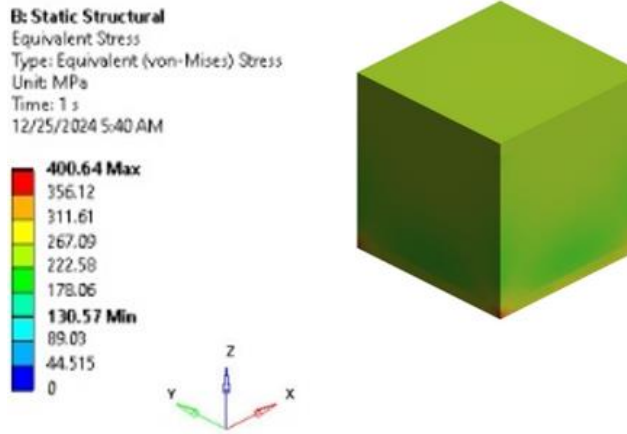


Şekil 2.3. Yazılımlarda oluşturulan mesh geometrileri ve sınır şartları (a) HyperWorks modeli (b) Ansys modeli (c) nTop modeli

Optimizasyon probleminin kurulmasından önceki son adım, parça üzerinde sonlu elemanlar analizi (ing. Finite element analysis) uygulayarak, parça üzerinde gerilmelerin dağılımını ve incelemek ve malzeme boşaltılacak bölgeri öngörmektir. Şekil 2.4'te üç yazılımda da uygulanan FEA sonuçları gösterilmiştir.

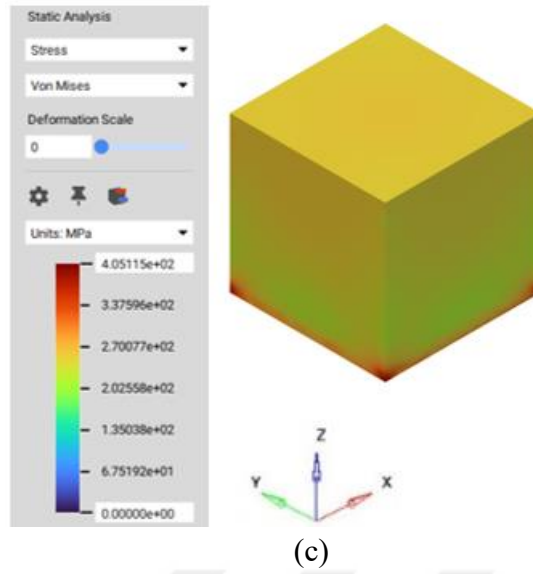


(a)



(b)

Şekil 2.4. Yazılımlarda alınan FEA sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop



Şekil 2.4. (Devam) Yazılımlarda alınan FEA sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop

FEA sonucunda, parça üzerinde görülen maksimum gerilme ve deplasman değerleri Tablo 2.2’de özetlenmiştir. FEA sonucunda gözlemlenen maksimum gerilme ve deplasman değerleri oldukça yakındır.

Tablo 2.2. Küp geometrisine uygulanan FEA sonuçları

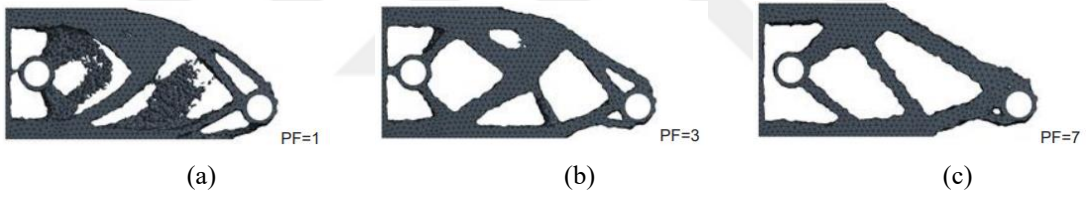
FEA Sonuçları	HyperWorks	Ansys	nTOP
Maks.Von-Mises Gerilmesi (MPa)	418	405	400
Maks. Deplasman (mm)	0.0604	0.0604	0.0603

Topoloji optimizasyonu probleminin kurgulanırken, yazılımları sunduğu tasarım yanıtları (ing. Design responses), hedef fonksiyon (ing. Objective function) ve tasarım kısıtları (ing. Design constraints) olarak belirlenmelidir. Ayrıca, bu adımda imalata yönelik kısıtlar (ing. Manufacturing constraints) girdileri yapılmalıdır. Oluşturulan kurgu şu şekildedir:

- Hedef fonksiyon: Min. Yapısal esneklik
- Tasarım kısıtı: 0.3 Üst hacim kısıtı
 - Hacim kısıtı, optimizasyon problemini, başlangıç ve final tasarım hacimlerini belirli bir oranı koruyacak şekilde kısıtlar. $V_{\text{final}} / V_{\text{başlangıç}}$ oranı 0.3 olarak belirlenmiştir, bu da maksimum uzaklaştırılabilir malzeme oranının %70 olabileceğini ifade eder.
- İmalat kısıt: 3 düzlemde simetri kısıtı
- Yakınsama kriteri: 0.001

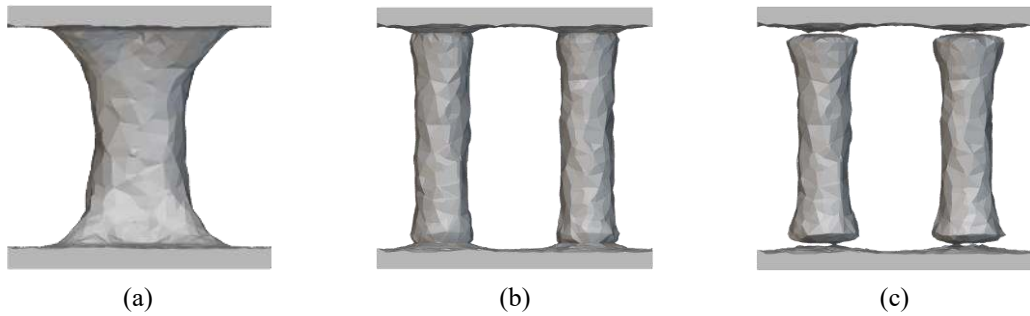
- Cezalandırma faktörü (P): 2
- nTop için Sınır Cezalandırması: 0.5

Yakınsama kriteri (ing. Convergence criteria), ardışık iki iterasyon arasındaki farkı sınırlandırmaktadır. Ardışık iki iterasyon arasında, hedef fonksiyon değeri, yakınsama kriteri değerinden küçük ise optimizasyon çözümü tamamlanmaktadır. Optimizasyon sonucunda daha ayırık ve detaylı sonuçlar almak için kullanılmaktadır. Ancak iterasyon sayısı ve çözücü süresi buna bağlı olarak artmaktadır. Yakınsama kriteri, karşılaştırılan 3 optimizasyon yazılımında da uygulanabilir. Cezalandırma faktörü (ing. Penalty factor) ise, SIMP metodu formülünden gelmektedir (bkz. Denklem 1). HyperWorks yazılımında bu değer, “DISCRETE (P-1)” parametresi ile girilmektedir ve imalat kısıtlarının da uygulandığı katı baskın (ing. Solid dominant) yapılar için 1 (P=2) olarak önerilmektedir [http-37]. Ansys yazılımında ise cezalandırma faktörü değeri doğrudan girilebilir ve cezalandırma faktörü arttıkça, uzaklaştırılan malzeme miktarı da artmaktadır (bkz. Şekil 2.5) [http-38]. Ancak adil bir karşılaştırma olması açısından Ansys yazılımında da cezalandırma faktörü 2 olarak girilmiştir.



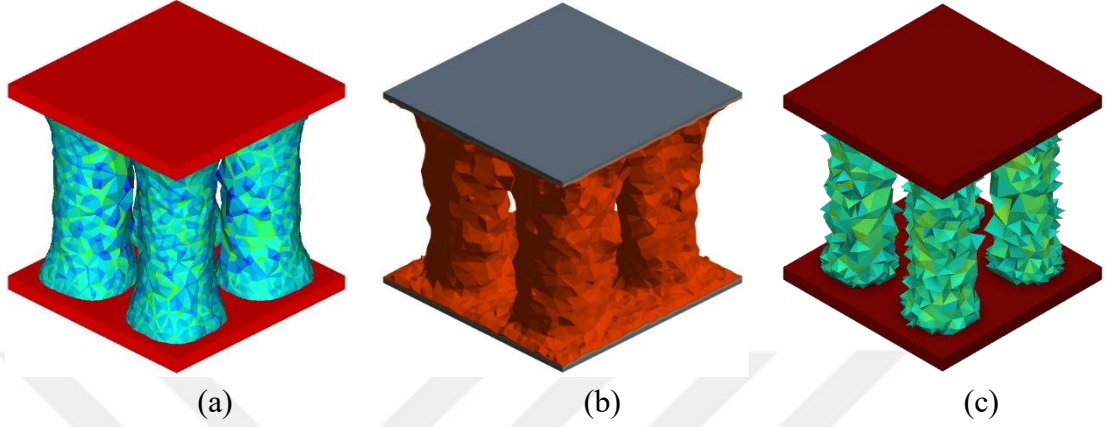
Şekil 2.5. Cezalandırma faktörünün Ansys’de uygulanabilirliği (a) P:1 (b) P:3 (c) P:7 [http-38]

nTop yazılımında ise, cezalandırma faktörünü girdisi yapılamamakla birlikte, benzer işleve parametre olan sınır cezalandırması uygulanmaktadır (ing. Boundary penalty) bu değer, 0 ila 1 arasında değişiyor olup başlangıç tasarımın sınırlarına göre optimizasyon sonucunu şekillendirmektedir (Bkz. Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sınır cezalandırmasının etkisi (a) 0 değeri (b) 0.5 değeri (c) 1 değeri

Optimizasyon problemi kurulduktan sonra, çözüm aşaması başlamaktadır. Şekil 2.7’de, her üç yazılımda da çözülen problemin, son iterasyonda ve 0.3 eşik değerindeki sonuçları gösterilmektedir.



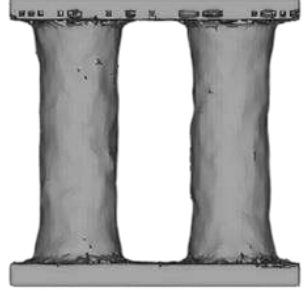
Şekil 2.7. 0.3 eşik değerinde kalan tasarım uzayları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop

Ticari optimizasyon yazılımlarının performanslarını karşılaştırmak adına, çözücü süreleri, iterasyon sayıları, elde edilen sonuçların yüzde hacim avantajları ve .STL dosya kaliteleri Tablo 2.3’te listelenmiştir.

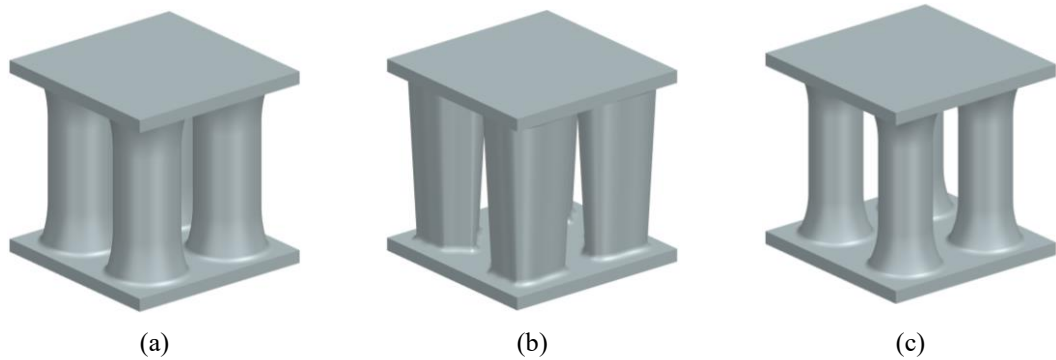
Tablo 2.3. Ticari yazılımların statik optimizasyon performansları ve .STL çıktıları

Ticari Yazılım	Çözücü Süresi	İterasyon Sayısı	Optimize Hacim ve Azaltma Oranı	.STL Görseli
HyperWorks	8 dk 27 sn	65	12304 mm ³ & %54.4	
Ansys	7 dk 56 sn	30	13600 mm ³ & %53.3	

Tablo 2.3. (Devam) Ticari yazılımların statik optimizasyon performansları ve .STL çıktıları

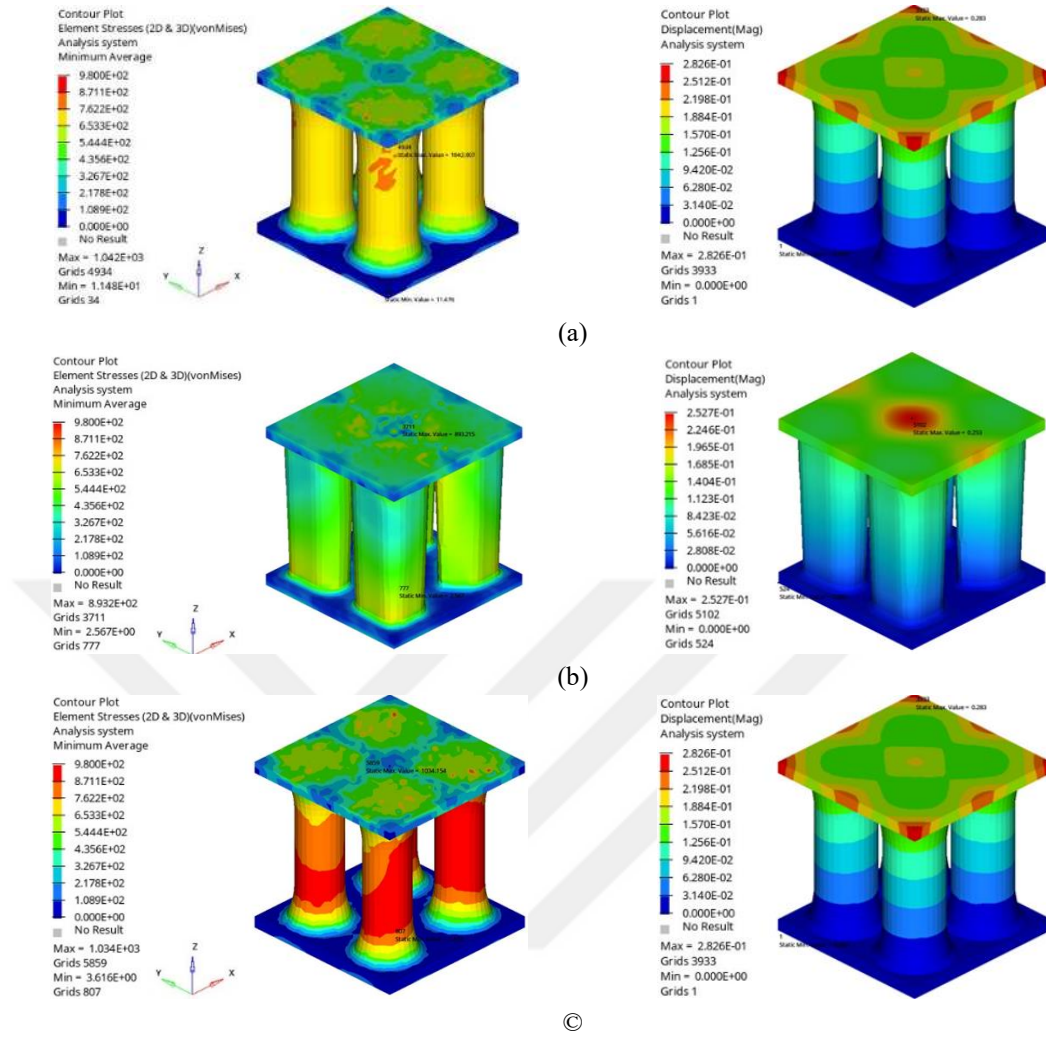
nTop	56 sn	63	8858 mm ³ & %67.2	
-------------	-------	----	------------------------------------	---

Sonuçlar incelendiğinde, tüm çözümlerin tasarım kısıt olarak verilen, hacim kısıtını karşıladığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, nTop ile alınan çözümün diğer yazılımlara kıyasla büyük bir süre ve hacim avantajı bulundurduğu ve yeniden tasarım işlemleri için dışarıya alınan (ing. Export) .STL dosya kalitesinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Optimize geometrilerin, sınır şartlarındaki davranışlarının incelenmesi için tekrar FEA uygulanması gereklidir. Bu nedenle optimize edilen geometrilerin düzgünleştirme ve yeniden tasarım işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve tekrar mesh geometrilerinin oluşturulması gereklidir. Düzgünleştirme ve yeniden tasarım işlemleri Siemens NX v2212 ortamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen katı modeller Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. .STL’den katı modele dönüştürülmüş topoloji optimizasyonu sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop

Düzgünleştirme ve yeniden tasarım sonrası, hacim avantajları, HyperWorks, Ansys ve nTop için sırasıyla, %54, %46.5 ve %64.7 oranlarına gerilemiştir. Ancak bu durumda da 0.3 hacim kısıtı sağlanmaktadır. Tablo 2.2’de optimizasyon öncesi uygulanan lineer statik analiz sonuçları, çözücü farkının belirgin bir etkisi olmadığını göstermektedir. Bu nedenle yeniden tasarlanan geometrileri doğrulamak için tüm geometriler HyperWorks ortamında yine aynı mesh parametreleri kullanarak analiz edilmiştir (bkz. Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Optimizasyon sonrası final geometrileri uygulanan FEA sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop

Elde edilen maksimum gerilme ve deplasman değerleri Tablo 2.4'te özetlenmiştir.

Tablo 2.4. Final geometrilere uygulanan FEA sonucunda elde edilen maksimum gerilme ve deplasman değerleri

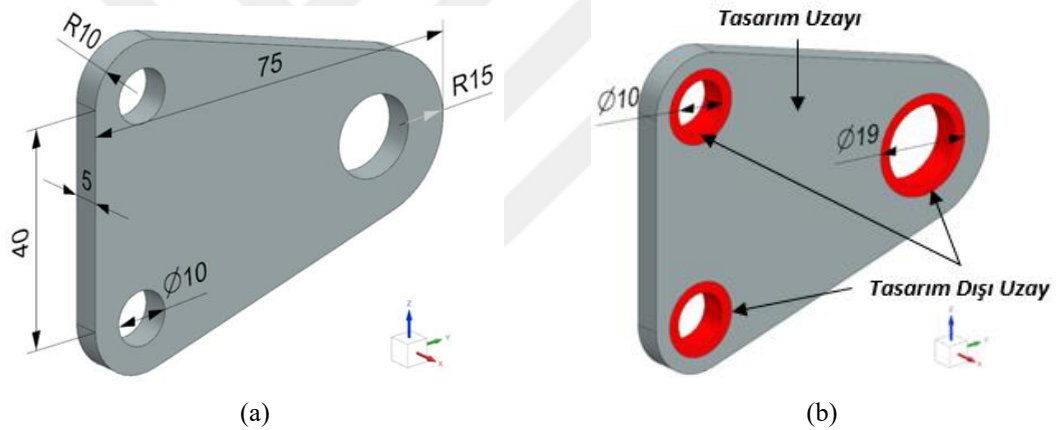
FEA Sonuçları	HyperWorks	Ansys	nTop
Maks. Von-Mises Gerilmesi(MPa)	1042	892	1034
Maks. Deplasman (mm)	0.282	0.253	0.325

Maksimum gerilme değerleri, başlangıç analiz değerlerine göre, HyperWorks, Ansys ve nTop için sırasıyla, %59.88, %55.16 ve %60.74 oranlarında artmıştır. Deplasman değerleri ise sırasıyla, %78.59, %76.17 ve %81.42 oranlarında artmıştır. Çözücü süresi, iterasyon sayısı ve .STL çıktı kalitesi anlamında nTop yazılımı avantaj göstermektedir. Ancak, hem nTop hem de HyperWorks yazılımlarında elde edilen

maksimum gerilme değerleri, In718 akma dayanımının üzerindedir [http-39]. Bu nedenle emniyetli gerilme şartları elde edilmemiştir. Bu durum tekrar tasarım iterasyonu gerçekleştirip, gerilmenin yığıldığı bölgelerde kalınlaştırma yapılarak engellenebilir ancak hacim avantajı azalacaktır. Bu nedenle emniyetli gerilme şartları sadece Ansys yazılımındaki sonuç ile elde edildiği gözlemlenmiştir.

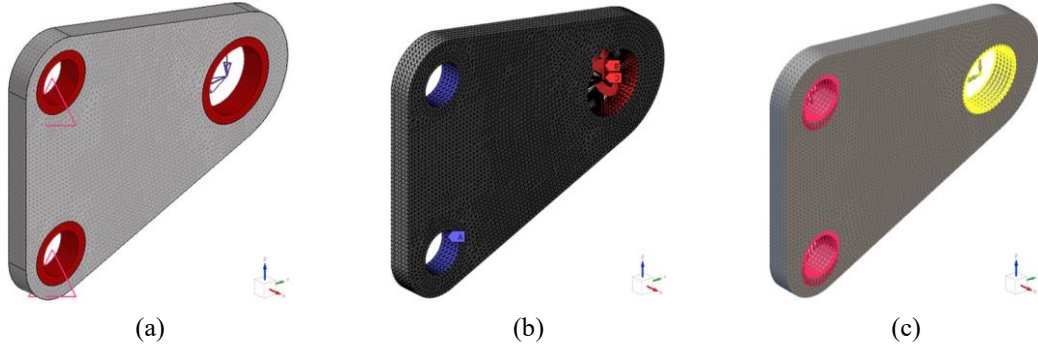
2.2. Dinamik Topoloji Optimizasyonu Problemi

Tablo 1.1’de verilen literatür özetinde, optimizasyon problemine, dinamik tasarım yanıtlarının birer kısıt olarak verilebildiği ve optimizasyon sürecine dahil edildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, Şekil 2.10a’da gösterilen hedef geometri üzerinde, ilk 3 modun doğal frekansı arttırılacak şekilde optimizasyon süreci çalışılmıştır. Belirlenen tasarım uzayı ve tasarım dışı uzay ise Şekil 2.10b’de gösterilmiştir.



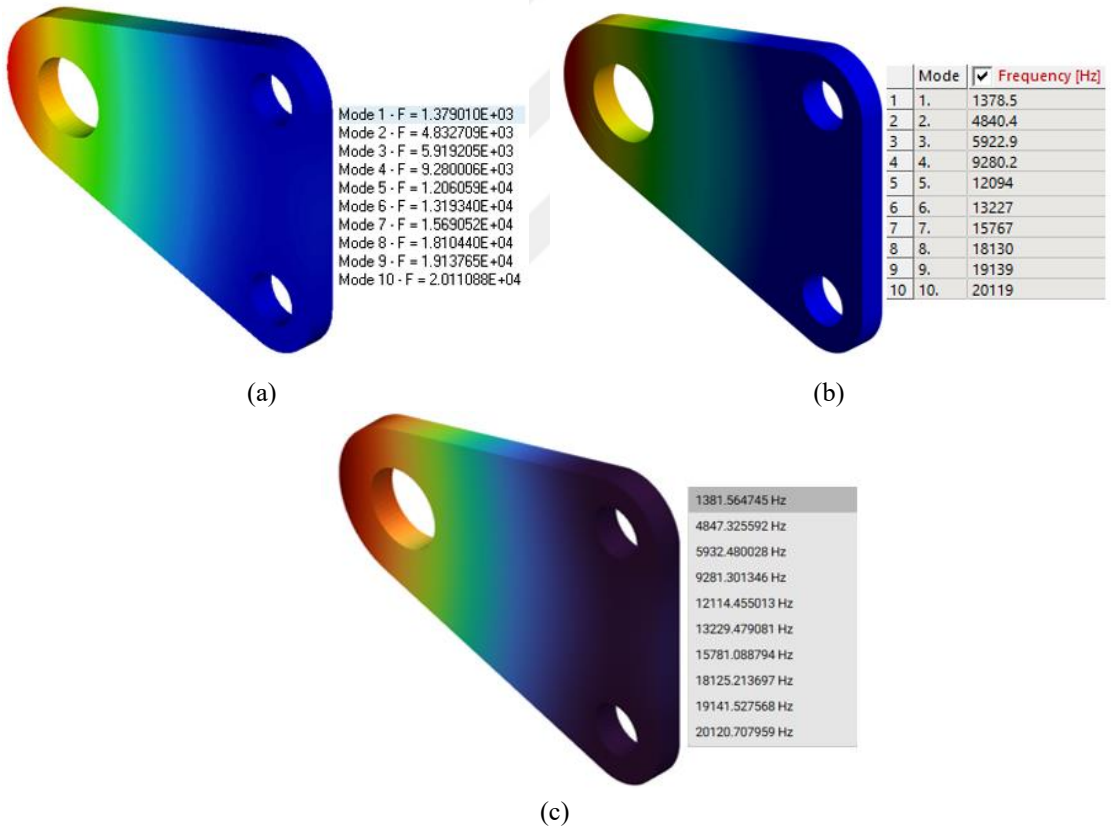
Şekil 2.10. Üçgen braket geometrisi (a) Başlangıç geometri ve (b) Tasarım uzayı ve tasarım dışı uzay

Statik optimizasyon probleminde de açıklandığı üzere mesh geometri, HyperWorks ortamında, 1 mm boyunda tetrahedral elemanlar kullanılmış, temas yüzeylerindeki düğümler 0.01 mm tolerans ile denklenmiş ve elemanların en-boy oranı 5 sınırını aşmayacak şekilde oluşturulmuştur ve elde edilen geometri, diğer yazılımlarda içeriye alınmıştır. Elde edilen geometri 71848 adet eleman ve 15756 adet düğümden oluşmaktadır. Malzeme verisi olarak Tablo 2.1’de gösterilen ortotropik In718 malzeme verisi kullanılmıştır. Şekil 2.11’de gösterildiği üzere, yük şartı olarak, 20 mm yarıçapa sahip delik merkezinde, (-Z) ekseninde 15000 N yük ve (+Y) ekseninde 30000 N.mm moment uygulanmış, sabitleme şartı olarak ise 10 mm yarıçapa sahip iki 10 mm’lik delik merkezlerinde 3 eksenel ve 3 rotasyonel ekseninde sabitleme uygulanmıştır.



Şekil 2.11. Oluşturulan mesh geometri ve sınır şartları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop

Parçanın bu sınır şartları altındaki, doğal frekanslarını çıkarmak için modal analiz uygulanmış ve ilk 3 modun doğal frekansları incelenmiştir. Şekil 2.12’de üç yazılımda da uygulanan modal analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Modal analiz sonuçları (a) HyperWorks (b) Ansys (c) nTop

3 yazılımda da elde edilen modal analiz sonuçlarına göre, ilk 3 modun doğal frekansları Tablo 2.5’te listelenmiştir.

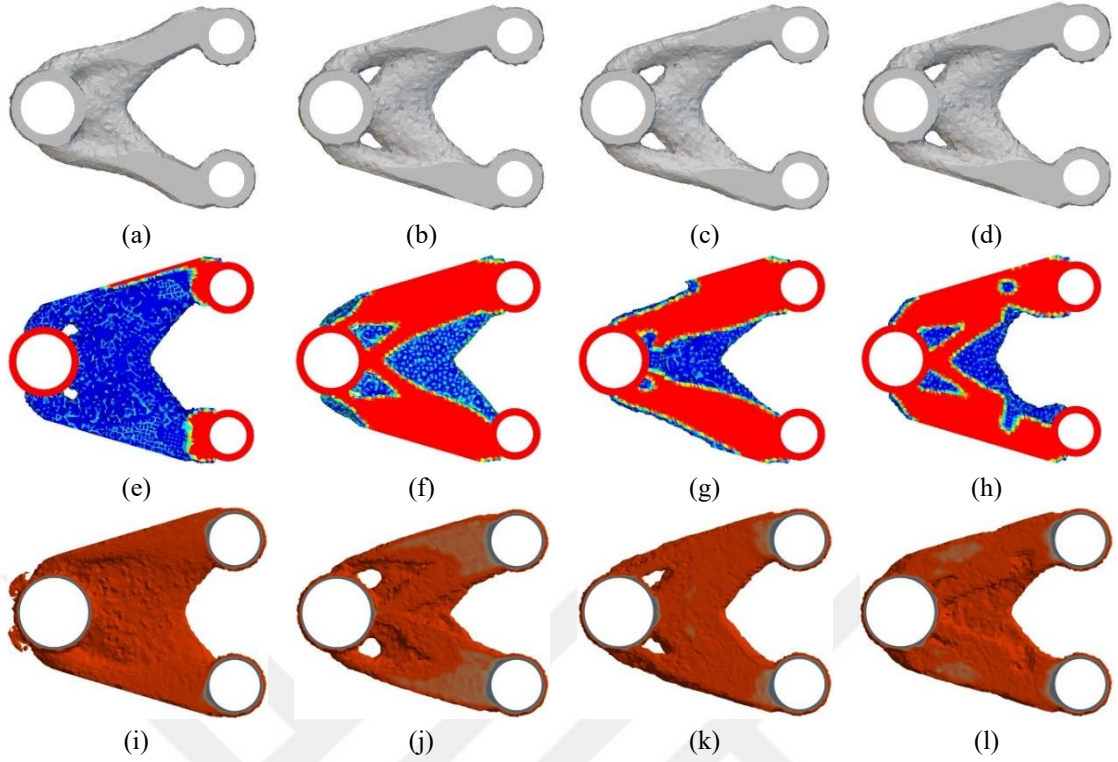
Tablo 2.5. *Başlangıç modal analiz sonuçları*

Modal Analiz Sonuçları	HyperWorks	Ansys	nTOP
1. Mod (Hz)	1379	1378.5	1381.5
2. Mod (Hz)	4833	4840.4	4847.3
3. Mod (Hz)	5932.4	5919	5923

Topoloji optimizasyonu için oluşturulan probleme ait hedef fonksiyon, tasarım ve imalat kısıtları şu şekildedir:

- Hedef fonksiyon: Min. Yapısal esneklik
- Tasarım kısıtı: 0.3 Üst hacim kısıtı
 - Hacim kısıtı, optimizasyon problemini, başlangıç ve final tasarım hacimlerini belirli bir oranı koruyacak şekilde kısıtlar. $V_{final} / V_{başlangıç}$ oranı 0.3 olarak belirlenmiştir, bu da maksimum uzaklaştırılabilir malzeme oranının %70 olabileceğini ifade eder.
- Tasarım kısıtı: Doğal frekans kısıtı
 - Modal analiz sonuçlarından elde edilen doğal frekans değerleri, ayrı ayrı alt kısıt olarak girilmiştir.
- İmalat kısıtı: XY düzleminde simetri kısıtı
- Yakınsama kriteri: 0.001
- Cezalandırma faktörü (P): 2
- nTop için Sınır Cezalandırması: 0.5

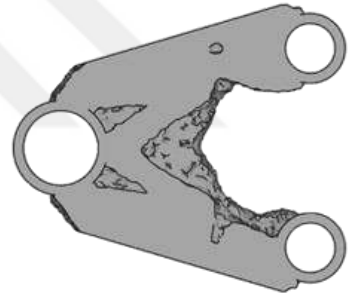
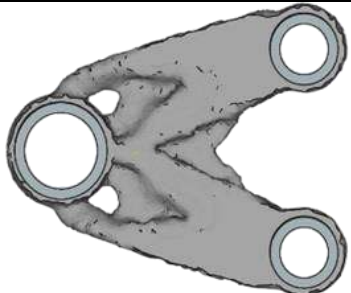
Doğal frekans kısıtının, optimizasyon sonucundaki tasarım uzayına etkisini anlamak için, probleme doğal frekans kısıtı eklenmeden çözüm alınmış ve daha sonra ayrı ayrı doğal frekans kısıtları eklenerek, kalan tasarım uzayının nasıl değiştiği incelenmiştir (Bkz. Şekil 2.13)



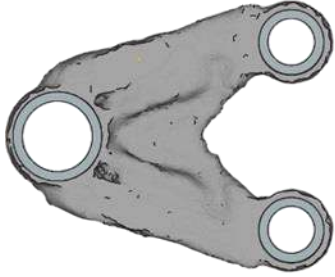
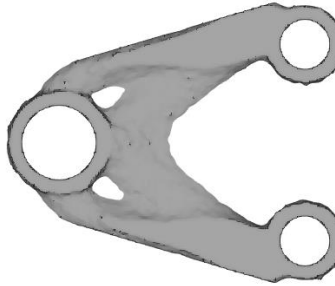
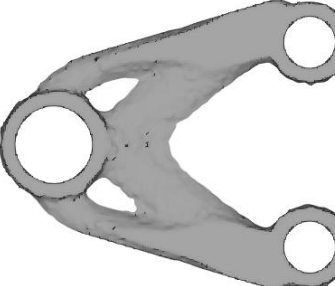
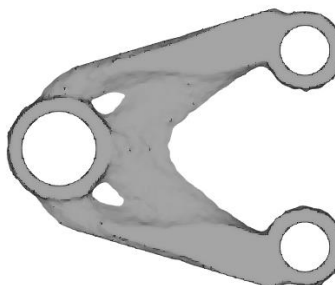
Şekil 2.13. Doğal frekans kısıtının optimizasyon sonucu üzerine etkisi (a) nTop doğal frekans kısıt eklenmemiş sonuç (b,c,d) sırasıyla 1. 2. ve 3. modların doğal frekanslarının kısıt olarak eklendiği durumda sonuçlar (e) HyperWorks doğal frekans kısıt eklenmemiş sonuç (f,g,h) sırasıyla 1. 2. ve 3. modların doğal frekanslarının kısıt olarak eklendiği durumda sonuçlar (i) Ansys doğal frekans kısıt eklenmemiş sonuç (j,k,l) sırasıyla 1. 2. ve 3. modların doğal frekanslarının kısıt olarak eklendiği durumda sonuçlar

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde doğal frekans kısıtı, kalan tasarım uzayında, ilgili minimum doğal frekans değerini sağlayabilmek için, malzeme dağılımını önemli ölçüde değiştirmiştir. Ticari optimizasyon yazılımlarının performanslarını karşılaştırmak adına, çözücü süreleri, iterasyon sayıları, elde edilen sonuçların yüzdece hacim avantajları ve .STL dosya kaliteleri Tablo 2.6’da gösterilmiştir.

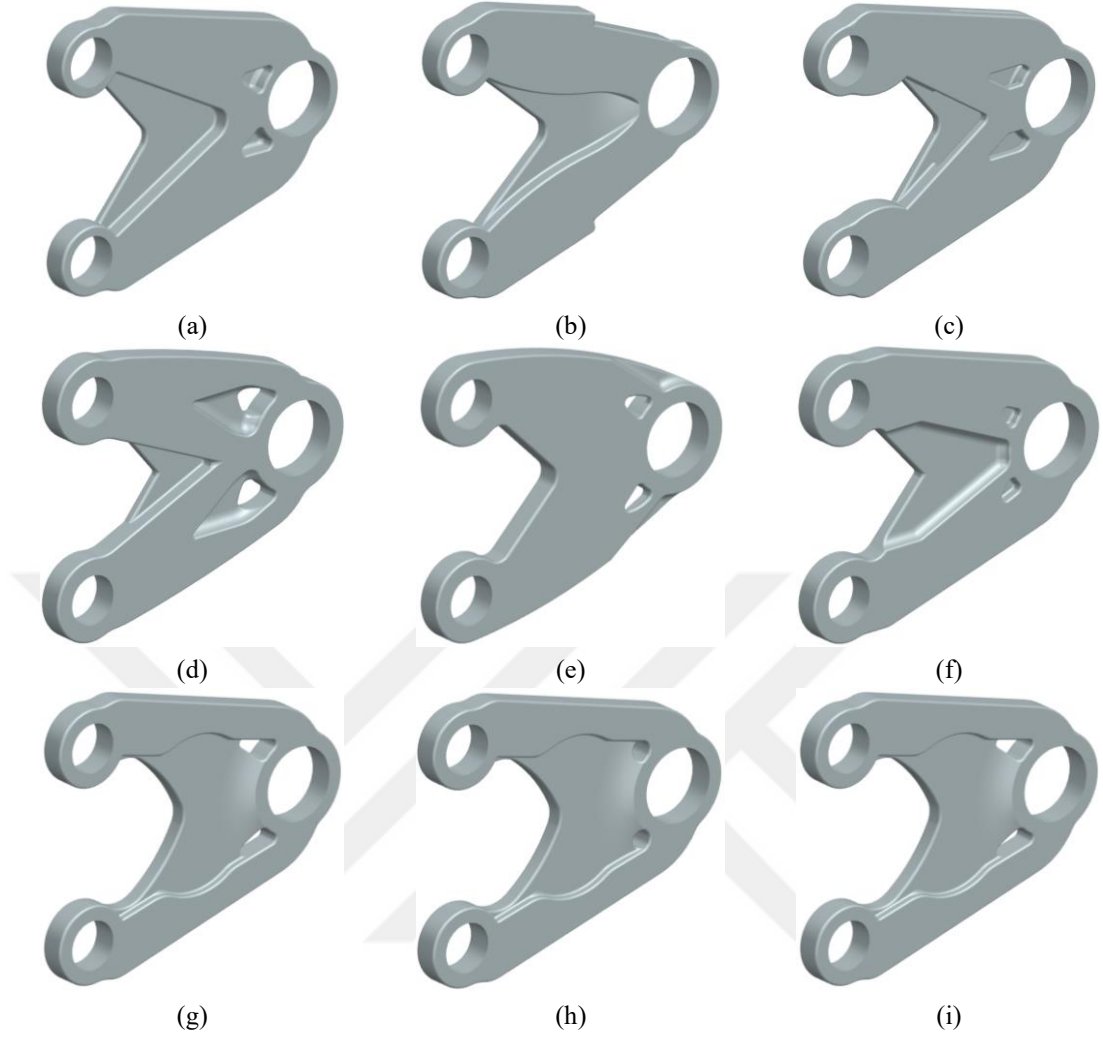
Tablo 2.6. Ticari yazılımların dinamik optimizasyon performansları ve .STL çıktıları

Ticari Yazılım		Çözücü Süresi	İterasyon Sayısı	Optimize Hacim ve Azaltma Oranı	.STL Görseli
HyperWorks	1.Mod	3 dk 36sn	26	7532 mm ³ & %47.71	
	2.Mod	6 dk 35 sn	49	6912 mm ³ & %52	
	3.Mod	4 dk 11 sn	31	6905 mm ³ & %52.1	
Ansys	1.Mod	6 dk 33 sn	29	8634 mm ³ & %40	
	2.Mod	4 dk 24 sn	20	8805 mm ³ & %38.9	

Tablo 2.6. (Devam) Ticari yazılımların dinamik optimizasyon performansları ve .STL çıktıları

Ansys	3.Mod	6 dk 2 sn	30	8817 mm ³ & %38.8	
nTop	1.Mod	2 dk 45 sn	31	7162 mm ³ & %50.3	
	2.Mod	2 dk 57 sn	32	7200 mm ³ & %50	
	3.Mod	2 dk 45 sn	31	7162 mm ³ & %50.3	

Sonuçlar incelendiğinde, tüm çözümlerin, tasarım kısıt olarak verilen, hacim kısıtını karşıladığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, nTop yazılımına ait 1. mod ve 3. mod çözümlerinin, kalan hacim miktarları, iterasyon sayıları ve çözüm sürelerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkarak, doğal frekans kısıtının ticari yazılımlardaki uygulanabilirliğini anlamak için, düzgünleştirme ve yeniden tasarım adımlarının gerçekleştirilip, doğrulama amaçlı modaliz analiz uygulanarak sonuçların incelenmesi gerekmektedir. Düzgünleştirme ve yeniden tasarım işlemleri Siemens NX V2212 ortamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen katı modelleri Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. .STL'den katı modele dönüştürülmüş optimizasyon sonuçları (a,b,c) HyperWorks sırasıyla 1. 2. ve 3. modun kısıtlanması ile elde edilen sonuçlar (d,e,f) Ansys sırasıyla 1. 2. ve 3. modun kısıtlanması ile elde edilen sonuçlar (g,h,i) nTop sırasıyla 1. 2. ve 3. modun kısıtlanması ile elde edilen sonuçlar

Düzgünleştirme ve yeniden tasarım sonrası, hacim avantajları, HyperWorks ilk 3 mod sonucu için sırasıyla %41.4, %38.9 ve %47.5 oranlarına, Ansys ilk 3 mod için sırasıyla %36.9, %35.8 ve %34.1 oranlarına, nTop ilk 3 mod için sırasıyla %44.8, %44.1 ve %44.8 oranlarına düşmüştür. Ancak bu durumda da 0.3 hacim kısıtı sağlanmaktadır. Tablo 2.5'te gösterilen optimizasyon öncesi uygulanan modal analiz sonuçları, çözücü farkının belirgin bir etkisi olmadığını göstermektedir. Bu nedenle yeniden tasarlanan geometrileri doğrulamak için tüm geometriler HyperWorks ortamında yine aynı mesh parametreleri kullanarak analiz edilmiştir. Doğrulama analizinden elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2.7'de özetlenmiştir. Farklı modların frekans değerlerinin kısıt olarak verilmesinin, diğer modlara olan etkisini anlamak adına, her geometri için ilk üç

mod incelenmiştir. Optimizasyon öncesi doğal frekans değerlerinden, daha yüksek değere sahip sonuçlar yeşil renk ile işaretlenmiştir.

Tablo 2.7. Doğrulama analizleri sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri

Modal Analiz Sonuçları		HyperWorks	Ansys	nTOP
1. Mod Kısıtı	1. Mod (Hz)	1469	1559	1304
	2. Mod (Hz)	4617	4936	4193
	3. Mod (Hz)	7668	6656	6478
2. Mod Kısıtı	1. Mod (Hz)	1681	1529	1290
	2. Mod (Hz)	5451	5394	4193
	3. Mod (Hz)	7657	6385	6520
3. Mod Kısıtı	1. Mod (Hz)	1560	1014	1304
	2. Mod (Hz)	4849	3686	4193
	3. Mod (Hz)	7740	5993	6478

Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- HyperWorks yazılımında, 1. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, 1. ve 3. modun doğal frekans değerlerini sırasıyla ~%6 ve ~%22.8 oranlarında arttırmıştır. Ancak, 2. modun doğal frekansını ~%4.5 oranında düşürmüştür.
- HyperWorks yazılımında 2. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, ilk 3 modun doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%18, ~%11.4 ve ~%22.7 oranlarında arttırmıştır.
- HyperWorks yazılımında, 3. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, ilk 3 modun doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%11.6, ~%0.5 ve ~%23.5 oranlarında arttırmıştır.
- Ansys yazılımında 1. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, ilk 3 modun doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%11.6, ~%1.9 ve ~%11 oranlarında arttırmıştır.
- Ansys yazılımında 2. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, ilk 3 modun doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%23, ~%10.3 ve ~%7.2 oranlarında arttırmıştır.
- Ansys yazılımında 3. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, 1. ve 2. modların doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%26.4, ~%23.8 oranlarında düşürmüştür. Ancak, 3. modun doğal frekans değerini, ~%1.2 oranında arttırmıştır.

- nTop yazılımında 1. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, 1. ve 2. modların doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%5.6 ve ~%13.5 oranlarında düşürmüştür. Ancak, 3. modun doğal frekans değerini ~%8.4 oranında arttırmıştır.
- nTop yazılımında 2. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, 1. ve 2. modların doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%6.6 ve ~%13.5 oranlarında düşürmüştür. Ancak, 3. modun doğal frekans değerini, %8.4 oranında arttırmıştır.
- nTop yazılımında 3. modun doğal frekans değerinin kısıt olarak verilmesi, 1. ve 2. modların doğal frekans değerlerini sırasıyla, ~%5.6 ve ~%13.5 oranlarında düşürmüştür. Ancak, 3. modun doğal frekans değerini ~%8.4 oranında arttırmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

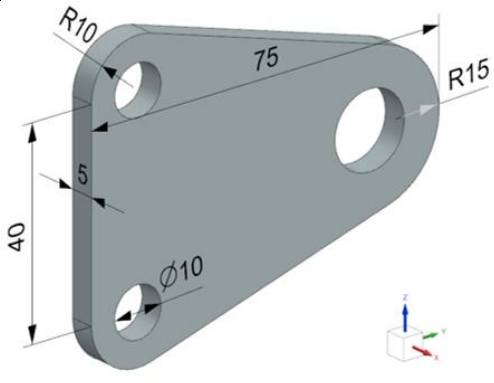
3.1. Numune Üretimi ve Boyutsal Doğrulama

Deneysel doğrulama faaliyetlerinde kullanılmak üzere, statik topoloji optimizasyonu problemlerinden elde edilen kübik parçalardan ve dinamik topoloji optimizasyonu probleminden, 1. Mod'un doğal frekans değerinin optimizasyon kısıtı olarak verildiği durumda elde edilen braket sonuçlarından, Tablo 3.1'de listelenen adetlerde deney seti üretilmiştir. Braket sonuçlarına uygulanan doğrulama analizinden elde edilen veriler (Bkz. Tablo 2.7) incelendiğinde, 1. Mod'un daha düşük frekansta rezonans riski oluşturması ve çevresel titreşimlerin (örn. Motor titreşimi, rüzgar vb.) yaygın frekans aralıklarına daha yakın olması nedeniyle deneysel olarak davranışının incelenmesi amaçlanmıştır [81].

Tablo 3.1. Deneysel doğrulama faaliyetlerinde kullanılmak üzere üretilecek numuneler

Üretilen Numune	Adet	Görsel
HyperWorks Küp Sonucu	2	
Ansys Küp Sonucu	2	
nTop Küp Sonucu	2	

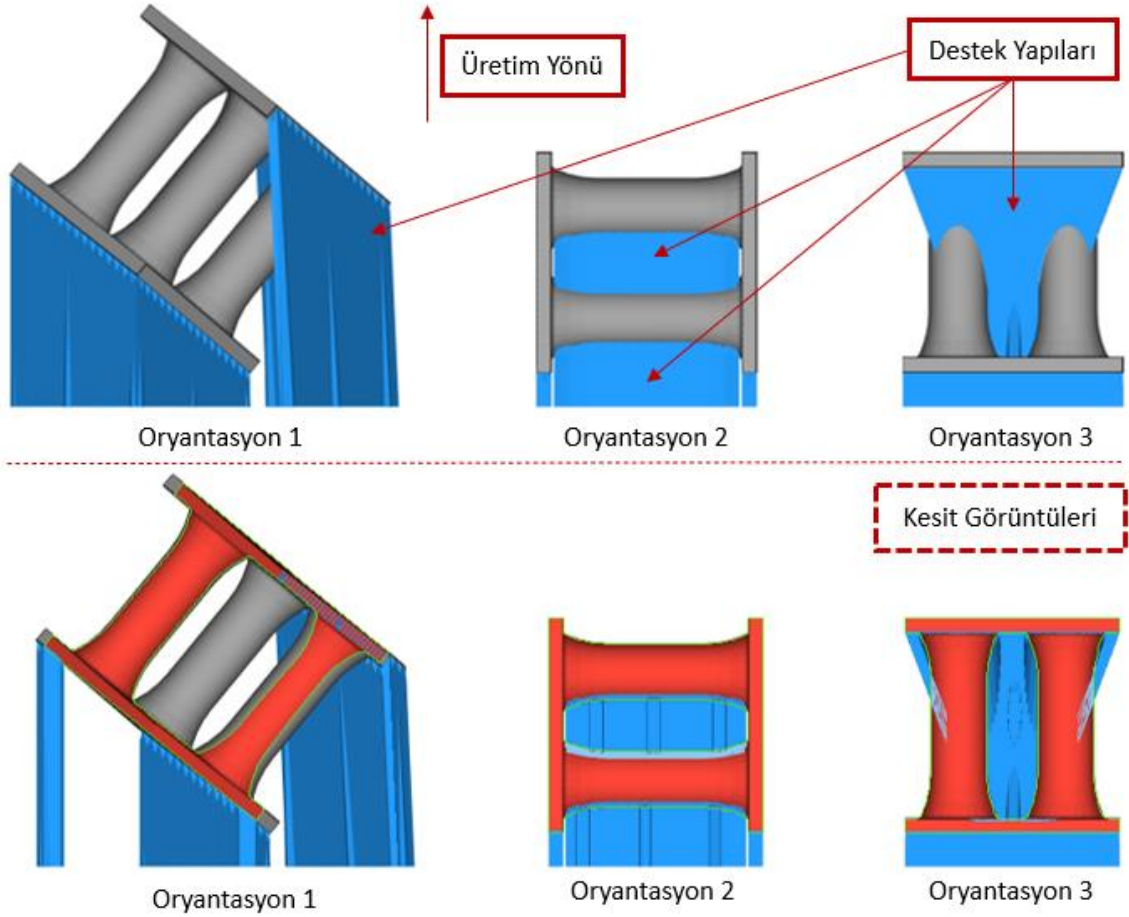
Tablo 3.1. (Devam) *Deneyisel doğrulama faaliyetlerinde kullanılmak üzere üretilecek numuneler*

HyperWorks Braket Sonucu	1	
Ansys Braket Sonucu	1	
nTop Braket Sonucu	1	
Başlangıç Üçgen Braket Geometrisi	1	

3.1.1. Numune üretimi

Parçaların, oryantasyon ve destek çalışmaları Materialise Magics yazılımında gerçekleştirilmiştir ve In718 15-53µm toz malzemeden, EOS M290-400W tezgahında ve 40µm katman kalınlığında üretilmiştir. Şekil 3.1’de küp geometrileri için üç farklı üretim oryantasyonu gösterilmiştir. Üretim platformu ile arasında 45° değerinden daha düşük bir açı değerine sahip yüzeyler için destek yapıları oluşturulmuştur. Destek yapıları, imalat

sonrası parça üzerinden uzaklaştırılan yapılar olduğu için aslında atık malzemeyi temsil etmektedir. Bu nedenle kullanılacak destek yapısı miktarının, maliyet etkinlik açısından az olması tercih edilmelidir. Ayrıca, LB-PBF prosesindeki koruyucu atmosfer gazının sarfıyatı ve tezgah bileşenlerinin sarfıyatı göz önüne alındığında, üretim yönünde daha az katman sayısına yani daha az yüksekliğe sahip oryantasyondaki katman sayısı daha olacak ve dolayısıyla üretim süresi azalacaktır, bu nedenle daha az katman sayısına sahip oryantasyonun tercihi maliyet açısından daha etkindir. Destek yapıları, üretim sonrası çeşitli işleme (ing. Machining) yöntemleri veya manuel yöntemler ile uzaklaştırılabilir, bu nedenle oluşturulan destek yapılarına erişebilirlik önem arz etmektedir.



Şekil 3.1. Küp geometrilerinin farklı oryantasyonlardaki destek ihtiyacı

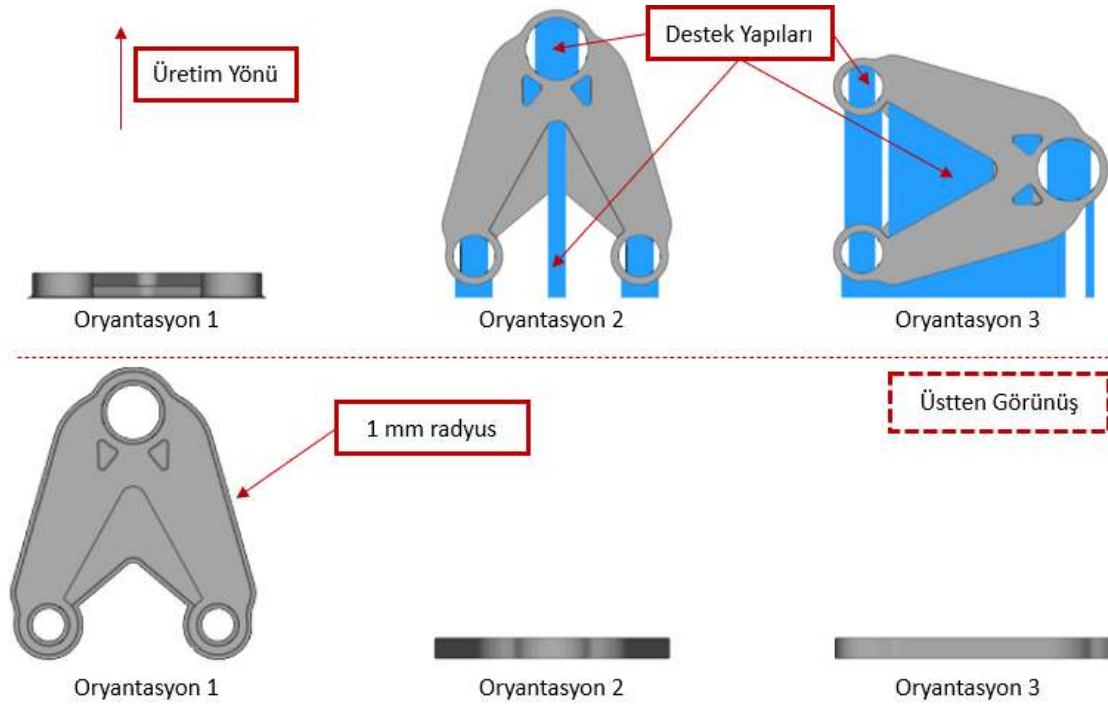
Numune üretiminde oryantasyon seçiminde, farklı oryantasyonlardaki destek miktarı, katman sayısı ve destek yapılarının sökülebilirliği göz önüne alınmıştır. Üç farklı oryantasyonda harcanacak destek miktarı, oluşacak katman sayısı ve destek sökülebilirliklerine yönelik karşılaştırma Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Üç farklı oryantasyonda destek miktarları, katman sayıları ve sökülebilirlik

Değerlendirme	Oryantasyon 1	Oryantasyon 2	Oryantasyon 3
Destek Miktarı (mm ³)	4786.1	4551.8	9066.4
Katman Sayısı	1370	867	867
Sökülebilirlik	İyi	Kötü	Kötü

Oryantasyon 1 ve oryantasyon 2’de ihtiyaç duyulan destek miktarları, oryantasyon 3’e göre ~%50 daha azdır. Oryantasyon 2 ve oryantasyon 3’de katman sayıları aynı olup, oryantasyon 1’e göre ~%37 daha azdır. Ancak, Şekil 3.1’de gösterilen oryantasyonlara ait kesit görüntüleri incelendiğinde, oryantasyon 2 ve oryantasyon 3’de parça içerisinde erişilemeyecek bölgelerde destek yapısı ihtiyacı oluşmaktadır. Oryantasyon 1 destek miktarı ve katman sayısı açısından dezavantaja sahip olmasına karşın, sökülebilirlik anlamında diğer oryantasyonlara göre avantajlı konumdadır. Bu nedenle imalat adımı, küp geometrisi için oryantasyon 1 tercih edilmiştir. Oryantasyon 1’de kübik numune, üretim yönüne (Z) ve alttaşı yüzeyine (XY) açılı konumdadır. In718 malzemenin LB-PBF ile üretimine yönelik ASTM F3055 standardı incelendiğinde minimum çekme verilerinin (Z) ve (XY) yönlerinde ~%6 değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle mekanik performanstaki bu değişim, tasarım açısından ihmal edilebilir [http-39].

Şekil 3.2’de braket geometrilerine yönelik üç farklı üretim oryantasyonu Oryantasyon 1’de braket geometrisinin, doğrudan üretim platformu üzerine yerleştirilmiş ve 45° altında açılı değerine sahip yüzey oluşmadığı için, harici destek yapısı ihtiyacı oluşmamıştır. Ancak, parça ile üretim platformu yüzeyi arasına, parça ayrılırken kesilmek üzere, imalat payı oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle, parça ve üretim platformunun yüzeyi arasına 1 mm radyus oluşturulmuştur ve oluşturulan pay, üretim sonrası uzaklaştırılacağı için destek yapısı olarak değerlendirilmiştir.



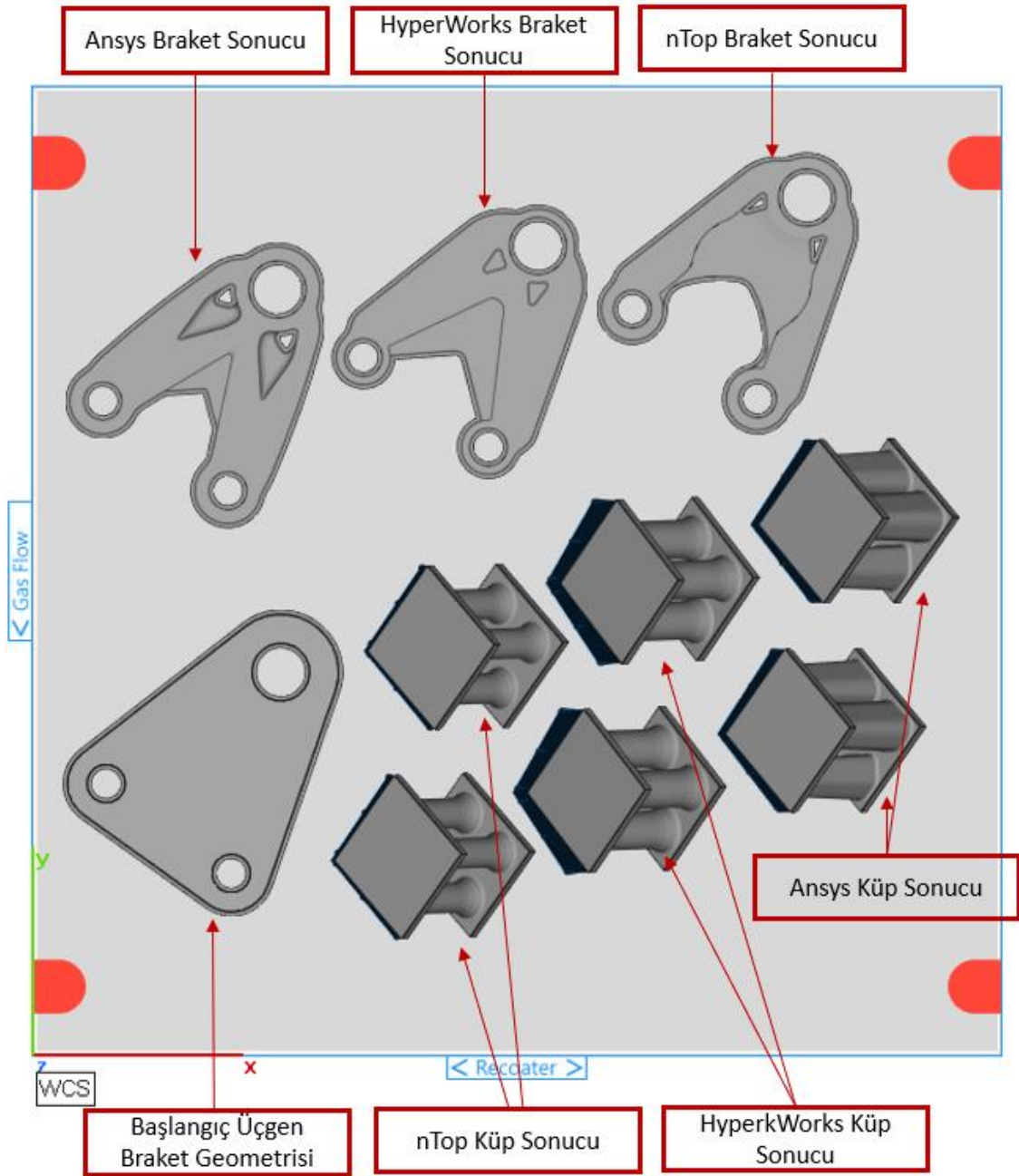
Şekil 3.2. Braket geometrilerinin farklı oryantasyonlardaki destek ihtiyacı

Tablo 3.3'te braket geometrisi için önerilen oryantasyonların, destek miktarları, katman sayıları ve sökülebilirlik durumları listelenmiştir. Oryantasyon 1 ve oryantasyon 2'de oluşturulan destek miktarı, oryantasyon 3'e göre ~%50 daha az olup, oryantasyon 1'de katman sayısı, oryantasyon 2 ve oryantasyon 3'e göre sırasıyla ~%92 ve ~%89 daha azdır. Ayrıca, oryantasyon 1'de oluşturulan imalat payı, üretim sonrası parçalar üretim platformundan ayrılırken kesileceği için harici bir manuel destek temizleme işlemi gerektirmeyecektir. Bu nedenle üçgen braket geometrilerinin imalatında da oryantasyon 1 tercih edilmiştir.

Tablo 3.3. Üç farklı oryantasyonda destek miktarları, katman sayıları ve sökülebilirlik

Değerlendirme	Oryantasyon 1	Oryantasyon 2	Oryantasyon 3
Destek miktarı (mm ³)	2045	2124	4211
Katman sayısı	150	1737	1467
Sökülebilirlik	İyi	Kötü	Kötü

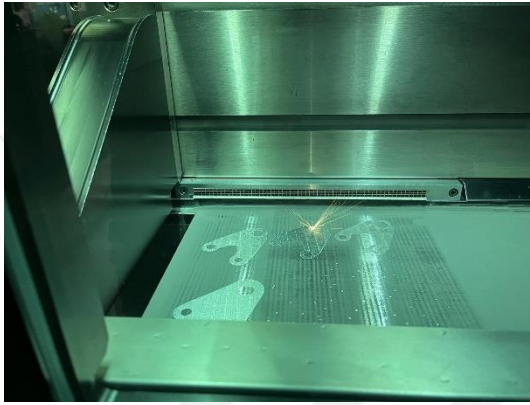
Oryantasyonların belirlenmesi ve destek yapılarının oluşturulmasının ardından, parçalar Şekil 3.3'te gösterildiği düzende (ing. Layout) üretilmiştir.



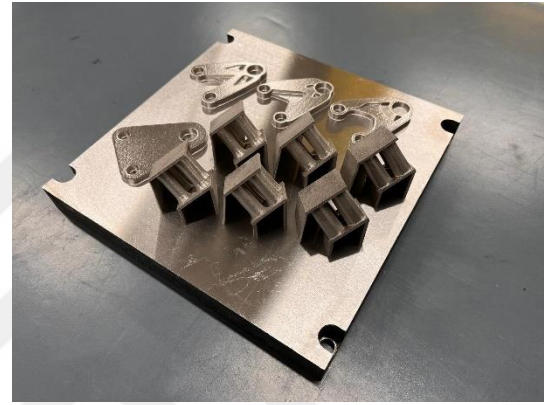
Şekil 3.3. LB-PBF imalat düzeni

Şekil 3.4'te parçaların imalat ve ardıl işlem adımları gösterilmiştir. LB-PBF teknolojisi ile üretilen parçalarda (bkz. Şekil 3.4a ve Şekil 3.4b), hızlı ergime-katılaşma çevrimlerine maruz kalınmasından dolayı, parça üzerinde çarpılmaya neden olan artık gerilmeler oluşmaktadır. Bu nedenle parçalara, üretim platformundan ayrılmadan ve destek yapıları uzaklaştırılmadan önce gerilim giderme (ing. Stress relief) ısıtma işlemi uygulanmıştır. Gerilim giderme ısıtma işleminin mekanik özellikleri üzerine etkisi gözlemlenmemektedir [82][85]. Isıtma işleminin atmosferin fırında gerçekleştirilmesinden

dolayı, parça yüzeylerinde ve üretim platformu yüzeyinde oksidasyon (bkz. Şekil 3.4c), gözlemlenmiştir. Oksidasyon, tel erozyon üretim platformundan ayırma işleminde (bkz. Şekil 3.4d), telin ilerlemesini engellediği için parçaların üretim platformu ile arayüz oluşturduğu bölgelere manuel kumlama yapılmış ve oksit tabakası uzaklaştırılmıştır. Ardından üretim platformundan ayrılma işlemi tamamlanmıştır. Son olarak, kübik parça yüzeylerindeki destek yapıları manuel yöntemler ile uzaklaştırılmış ve destek yapılarından kalan çapaklar temizlenmiştir (bkz. Şekil 3.4e ve Şekil 3.4f).



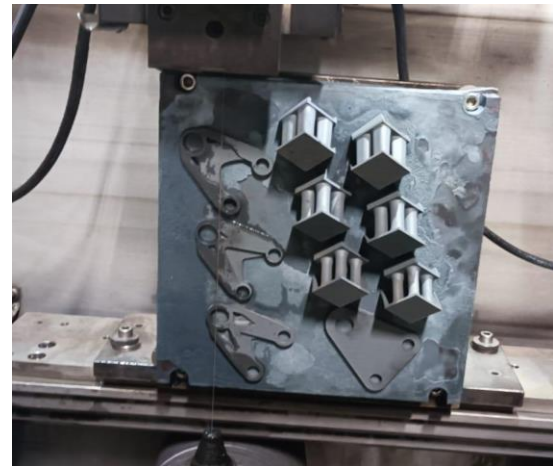
(a)



(b)

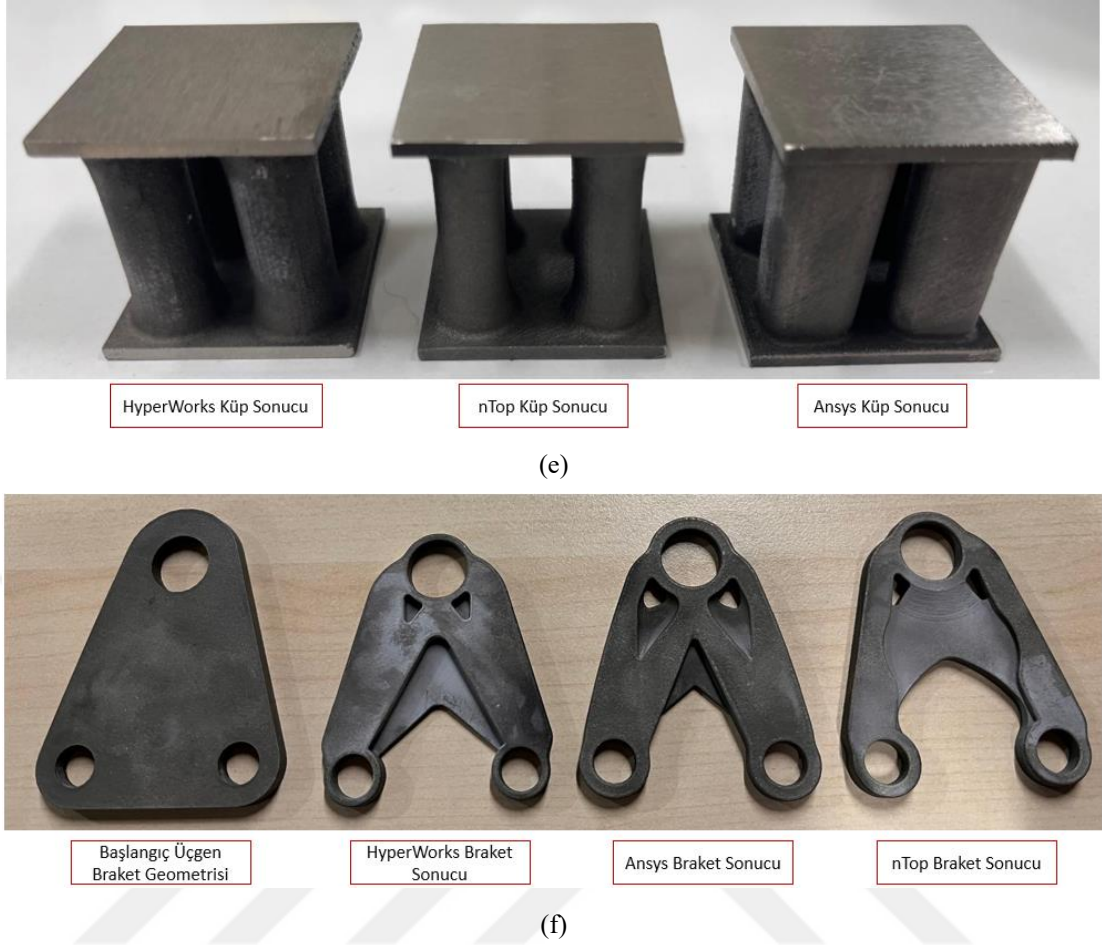


(c)



(d)

Şekil 3.4. LB-PBF imalat adımları (a) LB-PBF üretim adımı (b) LB-PBF imalat sonrası parçaların üretim platformu üzerinde ve destek yapıları halleri (c) Gerilim giderme ısıtma işlemi sonrası ve oluşan oksitlenen tabakası (d) Tel erozyon ile üretim platformundan ayırma işlemi (e) Küp geometrilerinin destek temizliği sonrası halleri (f) Braket geometrilerinin ayırma işlemi sonrası halleri

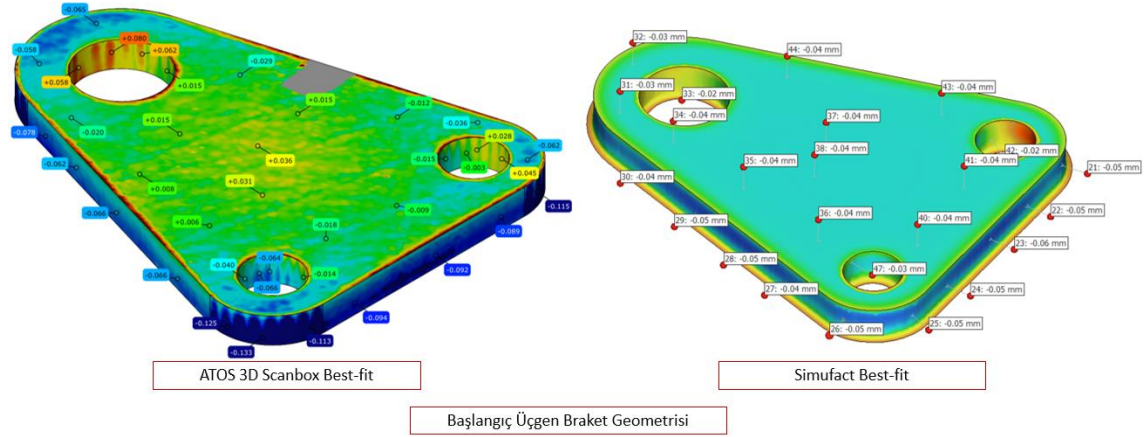


Şekil 3.4. (Devam) LB-PBF imalat adımları (a) LB-PBF üretim adımı (b) LB-PBF imalat sonrası parçaların üretim platformu üzerinde ve destek yapıları halleri (c) Gerilim giderme ısıtma işlemi sonrası ve oluşan oksitlenen tabakası (d) Tel erozyon ile üretim platformundan ayırma işlemi (e) Küp geometrilerinin destek temizliği sonrası halleri (f) Braket geometrilerinin ayırma işlemi sonrası halleri

3.1.2. Boyutsal doğrulama

Şekil 3.3'te üretim senaryosu gösterilen numunelere, imalat öncesi Hexagon Simufact-Additive ortamında mekanik LB-PBF proses simülasyonu uygulanmıştır. Simülasyon çalışmasında sırasıyla, LB-PBF, gerilim giderme ısıtma işlemi, üretim platformundan ayırma ve destek uzaklaştırma adımları yer almaktadır. Simülasyon sonrası elde edilen çarpılmış geometri, parçanın model verisi ile karşılaştırılarak (ing. Best-fit) yüzey sapmaları incelenmiştir. Gerçek imalat şartları ile karşılaştırmak için, imalat sonrası ardıl işlemleri tamamlanmış parçalar Atos 3D Scanbox ile taranarak, aynı model verisi üzerinden best-fit uygulanmıştır. Şekil 3.5'te başlangıç üçgen braket geometrisine ait tarama ve proses simülasyonu karşılaştırması gösterilmiştir. Tarama sonuçları göre parça kenarlarından 60-130µm çekmeye çalışırken, üst yüzeyinin ortasından, üretim yönüne paralel yönde ~40µm çarpılmaktadır. Proses simülasyonu sonuçlarına göre parça

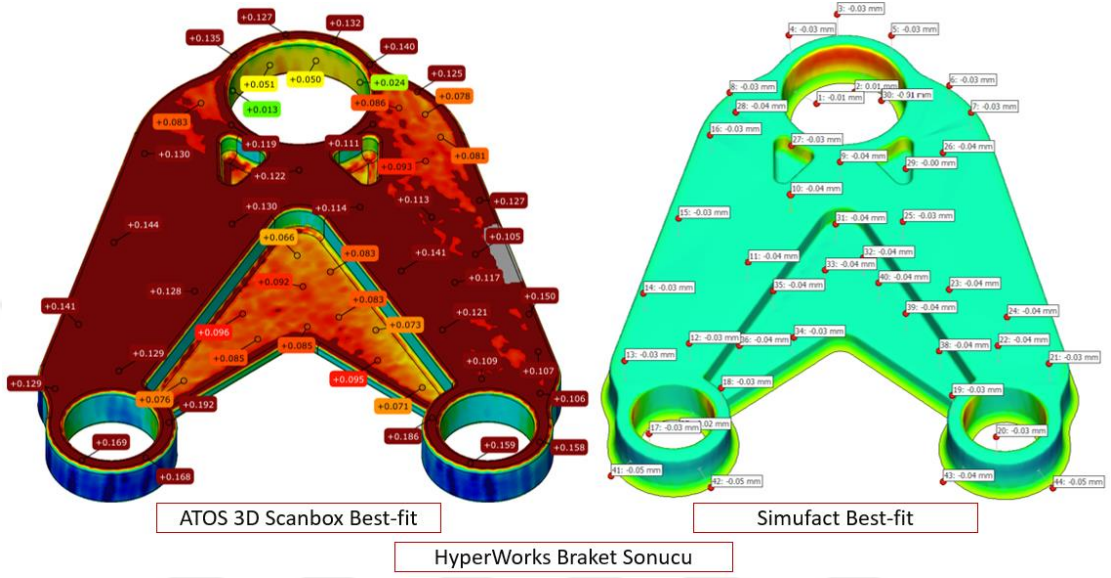
ise hem üst yüzeyinden hem de kenarlarından, ağırlık merkezine doğru 30-50µm çekmeye çalışmaktadır. Proses simülasyonunda parçanın kenarları benzer davranış gösterirken, üst yüzeyin çarpılma davranışında farklılıklar gözlemlenmiştir. Ayrıca, gerçek şartlarda oluşan çarpılmalar büyüklük olarak daha fazladır.



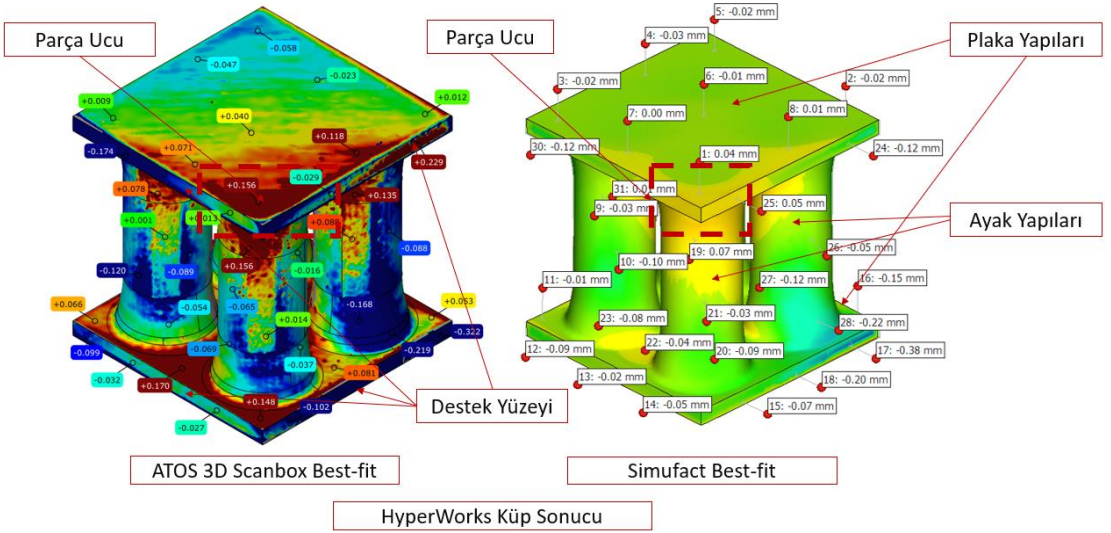
Şekil 3.5. Başlangıç üçgen braket geometrisinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması

Şekil 3.6'da HyperWorks ile elde edilen geometrilere ait proses simülasyonu sonuçları ve tarama sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.6a gösterilen braket geometrisinin tarama sonuçlarına göre, parça kenarlarından 40-100 µm aralığında çarpılırken, üst yüzeyinden üretim yönüne paralel olarak 100-150µm aralığında çarpılmaktadır. Proses simülasyonu sonuçlarına göre ise parça kenarlarından ~50µm üst yüzeyinden ise ~40µm çekmeye çalışmaktadır. Simülasyon ve tarama sonuçları karşılaştırıldığında, çarpılma yan kenarlar için aynı doğrultuda iken, gerçek proses şartlarında çarpılma miktarı daha fazladır. Üst yüzey için ise çarpılma doğrultuları zıt olup gerçek proses şartlarında çarpılma miktarı daha fazladır. Şekil 3.6b'de gösterilen küp geometrisinin tarama sonuçlarına göre, parçanın uç kısmı ve plaka yapılarının, ayak yapıları ile birleştiği bölgeler, ~150µm çarpılmaktadır. Bu durum üretim oryantasyonunda, parça ucunun, toz yatağında son katmanları oluşturması ve iki tarama arasındaki sürenin azalmasından kaynaklı daha fazla ısı birikmesinden ve ayak yapılarının birleşim yerlerinde, desteklenmemiş sarkan yüzey oluşturmasından kaynaklı oluşan, kötü ısı iletiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, tarama sonuçlarına göre, ayak yapılarının yüzeyleri 50-150µm çekmeye çalışmaktadır. Proses simülasyonu sonuçlarına göre, ise uç kısım ve sarkan yüzeylerde çarpılma değerleri 40-70 µm aralığında değişirken, ayak yapılarının

yüzeyleri $\sim 60 \mu\text{m}$ çekmeye çalışmaktadır. Çarpılma miktarları arasında fark olmasına karşın, çarpılma doğrultuları nümerik ve deneysel sonuçlar için aynıdır. Ayrıca, tarama sonuçlarında, destek uzaklaştırma işlemlerinden kalan izler gözlemlenmiştir. Bu nedenle bu bölgelerdeki deformasyon sadece çarpılma kaynaklı değildir.



(a)

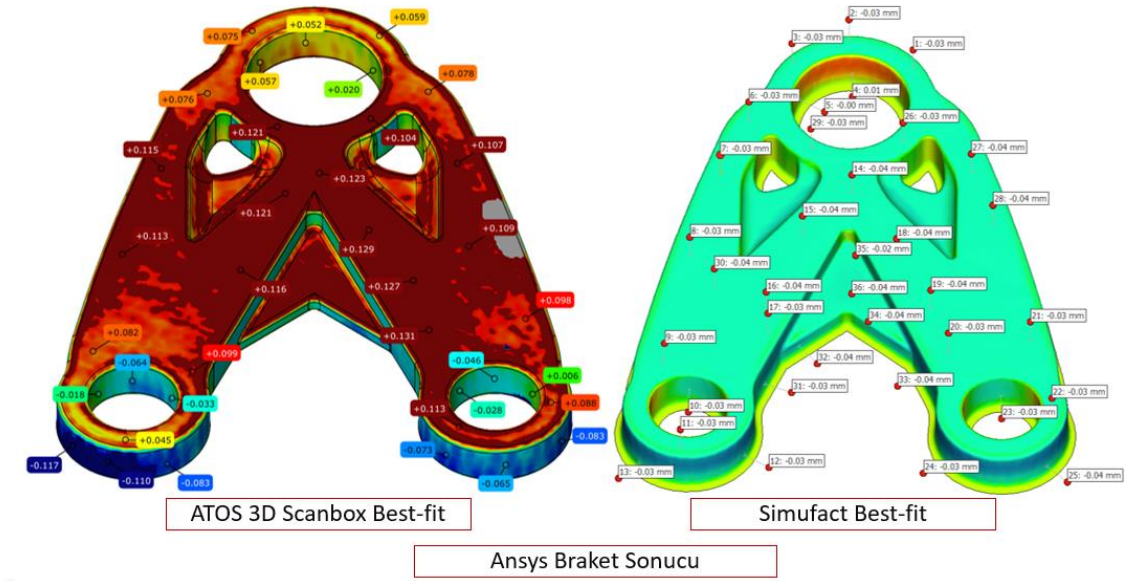


(b)

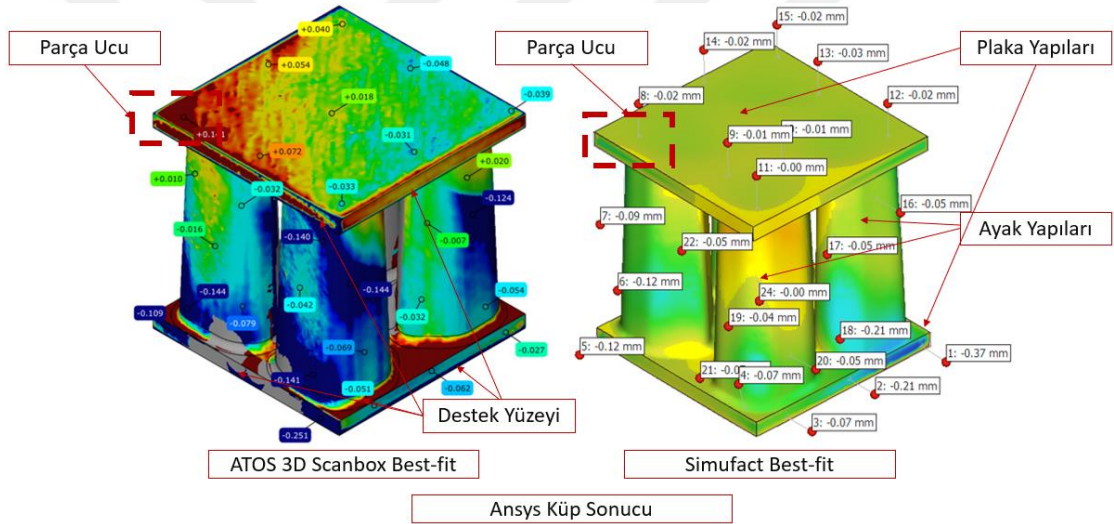
Şekil 3.6. HyperWorks ile elde edilen braket ve küp geometrilerinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması

Şekil 3.7’de Ansys ile elde optimizasyonu sonucuna ait proses simülasyonu sonuçları ve tarama sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.7a’da gösterilen braket geometrisinin tarama sonuçlarına göre parça, kenarlarından, 40-100 μm aralığında çekmeye çalışırken,

üst yüzeyinden, üretim yönüne paralel olarak 70-130µm aralığında çarpılmaktadır. Proses simülasyonu sonuçlarına göre ise, parça kenarlarından 40 µm çekmeye çalışırken, üst yüzeyinden 20-40µm çekmeye çalışmaktadır. Simülasyon ve tarama sonuçları karşılaştırıldığında, çarpılma yan kenarlar için aynı doğrultuda iken, gerçek proses şartlarında çarpılma miktarı daha fazladır. Üst yüzey için ise çarpılma doğrultuları zıt olup gerçek proses şartlarında çarpılma miktarı daha fazladır. Şekil 3.7b’de gösterilen küp geometrisinin tarama sonuçlarına göre, parçanın uç kısmı ~140µm ve plaka yapılarının, ayak yapıları ile birleştiği sarkan yüzeyler, 10-60µm aralığında çarpılmaktadır. Bu daha önce açıklandığı üzere ısı transferini olumsuz etkileyen faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, tarama sonuçlarına göre, ayak yapılarının yüzeyleri 30-150µm çekmeye çalışmaktadır. Proses simülasyonu sonuçlarına göre, ise zıt yönde, parçanın uç kısmında 0-20 µm ve sarkan yüzeylerde 10-60 µm çarpılma gözlemlenirken, ayak yapılarının yüzeyleri, aynı doğrultuda 40-90 µm çekmeye çalışmaktadır. Ayrıca, tarama sonuçlarında, destek uzaklaştırma işlemlerinden kalan izler gözlemlenmiştir. Bu nedenle bu bölgelerdeki deformasyon sadece çarpılma kaynaklı değildir.



(a)

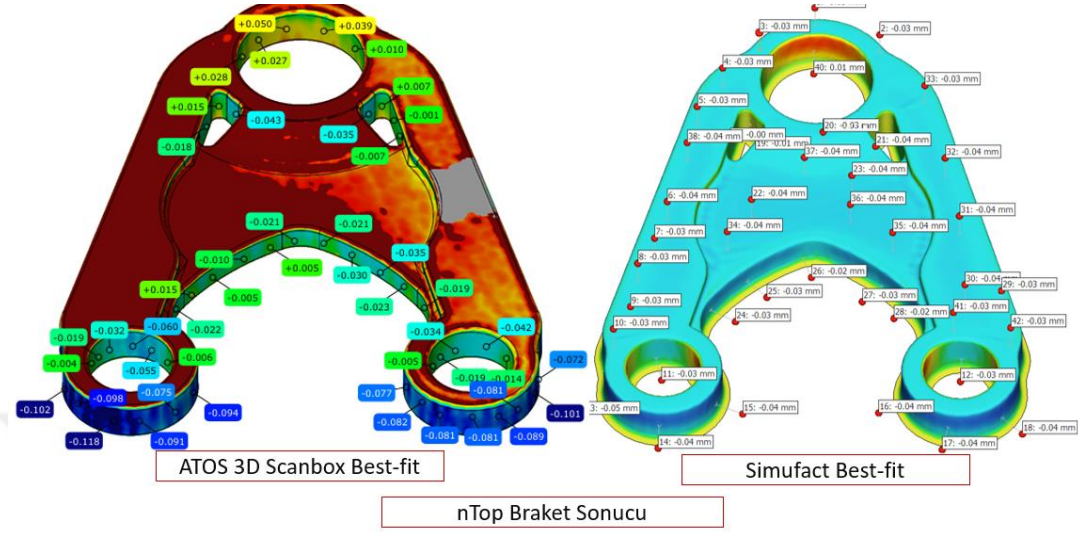


(b)

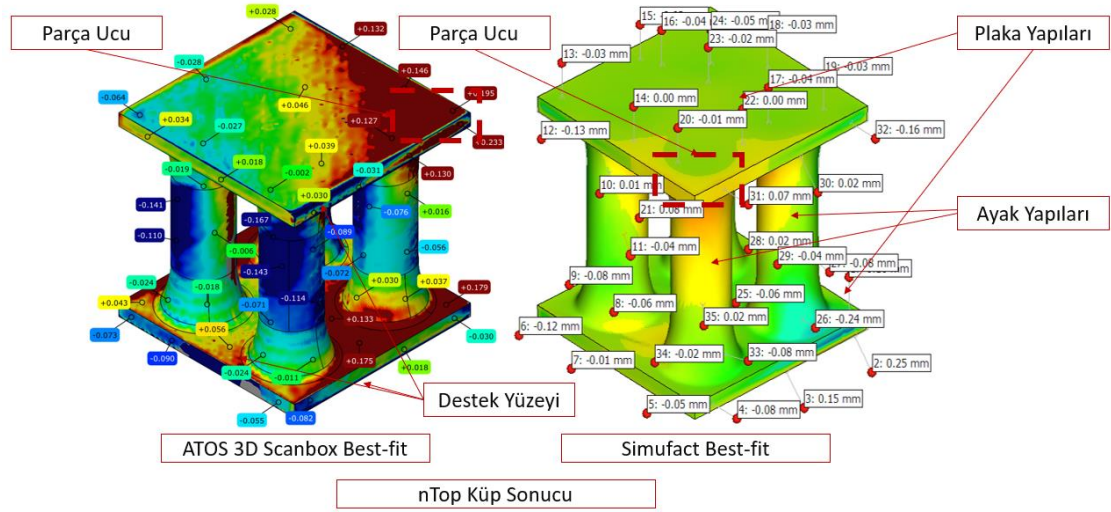
Şekil 3.7. Ansys ile elde edilen braket ve küp geometrilerinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması

Şekil 3.8’da nTop ile elde edilen optimizasyon sonuçlarına ait proses simülasyonu sonuçları ve tarama sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.8a’da gösterilen tarama sonuçlarına göre parça, kenarlarından doğru $\sim 100\mu\text{m}$ aralığında çarpılırken, üst yüzeyinden, üretim yönüne paralel olarak $80\text{-}140\mu\text{m}$ aralığında çarpılmaktadır. Proses simülasyonu sonuçlarına göre parça kenarlarından aynı doğrultuda $20\text{-}50\mu\text{m}$ çekmeye çalışırken ve üst yüzeyinden tarama sonuçlarına zıt yönde $\sim 40\mu\text{m}$ çekmeye çalışmaktadır. Gerçek proses şartlarında oluşan çarpılma miktarları daha fazladır. Şekil 3.8b’de gösterilen küp geometrisinin tarama sonuçlarına göre parça benzer doğrultuda ve miktarlarda

çarpılmaktadır. Proses simülasyonu sonuçlarına göre ise parçanın çarpılma doğrultuları ve miktarlı farklılık göstermektedir.



(a)



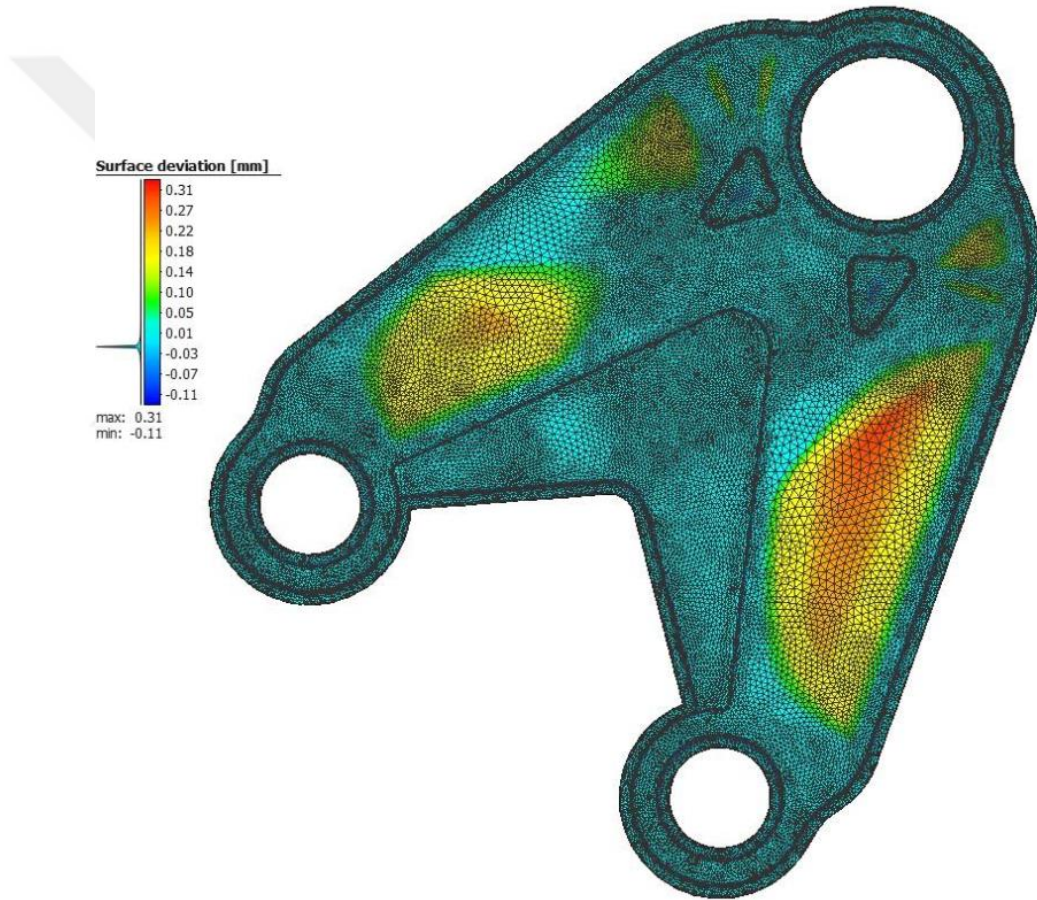
(b)

Şekil 3.8. nTop ile elde edilen braket ve küp geometrilerinin imalatında oluşan deformasyonların nümerik ve gerçek şartlar için karşılaştırılması

Boyutsal ölçüm ve doğrulama çalışmalarından yola çıkarak elde edilen sonuçlar şunlardır:

- LB-PBF prosesinin karmaşık termal geçmişinden kaynaklanan çarpılma ve manuel destek uzaklaştırma işlemi parça yüzeyindeki sapmalar artmaktadır.
- Braket ve küp geometrilerinin tarama ve proses simülasyonu sonuçları, çarpılma yönleri ve miktarları açısından kendi içerisinde tutarlıdır. Ancak

gerçek şartlarda parçanın çarpılma yönlerinde farklılıklar gözlemlenirken, çarpılma miktarı daha fazladır. Bu durumun, mesh yapıda olan .STL uzantılı model verisine, simufact ortamında tekrar mesh örülmesiyle, iki model arasında oluşan yüzey sapmaları oluşmasından (bkz. Şekil 3.9), gerçek proses şartlarında oluşan termal etkilerin, mekanik simülasyon ortamında ihmal edilmesinden, gerçek proses ve ısıtım işlem şartlarının simülasyon ortamına yeterli seviye de aktarılamaması nedenlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

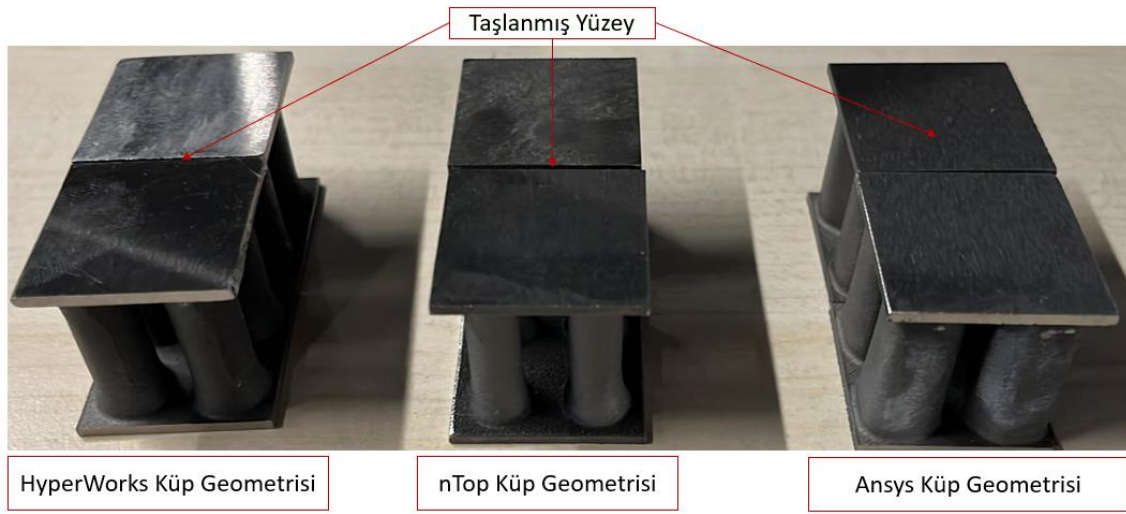


Şekil 3.9. Simufact additive ortamında tekrar örülen mesh ile .STL dosyasının yüzeyi arasındaki sapma

- Gerçek proses şartlarının daha iyi yansıtıldığı proses simülasyonu sonuçları gözetilerek verilecek ekstra imalat payları ve ikincil işleme yöntemleri kullanılarak, daha hassas tolerans aralıklarında parça üretmek mümkündür.

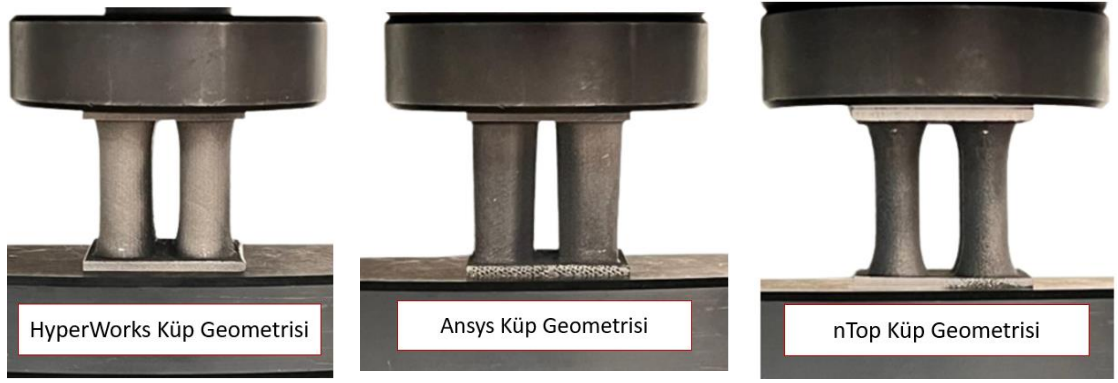
3.1.3. Statik optimizasyon sonuçlarının deneysel doğrulanması

Literatürde benzer küp geometrilerini, Şekil 2.3'te gösterilen sınır şartlarında test etmek amaçlı basma testi düzeneği kullanıldığı gözlemlenmiştir [86]. Bu nedenle küp geometrilerine ASTM-E09 oda sıcaklığı basma testi standardı takip edilerek basma testi uygulanmıştır [http-40]. Kübün alt ve üst plakalarındaki çarpılmalar ve destek kalıntılarından kaynaklı yüzey deformasyonlarının, eksenel yükün dağılımını olumsuz etkilememesi için kübik numunelerin basma çenelerine temas eden yüzeyleri taşlanarak düzlemsellik artırılmıştır (bkz. Şekil 3.10).



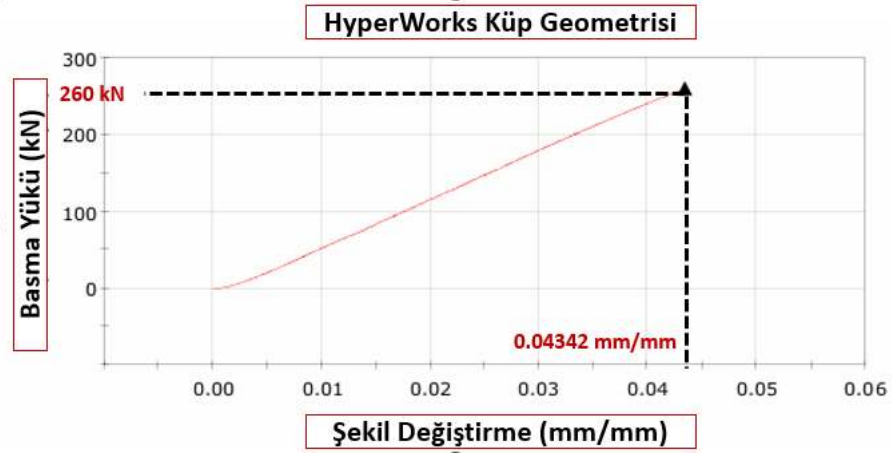
Şekil 3.10. Basma testi öncesi taşlanan yüzeyler

Taşlama sonrasında, HyperWorks, Ansys ve nTop yazılımlarında elde edilen küp sonuçlarının yükseklikleri sırasıyla 29.60 mm, 29.58 mm ve 29.59 mm olarak ölçülmüş ve test parametrelerine girilmiştir. Ardından, parçaların basma çeneleri ile temas eden yüzeyleri aseton ile temizlenerek, test düzeneğine yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.11).

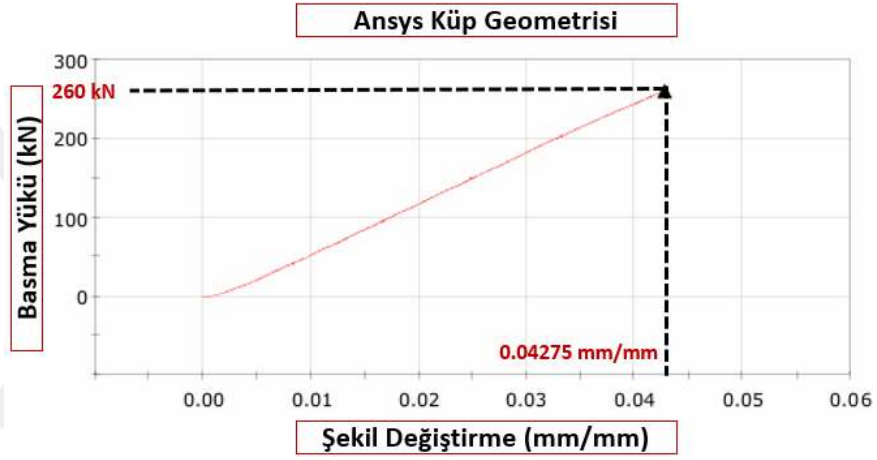


Şekil 3.11. Küp geometrilerinin basma testi düzeneğinde yerleşimleri

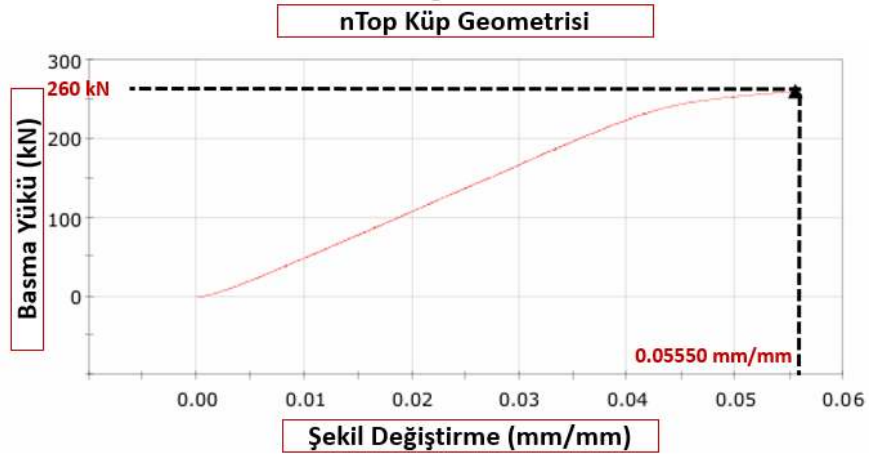
Şekil 2.3'te gösterilen sınır şartlarında gösterildiği üzere, 900 mm^2 yüzey alanına, 250 MPa basma gerilmesi uygulanmaktadır. Bu durumun test şartlarındaki basma yükü cinsi karşılığı 225 kN olup, parçanın bu değerden daha fazla yükü taşıyıp, taşımayacağını anlamak için, uygulanacak basma yükü üst sınırı 260 kN ve basma hızı 0.005 mm/mm/dk basma hızında test yapılmıştır. Test sonuçlarına ait yük-şekil değiştirme (ing. Strain) eğrileri Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.12. Küp geometrilerinin basma testi sonucunda elde edilen yük-şekil değıştirme eğrileri (a) HyperWorks küp sonucu (b) Ansys küp sonucu (c) nTop küp sonucu

HyperWorks, Ansys, nTop yazılımlarında elde edilen küp geometrilerin, basma testi sonrası boyutları sırasıyla 29.59 mm, 29.58 mm ve 29.37 mm olarak ölçülmüştür.

Küp geometrilerinin 225 kN ve 260 kN yük değerlerinde gösterdiği şekil değiştirme miktarları Tablo 3.4'te özetlenmiştir.

Tablo 3.4. *Küp geometrilerinin 225 kN ve 260 kN yük değerlerindeki şekilde değiştirme (mm/mm) değerleri, ilk ve son boyları*

Numuneler	Şekil Değiştirme (mm/mm) 225 kN	Şekil Değiştirme (mm/mm) 260 kN	İlk Boy (mm)	Son Boy (mm)
HyperWorks Küp Geometrisi	0.03730	0.04342	29.60	29.59
Ansys Küp Geometrisi	0.03670	0.04275	29.58	29.58
nTop Küp Geometrisi	0.04010	0.05550	29.59	29.37

Şekil 2.9'da gösterilen Tablo 2.4 'te özetlenen FEA sonuçları incelendiğinde, 250 MPa (225 kN) basınç uygulanması, nTop küp sonucunda parça üzerinde malzeme akma dayanımı üzerinde gerilme oluşturmuştur. HyperWorks ve Ansys küp sonuçlarında ise bölgesel yığılmalar dışında, akma gerilmesi değerinin üzerinde bir gerilme değeri gözlemlenmemiştir. Ancak, deneysel şartlarda ve daha yüksek yük değerlerinde parça üzerinde oluşan gerilmeler, Şekil 3.12'de gösterildiği üzere, elastik bölgede kalmıştır ve parça deforme olmamıştır. Öyleki, HyperWorks ve Ansys küp sonuçlarına ait grafiklerde (bkz. Şekil 3.12a ve Şekil 3.12b) 260 kN yük değerine kadar eğri eğiliminde değişiklik gözlemlenmemiştir. nTop küp sonucuna ait grafik (Şekil 3.12c) incelendiğinde ise 225-260 kN yük değerlerinde eğrinin yataylaşarak akma noktasına yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu farklılığın nedeni olarak, nümerik analizlerin, yük ve sınır şartlarını daha ideal şartlarda uygulamasına karşın basma testi düzeneğinde aynı şartların tam olarak karşılanamaması ve ASTM E09 standardında önerilen numune tiplerinden farklı bir yapının test edilmesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, basma testi için literatürden referans olarak kullanılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde , nümerik ve deneysel çalışma arasında benzer farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Yine de FEA sonuçlarına göre en çok deformasyonun nTop geometrisinde oluşacağı tahmini, deneysel sonuçlarla örtüşmektedir.

3.1.4. Dinamik optimizasyon sonuçlarının deneysel doğrulanması

Şekil 3.13'te gösterilen braket geometrilerinin, doğal frekanslarını incelemek için çekiç testi kullanılmıştır. Braket geometrilerinin, test rigine bağlanması için gerekli fikstür ve montaj elemanlarını elemek için braket geometrilerine HyperWorks ortamında ve serbest şartlarda (ing. Free-free) modal analiz tekrarlanmış ve ilk 10 mod için doğal frekans değerleri çıkarılmıştır (bkz. Tablo 3.5).

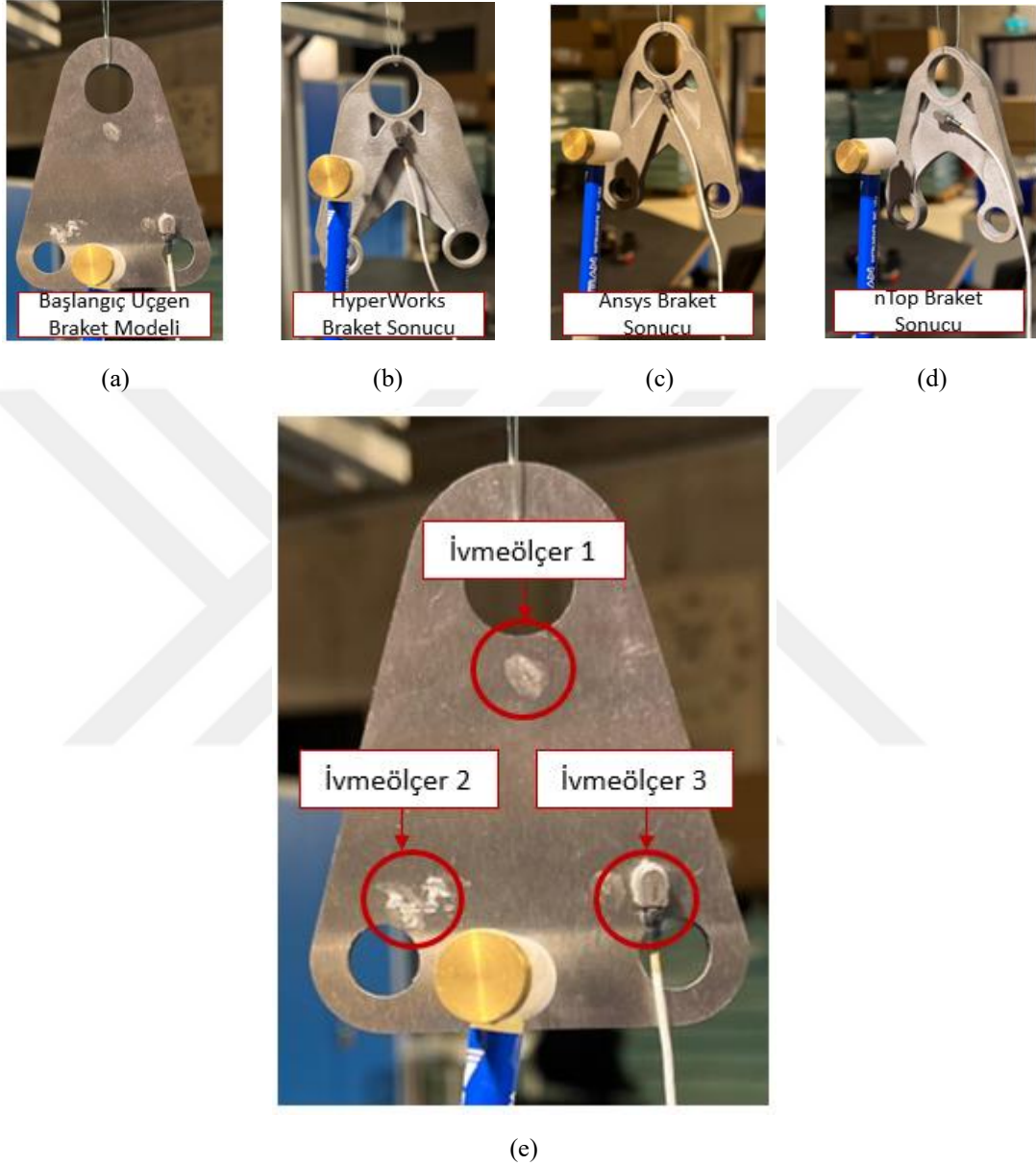
Tablo 3.5. Braket geometrilerinin serbest şartlarda (ing. Free-free) modal analiz sonuçları

Serbest Şart Modal Analiz Sonuçları	Başlangıç Üçgen Braket Geometrisi	HyperWorks Braket Sonucu	Ansys Braket Sonucu	nTop Braket Sonucu
1. Mod	1.71E-02	1.74E-02	1.77E-02	1.84E-02
2. Mod	1.78E-02	1.81E-02	1.83E-02	1.89E-02
3. Mod	1.78E-02	1.85E-02	1.84E-02	1.90E-02
4. Mod	1.83E-02	1.86E-02	1.84E-02	1.93E-02
5. Mod	1.84E-02	1.90E-02	1.86E-02	1.98E-02
6. Mod	1.89E-02	2.03E-02	1.92E-02	2.00E-02
7. Mod	4.36E+03	3.60E+03	3.05E+03	2.69E+03
8. Mod	4.94E+03	5.88E+03	5.25E+03	5.00E+03
9. Mod	7.52E+03	6.95E+03	5.82E+03	5.63E+03
10. Mod	9.92E+03	1.01E+04	8.26E+03	6.47E+03

Serbest şartlarda modal analiz, yapının herhangi bir yük ve sınır şartı altında olmadan sergilediği titreşim karakteristiklerini göstermektedir. Sonuçları incelendiğinde tüm geometrilerin ilk altı modunun doğal frekans değerinin sıfıra yakın çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum bu modların doğal frekanslar değil serbest cisim hareketleri (ing. Rigid body motions) olduğunu göstermektedir [http-41]. Bu nedenle, ilk altı mod incelemeye dahil edilmemiştir. Tablo 3.5'te listelenen ve 7-9. Modlardaki doğal frekans değerleri, Tablo 2.7'de listelenen, 1-3. Modlarındaki doğal frekans değerlerine karşılık gelmektedir. Her üç yazılımdan da elde edilen braket sonuçları için serbest şartlarda analiz ile elde edilen 7. ve 8. modlardaki doğal frekans değerleri, sınır şartlarında analiz edilen 1. ve 2. modlardaki doğal frekans değerlerinden daha yüksek, 9. Moddaki doğal frekans değerleri ise 3. Moddaki doğal frekans değerlerine yakın olarak elde edilmiştir.

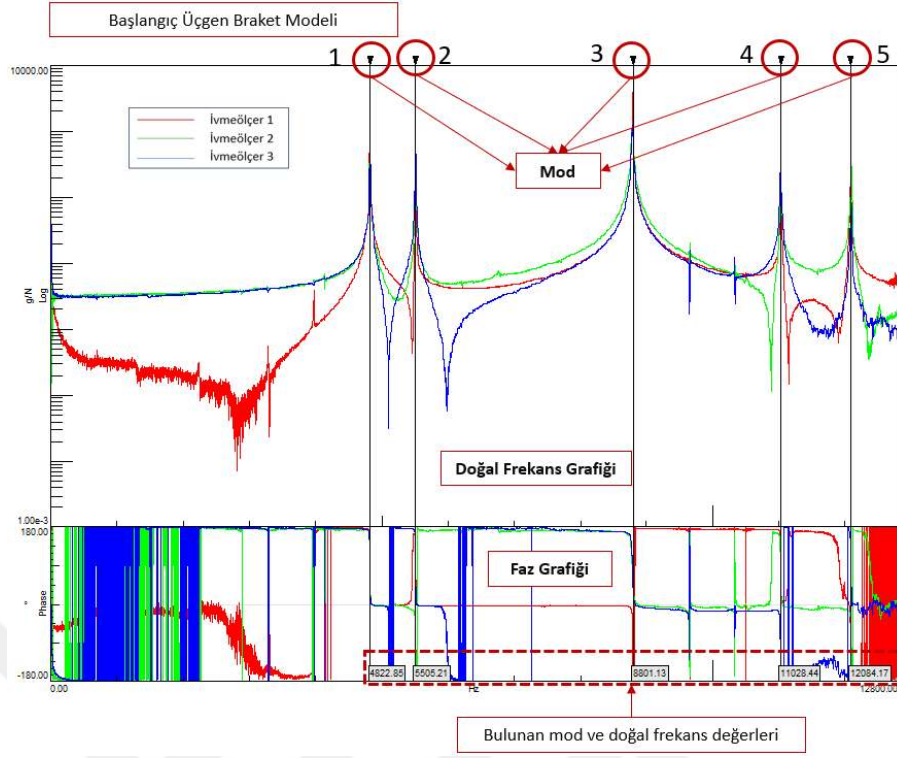
Çekiç testinde, 97.90 hassas mV/Lb.F hassasiyet değerinde Dytran 5800SL model minyatür çekiç ve Dytran 3224A1 model, 11.16 mV/g hassasiyet değerinde ivmeölçer kullanılmıştır ve Şekil 3.13e'de gösterildiği şartlarda, misina ile serbest uzay ortamında asılmış ve ivmeölçer, üç farklı pozisyonda gezdirilmiştir. İvmeölçer her pozisyona getirildiğinde parça, minyatür çekiç ile ivme ölçer 2 ve ivme ölçer 3 noktaları arasından,

üç kez vurularak tahrik edilmiştir ve 12800 Hz'ye kadar olan doğal frekans verileri toplanmıştır.

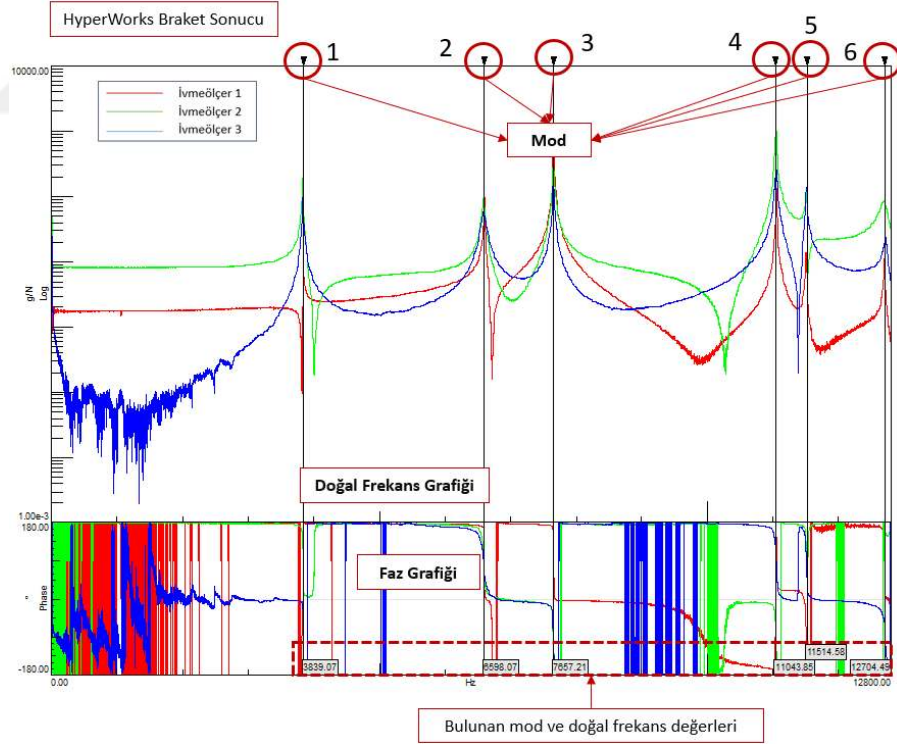


Şekil 3.13. Braket geometrilerinin çekiç testi düzeneğinde yerleşimleri ve ivme ölçer pozisyonları (a) Başlangıç üçgen braket geometrisi (b) HyperWorks braket sonucu (c) Ansys braket sonucu (d) nTop braket sonucu

Şekil 3.14'te çekiç testi sonucunda elde edilen doğal frekans ve faz grafikleri gösterilmiştir.

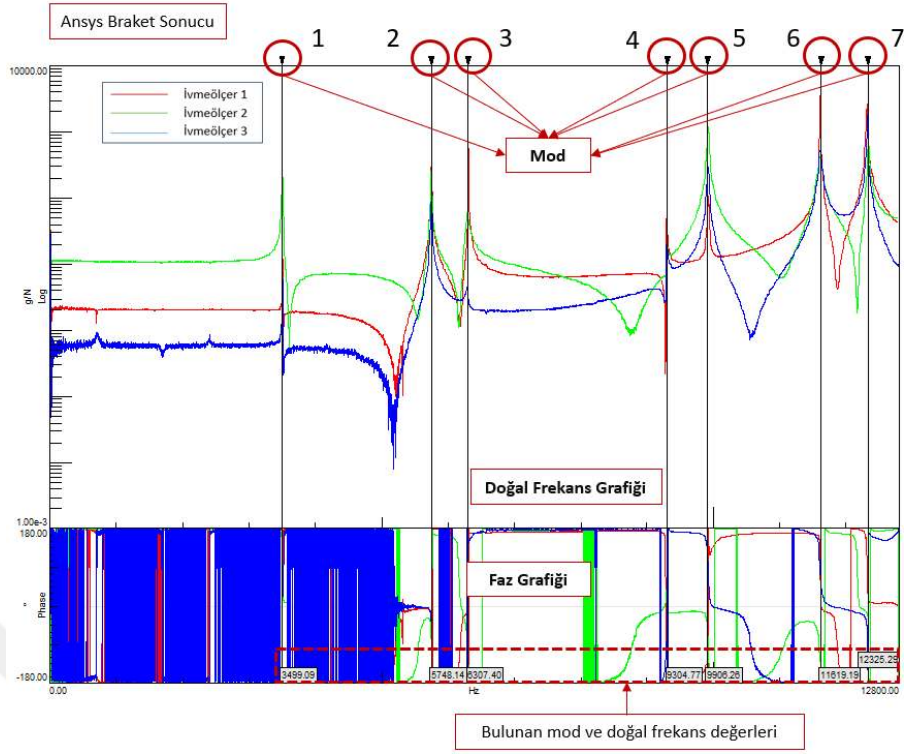


(a)

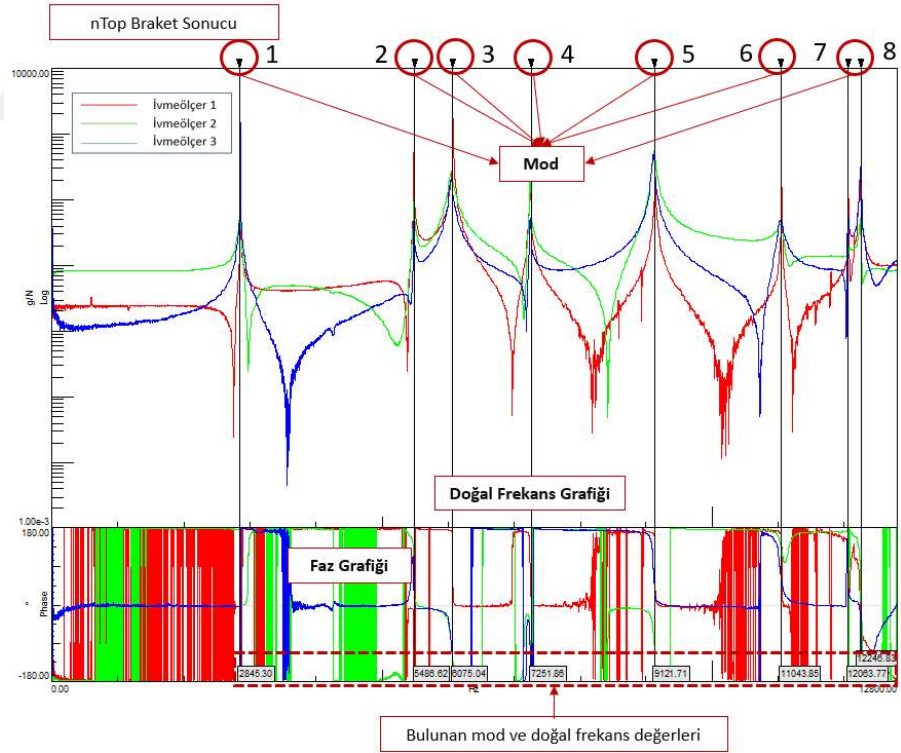


(b)

Şekil 3.14. Çekiç testi sonucunda elde edilen doğal frekans ve faz grafikleri (a) Başlangıç üçgen braket geometrisi (b) HyperWorks braket sonucu (c) Ansys braket sonucu (d) nTop braket sonucu



(c)



(d)

Şekil 3.14 (Devam) Çekiç testi sonucunda elde edilen doğal frekans ve faz grafikleri (a) Başlangıç üçgen braket geometrisi (b) HyperWorks braket sonucu (c) Ansys braket sonucu (d) nTop braket sonucu

Çekiç testi sonuçlarına göre 0-12800 Hz aralığında başlangıç üçgen braket geometrisi için beş, HyperWorks braket sonucu için altı, Ansys braket sonucu için yedi ve nTop braket sonucu için sekiz mod bulunmuştur. Çekiç testi sonuçlarına göre bulunan modlar ve doğal frekans değerleri Tablo 3.6’da özetlenmiştir.

Tablo 3.6. *Braket geometrilerinin çekiç testi sonucunda, 0-12800 Hz aralığında sahip oldukları mod sayıları ve karşılık gelen doğal frekans değerleri*

Serbest Şart Çekiç Testi Sonuçları	Başlangıç Üçgen Braket Geometrisi	HyperWorks Braket Sonucu	Ansys Braket Sonucu	nTop Braket Sonucu
1. Mod	4.82E+03	3.84E+03	3.50E+03	2.86E+03
2. Mod	5.5E+03	6.60E+03	5.75E+03	5.49E+03
3. Mod	8.8E+03	7.66E+03	6.31E+03	6.08E+03
4. Mod	1.1E+04	1.10E+04	9.30E+03	7.25E+03
5. Mod	1.2E+03	1.15E+04	9.91E+03	9.12E+03
6. Mod	-	1.27E+04	1.16E+04	1.10E+04
7. Mod	-	-	1.2E+04	1.21E+04
8. Mod	-	-	-	1.22E+04

Serbest şartlarda modal analiz sonuçları (bkz. Tablo 3.5) ve çekiç testi sonuçları (bkz. Tablo 3.6) karşılaştırıldığında deneysel sonuçlar, nümerik sonuçlara yakın veya daha fazla olarak elde edilmiştir. Ancak optimizasyon probleminde hedeflenen başlangıç geometrisine kıyasla doğal frekans artışı deneysel olarak elde edilememiştir. Bu durum, yapı ağırlıklarının düzgünleştirme adımından sonra artması ve imalat adımında parçaya eklenen ekstra 1 mm imalat payının yeterli seviyede kesilemesinden dolayı ağırlığın tekrar artması nedenleriyle açıklanabilir. Üç yazılımdan da elde edilen braket geometrilerinin deneysel sonuçları kendi içinde karşılaştırıldığında, HyperWorks braket sonucunun, ilk üç mod için doğal frekans değerleri Ansys ve nTop braket sonuçlarına göre daha yüksektir.

4. SONUÇLAR

- Her üç yazılımda ortotropik malzeme özelliklerinin tanımlanabilmesi, optimizasyon algoritması olarak SIMP kullanması, her hangi bir moddaki doğal frekans değerinin kısıt olarak girilebilmesi, farklı yük ve sınır şartlarının uygulanabilirliği, üretim kısıtlarının uygulanabilirliği açılarından, statik ve dinamik topoloji optimizasyonu problemlerinin kurgulanması için kullanılabilir.
- HyperWorks ve Ansys yazılımlarının mesh örme kabiliyetleri, analiz kabiliyetleri ve topoloji optimizasyonu için sunduğu tasarım kısıtlarının sayısı açılarından nTop yazılımına göre daha avantajlıdır. Ancak nTop yazılımında örtük modelleme (ing. Implicit modelling) ile gösterim yapılmasından dolayı elde edilen dosya boyutları daha düşük ve çözücü süreleri daha kısadır.
- Her üç yazılımda da topoloji optimizasyonu öncesi, cezalandırma faktörü veya bağıl yakınsama kriteri gibi girdiler yapmak mümkündür.
- Statik optimizasyon probleminin çözümünde, yüksek iterasyon sayısına rağmen en düşük çözücü süresi, en yüksek hacim avantajı ve kaydadeğer kalitede .STL çıktısı nedeniyle en iyi sonucu nTop yazılımı vermiştir. Ansys yazılımında daha düşük iterasyon sayısı ile çözüm tamamlanmış olmasına karşın, HyperWorks ile yakın sürede çözüm alınmış ve ağırlık avantajı elde edilmiştir.
- Dinamik optimizasyon probleminin çözümünde, en düşük çözüm süresi ve en yüksek ağırlık avantajı nTop yazılımında elde edilmiştir. Ancak her yazılımda elde edilen ilk üç moda ait doğal frekans değerlerinin ayrı ayrı kısıt olarak verilmesinin, optimizasyon sonrası kalan tasarım uzayı üzerine etkileri daha belirgindir.
- Düzgünleştirme ve yeniden tasarım adımından sonra ağırlık avantajı azalmaktadır.
- Statik topoloji optimizasyonu ile elde edilen küp sonuçları, nümerik olarak tekrar analiz edildiğinde, en düşük Von-Mises gerilmesinin Ansys yazılımından elde edilen küp sonucunda meydana geldiği ve HyperWorks yazılımından elde edilen küp sonucu ile yakın seviyede deformasyon değeri gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, nTop yazılımından elde edilen küp

sonucu, diğer yazılımlara kıyasla en yüksek toplam deformasyonu gösterdiği gözlemlenmiştir.

- Dinamik topoloji optimizasyonu ile elde edilen braket sonuçların, nümerik olarak tekrar analiz edildiğinde, HyperWorks ve Ansys ortamında farklı modlardaki doğal frekans değerlerinin kısıt olarak girilmesiyle, farklı modlardaki doğal frekanslarında ötelendiği gözlemlenmiştir. Ancak, nTop yazılımında bu her moddaki kısıt için geçerli olmamıştır.
- Numune üretimlerinde, oryantasyon tercihi destek miktarı, katman sayısı ve sökülebilirlik açısından değerlendirilmiştir. Küp geometrilerinin yatay ve dikey oryantasyonlarında gerekli olan destek yapılarının sökülebilirliğinin zorlayıcı olmasından dolayı açılı bir oryantasyon tercihi yapılmıştır. Braket geometrileri için ise çok daha düşük katman sayısı ve ekstra destek ihtiyacı olmaması nedenlerinden dolayı yatay oryantasyon tercih edilmiştir.
- Numune üretimi öncesi gerçekleştirilen proses simülasyonu ile çarpılmalar öngörülme çalışılmış ve gerçek şartlarla kıyaslamak için, üretim sonrası numuneler ATOS 3D Scanbox ile taranarak best-fit uygulanmıştır. Proses simülasyonu sonuçları ve tarama sonuçları kendi içlerinde çarpılma yönü ve miktarı açısından tutarlıdır. Ancak gerçek şartlarda parçalar, simülasyon sonuçlarına benzer veya farklı yönlerde çarpılma davranışı gösterip, miktar olarak daha fazla çarpılmaktadır. Simülasyon ve gerçek şartlar arasındaki farkın, Simufact ortamında tekrar mesh örme gereksiniminden kaynaklanan yüzey sapmaları ve mekanik simülasyon ortamında termal etkilerin ihmal edilmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Numuneler üretimden sonra sırasıyla, gerilim giderme ısıtma işlemi, kumlama, tel erozyon ile üretim platformundan ayırma, destek uzaklaştırma ve taşlama işlemlerine sokulmuştur.
- Statik topoloji optimizasyonu probleminden elde edilen küp sonuçları basma testi deneyinde 260 kN yük değerine kadar test edilmiş ve nümerik sonuçlara kıyasla, gerilmeler elastik bölgede kalmıştır. 260 kN yük değerine kadar yük-şekil değiştirme eğrisinde en belirgin değişim nTop küp sonucunda gözlemlenmiştir.
- Dinamik topoloji optimizasyonu probleminden elde edilen braket sonuçları çekiç testi uygulanmış ve nümerik olarak hedeflenen, başlangıç üçgen braket

geometrisine kıyasla doğal frekans artışı elde edilememiştir. Ancak braket geometrilerinin deneysel olarak elde edilen doğal frekans değerler, nümerik sonuçlara yakın veya biraz daha fazladır. Yani nümerik ve deneysel sonuçlar tutarlıdır.



KAYNAKÇA

- [1] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies*. In Springer eBooks.
- [2] Bourell, D. L., Wohlers, T. (2020). *Introduction to additive manufacturing*. In ASM International.
- [3] Salmi, M. (2021). Additive manufacturing processes in medical applications. *Materials*, 14(1), 191. <https://doi.org/10.3390/ma14010191> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [4] Armstrong, M., Mehrabi, H., Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [5] Jadhav, A., Jadhav, V. S. (2022). A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. *Materials Today Proceedings*, 62, 2094–2099.
- [6] Mukherjee, T., DebRoy, T. (2023). *Theory and practice of additive manufacturing*. John Wiley & Sons.
- [7] Poyraz, O., Tomlinson, D., Molyneux, A., Baxter, M. E., Yasa, E., Hughes, J. (2025). Optimized and additively manufactured face mills for enhanced cutting performance. *Metals*, 15(4), 376. <https://doi.org/10.3390/met15040376> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [8] Charles, A., Elkaseer, A., Paggi, U., Thijs, L., Hagenmeyer, V., Scholz, S. (2021). Down-facing surfaces in laser powder bed fusion of Ti6Al4V: Effect of dross formation on dimensional accuracy and surface texture. *Additive Manufacturing*, 46, 102148. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102148> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [9] Gokuldoss, P. K., Kolla, S., Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: selective laser melting, electron beam melting and binder Jetting—Selection guidelines. *Materials*, 10(6), 672. <https://doi.org/10.3390/ma10060672> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [10] Dini, F., Ghaffari, S. A., Jafar, J., Hamidreza, R., Marjan, S. (2019). A review of binder jet process parameters; powder, binder, printing and sintering condition. *Metal Powder Report*, 75(2), 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.05.001> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [11] Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781–801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [12] Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., & Liu, Y. (2019). Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45(10), 12609–12624. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.012> (Erişim tarihi: 07.04.2025).

- [13] Lores, A., Azurmendi, N., Agote, I., & Zuza, E. (2019). A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics. *Powder Metallurgy*, 62(5), 267–296. <https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1669299> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [14] Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2020). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [15] Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271–295. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [16] Ahn, D. (2021). Directed Energy Deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(2), 703–742. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [17] Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., Fino, P. (2019). Application of Directed Energy Deposition-Based Additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*, 9(16), 3316. <https://doi.org/10.3390/app9163316> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [18] Piscopo, G., & Iuliano, L. (2022). Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(11–12), 6893–6917. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08596-w> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [19] Nagalingam, A. P., Shamir, M., Tureyen, E. B., Sharman, A. R. C., Poyraz, O., Yasa, E., Hughes, J. (2025). Recent progress in wire-arc and wire-laser directed energy deposition (DED) of titanium and aluminium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14967-w>
- [20] Gasser, A., Backes, G., Kelbassa, I., Weisheit, A., Wissenbach, K. (2010). Laser Additive Manufacturing. *Laser Technik Journal*, 7(2), 58–63. <https://doi.org/10.1002/latj.201090029> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [21] Carroll, B. E., Otis, R. A., Borgonia, J. P., Suh, J., Dillon, R. P., Shapiro, A. A., Hofmann, D. C., Liu, Z., Beese, A. M. (2016). Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling. *Acta Materialia*, 108, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.019> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [22] Ahn, D., Kim, H. (2009). Study on the manufacture of a thermal management mould with three different materials using a direct metal tooling rapid tooling process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 224(3), 385–402. <https://doi.org/10.1243/09544054jem1523> (Erişim tarihi: 07.04.2025).

- [23] Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, N., Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639–649. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [24] Wickramasinghe, S., Do, T., Tran, P. (2020). FDM-Based 3D printing of Polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, 12(7), 1529. <https://doi.org/10.3390/polym12071529> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [25] Pu'ad, N. M., Haq, R. A., Noh, H. M., Abdullah, H., Idris, M., Lee, T. (2020). Review on the fabrication of fused deposition modelling (FDM) composite filament for biomedical applications. *Materials Today Proceedings*, 29, 228–232. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.535> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [26] Mwema, F. M., Akinlabi, E. T. (2020). Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). In *SpringerBriefs in applied sciences and technology* içinde, (s. 1–15). Springer Nature.
- [27] Sağbaş, B., Poyraz, Ö., Durakbasa, N. (2023). A Comparative Study On Precision Metrology Systems For Additive Manufacturing. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(1), 114–123. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1206753> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [28] Gülcan, O., Günaydın, K., Tamer, A. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Polymers*, 13(16), 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [29] Elkaseer, A., Chen, K. J., Janhsen, J. C., Refle, O., Hagenmeyer, V., Scholz, S. G. (2022). Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. *Additive Manufacturing*, 60, 103270. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103270> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [30] Kamble, P., Karunakaran, K.P., Chavan, S. (2018). Multi-jet Fluid Deposition in 3D Printing: A Review. *Conference: International Conference on Engineering Technology, Science and Management Innovation*'da sunulan bildiri. https://www.researchgate.net/publication/328019378_Multi-jet_Fluid_Deposition_in_3D_Printing_A_Review (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [31] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering R Reports*, 129, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [32] Poyraz, Ö., Yasa, E. (2024). Malzeme Püskürtme Prosesleri. Yasa, E. Yılmaz, O., Kayacan, M.C., Saklakoğlu, E. (Editörler), *Tasarım Felsefesini Değiştiren Yeni Bir İmalat Anlayışı - EKLEMELİ İMALAT* içinde (s.189 -217), Nobel Akademik Yayıncılık.
- [33] Turek, P., Budzik, G., Sęp, J., Oleksy, M., Józwik, J., Przeszłowski, Ł., Paszkiewicz, A., Kochmański, Ł., 4Żelechowski, D. (2020). An analysis of the casting polymer mold wear manufactured using PolyJet method based on the measurement of the surface topography. *Polymers*, 12(12), 3029. <https://doi.org/10.3390/polym12123029> (Eriřim tarihi: 07.04.2025).

- [34] Sun, S., Brandt, M., Easton, M. (2016). *Powder bed fusion processes*. In Elsevier eBooks (pp. 55–77).
- [35] Singh, D. D., Mahender, T., Reddy, A. R. (2020). Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today Proceedings*, 46, 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.415> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [36] Sutton, A. T., Kriewall, C. S., Leu, M. C., Newkirk, J. W. (2016). Powder characterisation techniques and effects of powder characteristics on part properties in powder-bed fusion processes. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(1), 3–29. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1250605> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [37] Abd-Elaziem, W., Elkatatny, S., Abd-Elaziem, A., Khedr, M., El-Baky, M. a. A., Hassan, M. A., Abu-Okail, M., Mohammed, M., Järvenpää, A., Allam, T., Hamada, A. (2022). On the current research progress of metallic materials fabricated by laser powder bed fusion process: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 681–707. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.085> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [38] Kotadia, H., Gibbons, G., Das, A., Howes, P. (2021). A review of Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties. *Additive Manufacturing*, 46, 102155. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102155> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [39] Sing, S. L., & Yeong, W. Y. (2020). Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments. *Virtual and Physical Prototyping*, 15(3), 359–370. <https://doi.org/10.1080/17452759.2020.1779999> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [40] Wei, S., Zhang, J., Zhang, L., Zhang, Y., Song, B., Wang, X., Fan, J., Liu, Q., Shi, Y. (2023). Laser powder bed fusion additive manufacturing of NiTi shape memory alloys: a review. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(3), 032001. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/acc7d9> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [41] Peng, X., Kong, L., Fuh, J. Y. H., Wang, H. (2021). A review of Post-Processing technologies in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2), 38. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020038> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [42] Ge, J., Pillay, S., Ning, H. (2023). Post-Process Treatments for Additive-Manufactured Metallic Structures: A Comprehensive Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(16), 7073–7122. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08051-9> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [43] Mahmood, M. A., Chioibas, D., Rehman, A. U., Mihai, S., Popescu, A. C. (2022). Post-Processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing. *Metals*, 12(1), 77. <https://doi.org/10.3390/met12010077> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [44] Shiyas, K., Ramanujam, R. (2021). A review on post processing techniques of additively manufactured metal parts for improving the material properties.

- Materials Today Proceedings*, 46, 1429–1436. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.016> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [45] Ye, C., Zhang, C., Zhao, J., & Dong, Y. (2021). Effects of post-processing on the surface finish, porosity, residual stresses, and fatigue performance of additive manufactured metals: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(9), 6407–6425. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06021-7> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [46] Poyraz, Ö., Yasa, E. (2023). Quality control for powder bed fusion additive manufacturing. E., Pei, A. Bernard, D. Gu, C. Klahn, M. Monzón, M. Petersen, T. Sun (Editörler), *Springer Handbook of Additive Manufacturing* içinde (s. 104-127). Springer handbooks. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_38 (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [47] Zhang, L., Liu, Y., Li, S., Hao, Y. (2017). Additive Manufacturing of titanium alloys by Electron beam melting: a review. *Advanced Engineering Materials*, 20(5). <https://doi.org/10.1002/adem.201700842> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [48] Negi, S., Nambolan, A. A., Kapil, S., Joshi, P. S., R, M., Karunakaran, K., Bhargava, P. (2019). Review on electron beam based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), 485–498. <https://doi.org/10.1108/rpj-07-2019-0182> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [49] Kolamroudi, M. K., Asmael, M., Ilkan, M., Kordani, N. (2021). Developments on Electron Beam Melting (EBM) of Ti–6Al–4V: A review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(4), 783–790. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02230-9> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [50] Lin, Z., Dadbakhsh, S., Rashid, A. (2022). Developing processing windows for powder pre-heating in electron beam melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.063> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [51] Jiao, M., Long, H., Xiao, B., Liang, X., Lin, F. (2024). Electron Beam Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Its development in China. *Additive Manufacturing Frontiers*, 200177. <https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200177> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [52] Fu, Z., Körner, C. (2022). Actual state-of-the-art of electron beam powder bed fusion. *European Journal of Materials*, 2(1), 54–116. <https://doi.org/10.1080/26889277.2022.2040342> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [53] Bragança, I.M.F., Martins, P.A.F., Pragana, J.P.M., Silva, C.M.A., Sampaio, R.F.V. (2021). Hybrid Metal Additive Manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2.
- [54] Sinha, A., Swain, B., Behera, A., Mallick, P., Samal, S. K., Vishwanatha, H. M., Behera, A. (2022). A review on the processing of Aero-Turbine Blade using 3D print techniques. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(1), 16. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010016> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [55] Asad, H., Ihsanullah, K. (2023). A Review of Laminated Object Manufacturing (LOM) Aspects and Various Processes used in It. *International Journal of*

- Advanced Engineering Research and Science*, 10(1), 046–054. <https://doi.org/10.22161/ijaers.101.8> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [56] Pragana, J., Sampaio, R., Bragança, I., Silva, C., Martins, P. (2021). Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [57] Huang, J., Qin, Q., Wang, J. (2020). A review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [58] Bove, A., Calignano, F., Galati, M., Iuliano, L. (2022). Photopolymerization of ceramic resins by Stereolithography Process: a review. *Applied Sciences*, 12(7), 3591. <https://doi.org/10.3390/app12073591> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [59] Negi, S., Nambolan, A. A., Kapil, S., Joshi, P. S., R, M., Karunakaran, K., Bhargava, P. (2019). Review on electron beam based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), 485–498. <https://doi.org/10.1108/rpj-07-2019-0182> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [60] Zakeri, S., Vippola, M., Levänen, E. (2020). A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing*, 35, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [61] Kafle, A., Luis, E., Silwal, R., Pan, H. M., Shrestha, P. L., Bastola, A. K. (2021). 3D/4D printing of polymers: fused deposition Modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA). *Polymers*, 13(18), 3101. <https://doi.org/10.3390/polym13183101> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [62] Lakkala, P., Munnangi, S. R., Bandari, S., Repka, M. (2023). Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review. *International Journal of Pharmaceutics X*, 5, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2023.100159> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [63] Huang, J., Qin, Q., Wang, J. (2020). A review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [64] Feilden, E. (2017). *Additive Manufacturing of Ceramics and Ceramic Composites via Robocasting*. Doktora Tezi. Londra: Imperial College, Malzeme Bölümü.
- [65] Dutta, B., Froes, F. (2017). The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metal Powder Report*, 72(2), 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.062> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [66] Dagkolu, A., Gokdag, I., Yilmaz, O. (2021). Design and additive manufacturing of a fatigue-critical aerospace part using topology optimisation and L-PBF process. *Procedia Manufacturing*, 54, 238–243. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.037> (Erişim tarihi: 07.04.2025).

- [67] Peto, M., Ramírez-Cedillo, E., Hernández, A., Siller, H. R. (2019). Structural design optimisation of knee replacement implants for Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 34, 574–583. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.222> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [68] Süß, M., Schöne, C., Stelzer, R., Kloeden, B., Kirchner, A., Weissgaerber, T., Kieback, B. (2016). Aerospace Case Study on Topology Optimisation for Additive Manufacturing, *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC*'de sunulan bildiri. https://www.researchgate.net/publication/326735296_Aerospace_Case_Study_on_Topology_Optimisation_for_Additive_Manufacturing (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [69] Berrocal, L., Fernández, R., González, S., Perinán, A., Tudela, S., Vilanova, J., Rubio, L., Márquez, J. M. M., Guerrero, J., Lasagni, F. (2018). Topology optimisation and additive manufacturing for aerospace components. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(2), 83–95. <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0061-3> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [70] Walton, D., Moztarzadeh, H. (2017). Design and development of an additive manufactured component by topology optimisation. *Procedia CIRP*, 60, 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.027> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [71] Park, J., Goo, B., Park, K. (2019). Topology optimisation and additive manufacturing of customized sports item considering orthotropic anisotropy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(8), 1443–1450. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00163-4> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [72] Vaverka, O., Koutny, D., Palousek, D. (2019). Topologically optimized axle carrier for Formula Student produced by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 25(9), 1545–1551. <https://doi.org/10.1108/rpj-07-2018-0171> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [73] Nvss, S., Esakki, B., Yang, L., Udayagiri, C., Vepa, K. S. (2022). Design and development of unibody quadcopter structure using optimisation and additive manufacturing techniques. *Designs*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/designs6010008> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [74] Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos, R., Mortágua, J. P. (2016). Selective laser melting (SLM) and topology optimisation for lighter aerospace components. *Procedia Structural Integrity*, 1, 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.039> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [75] Sedlacek, F., Kalina, T., Stepanek, M. (2023). Optimisation of Components with Topology Optimisation for Direct Additive Manufacturing by DLMS. *Materials*, 16(15), 5422. <https://doi.org/10.3390/ma16155422> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [76] Tyflopoulos, E., Steinert, M. (2022). A comparative study of the application of different commercial software for topology optimisation. *Applied Sciences*, 12(2), 611. <https://doi.org/10.3390/app12020611> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [77] Jia, Q., Gu, D. (2013). Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. *Journal of*

- Alloys and Compounds*, 585, 713–721. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.171> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [78] Sangid, M. D., Book, T. A., Naragani, D., Rotella, J., Ravi, P., Finch, A., Kenesei, P., Park, J., Sharma, H., Almer, J., Xiao, X. (2018). Role of heat treatment and build orientation in the microstructure sensitive deformation characteristics of IN718 produced via SLM additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 479–496. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.032> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [79] Moussaoui, K., Rubio, W., Mousseigne, M., Sultan, T., Rezai, F. (2018). Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 735, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.037> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [80] Poyraz, Ö., Koç, B., Işık, M., Kısa, E., Yıldız, M., Pehlivanoğulları, B., Orhangül, A. (2019). Topology Optimisation and Finite Elemental Analysis for An Inconel 718 Engine Mounting Braket Manufactured via Electron Beam Melting. *AMCTURKEY 2019'da sunulan bildiri*, https://www.researchgate.net/publication/337495969_Topology_Optimisation_and_Finite_Elemental_Analysis_for_An_Inconel_718_Engine_Mounting_Bracket_Manufactured_via_Electron_Beam_Melting (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [81] Rao, S. S. (2011). *Mechanical vibrations*. (5). Upper saddle river: Pearson Education.
- [82] Raman, S., Kruth, J. P. (2013). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4), 586-593. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.010> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [83] Baufeld, B., & K. F. (2013). Additive manufacturing of Inconel 718: Process, properties, and applications. *Materials Science and Engineering: A*, 605, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.048> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [84] Leuders, S. (2015). On the influence of the stress relief process on the residual stresses and distortion of additively manufactured components. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.028> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [85] Murr, L. E., (2012). Microstructures and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Science*, 47(4), 2000-2010.
- [86] Saadlaoui, Y., Milan, J., Rossi, J., Chabrand, P. (2017). Topology optimisation and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.03.006> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [87] Ma, Y., Liu, Y., Wang, H. (2018). Study on the rigid body modes and structural modal analysis of flexible structures. *Journal of Sound and Vibration*, 422, 301-314. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.03.013> (Erişim tarihi: 07.04.2025).

- [http-1] :<https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-2] :https://www.tei.com.tr/uploads/docs/1732203605_tei-eklemeli-imalat-tr.pdf?1732204807 (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-3] :<https://www.tei.com.tr/urunler/tei-tj90-turbojet-motoru> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-4] :<https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/news/ntopology-heat-exchanger-design-simulation/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-5] :<https://www.ntop.com/resources/case-studies/cobra-aero-multiphysics-simulation-drone-engine/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-6] :<https://www.additive-manufacturing-industry.de/news-articles/images/additive-manufacturing-in-spare-parts-production-1.htm> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-7] :<https://www.eplus3d.com/3d-printing-in-dental/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-8] :<https://www.linkedin.com/pulse/additive-manufacturing-medical-implants-already-industry-thomas-gradl-1f/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-9] :<https://www.lincotek.com/fine-print-am/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-10]:<https://www.metal-am.com/articles/multi-material-metal-parts-by-powder-bed-fusion-new-application-opportunities/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-11]:<https://aerosint.com/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-12]:<https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-new-material-built-to-withstand-extreme-conditions/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-13]:<https://ultimatesolutions-sa.com/product?pdt=SLM125> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-14]:<https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/articles/video-what-is-electron-beam-melting-%28ebm%29> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-15]:<https://www.javelin-tech.com/blog/2020/03/fdm-support-material-removal/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-16]:<https://forum.formlabs.com/t/bad-areas-around-the-support-structure/8601/2> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-17]:<https://www.metal-am.com/articles/understanding-build-failures-in-laser-%20powder-bed-fusion-an-overview/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).

- [http-18]:<https://actonfinishing.madeinthemidlands.com/news/why-you-need-to-include-3d-printing-post-processing-into-your-manufacturing-process> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-19]:<https://www.xa-blt.com/en/product/blt-s1500/?category=8> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-20]:<https://www.farsoon-gl.com/products/fs621m/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-21]:<https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/fdm-printers/f900-printer/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-22]:<https://3dspro.com/resources/blog/explanation-of-binder-jetting> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-23]:https://www.desktopmetal.com/industries/heavy_industry (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-24]:<https://www.exone.com/en-US/Speed-3D-Mold-Case-Study> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-25]:<https://www.euronews.com/next/2023/10/25/this-company-has-3d-printed-a-house-that-can-withstand-a-90-magnitude-earthquake> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-26]:https://blog.prusa3d.com/the-prusacaster-how-to-design-and-3d-print-an-electric-guitar_71962/ (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-27]:<https://weartesters.com/3d-printed-adidas-futurecraft-ultraboosts/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-28]:<https://www.sustainableplastics.com/news/3d-printing-rebooting-boat-industry> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-29]:<https://shokitech.com/3d-printed-plaster/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-30]: <https://www.toyaction.com.br/sobre> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-31]: <https://oakridgetoday.com/2015/09/24/ornl-car-building-are-3d-printed-can-power-each-other/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-32]: <https://www.3dnatives.com/en/polyjet100420174/> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-33]: https://3d.eos.info/hubfs/Customer%20Success%20Stories/Metal/CS_M_Aerospace_Sogeti_en.pdf (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-34]: https://3d.eos.info/hubfs/Customer%20Success%20Stories/Metal/CS_M_Aerospace_RUAG_en.pdf (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-35]: https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/topology_opt_design_variables_r.htm (Erişim tarihi: 07.04.2025).

- [http-36] :https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secure/corp/v242/en/mech_struct_opt/ds_topo_solvers.html (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-37] :https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/doptprm_objtol_bulk_r.htm (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-38] :<https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2024/01/Penalty-Stiffness-Factor-in-Optimisation.pdf> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-39] :<https://tajhizkala.ir/doc/ASTM/F3055-14a.pdf> (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-40] :https://www.researchgate.net/profile/Abdulwahab_Benhadji/post/can_anyone_share_ASTM_E9-09_standard/attachment/59d61dac79197b80779793bb/AS:272169005715486@1441901555496/download/ASTM+E+9.pdf (Erişim tarihi: 07.04.2025).
- [http-41] :https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2020/10/Lesson5_FreeFreeModalAndPrestressedModalAnalysis.pdf (Erişim tarihi: 07.04.2025).

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0000-2559-4544

Ad Soyad: Baturalp OĞUZ

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2016-2021, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik & Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- 2021-2022, Eklemeli imalat uygulama mühendisi, Artuk Aviation
- 2022-2022, Eklemeli imalat uygulama mühendisi, Additive Manufacturing and Excellence Centre (ADDPark)
- 2022- Halen, Eklemeli imalat mühendisi, TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

2024, Konferans Makalesi, “*A COMPREHENSIVE INSIGHT INTO TOPOLOGY OPTIMISATION THROUGH BENCHMARKING THE INFLUENCING FACTORS ON A DEMONSTRATOR AIRCRAFT BRACKET DESIGN*”, 3DPrinting Turkey, Antalya

2025, Konferans Makalesi, “*COMPARISON OF MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF AD730 LASER POWDER BED FUSION AND UDIMET720LI FORGING ALLOYS*”, AMC2025 Turkey, Antalya