



**BİYOMİMETİK TABANLI KAFES YAPILARININ TOPOLOJİ
OPTİMİZASYONUNDA KULLANIMI**

Nur Zeynep CENGİZ BULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

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

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

Nur Zeynep CENGİZ BULUT

21/12/2022

BİYOMİMETİK TABANLI KAFES YAPILARININ TOPOLOJİ OPTİMİZASYONUNDA KULLANIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Nur Zeynep CENGİZ BULUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Biyomimetik yaklaşımı doğada bulunan karmaşık yapıların tasarımlara uygulanmasında önyak olmuştur. Eklemeli imalat teknolojilerinde gerçekleşen gelişmelerle birlikte biyomimetik yaklaşımı ile gerçekleştirilen tasarımların üretilebilirliği mümkün olmuştur. Eklemeli imalat ve imalata uygun tasarım (Design For Additive Manufacturing-DFAM) ile sürdürülebilirliğin giderek önem kazandığı günümüzde önemli bir rol almaktadır. Havacılık sektöründe iniş takımı gibi geri çekilebilir sistemler uçuş sırasında ölü ağırlık olarak görülmektedir. Bu nedenle iniş takımlarının ağırlığı oldukça önem taşımaktadır. İniş takımı dendiğinde tekerlekler akla gelse de iniş takımları birçok elemandan oluşmaktadır. Bunlardan biri tork bağlantısı mekanizmasıdır. Bu mekanizma iniş sırasında oluşan shimmy titreşiminin engellenmesinde görev almaktadır. Bu çalışmada üst tork bağlantısının topoloji optimizasyonu yöntemiyle ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır. Topoloji optimizasyonu kafes yapısı kullanılarak uygulanmıştır. Bu kafes yapısı oluşturulurken biyomimetik yaklaşımı ile *Eucpectella aspergillum* isimli cam süngerden ilham alınarak tasarlanmıştır. Canlının sahip hiyerarşik yapıdan ilham alınarak oluşturulan birim hücre periyodik bir şekilde çoğaltılarak üst tork bağlantısına uygulanmıştır. Aynı zamanda kübik bir şekilde çoğaltılarak ANSYS yazılımında yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz kriterleri; von Mises gerilme ve total deformasyon olarak belirlenmiştir. İşlemlerin ardından analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 94106
Anahtar Kelimeler : Kafes yapıları, topoloji optimizasyonu, biyomimetik, eklemeli imalat
Sayfa Adedi : 104
Danışman : Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR

THE USE OF BIOMIMETIC-BASED LATTICE STRUCTURES IN TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

(M. Sc. Thesis)

Nur Zeynep CENGİZ BULUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

The biomimetic approach has pioneered the application of complex structures found in nature to designs. With the developments in additive manufacturing technologies, the manufacturability of designs realized with the biomimetic approach has become possible. Additive manufacturing and design for additive manufacturing (DFAM) play an important role in today's world where sustainability is gaining more and more importance. Retractable systems such as landing gear are seen as dead weight during flight in the aviation industry. Therefore, the weight of the landing gear is very important. Although wheels come to mind when it comes to landing gear, landing gear consists of many elements. One of them is the torque coupling mechanism. This mechanism is responsible for preventing the shimmy vibration that occurs during landing. In this study, it is aimed to reduce the weight of the upper torque connection with the topology optimization method. Topology optimization was implemented using the lattice structure. While creating this cage structure, it was designed with the biomimetic approach inspired by the glass sponge *Eucyrtella aspergillum*. The unit cell, inspired by the hierarchical structure of the living thing, was replicated periodically and applied to the upper torque connection. At the same time, structural analysis was carried out in ANSYS software by replicating it in a cubic way. Analysis criteria; von Mises stress and total deformation. After the procedures, the results of the analysis were evaluated.

Science Code : 94106

Key Words : Lattice structures, topology optimization, biomimetic, additive manufacturing

Page Number : 104

Supervisor : Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR'e, tez sürecimde beni kendi öğrencisinden ayırmayarak destek olan değerli hocam Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. İsmail ŞAHİN'e, stresimi paylaşan ve tez sürecimde desteğini esirgemeyen değerli iş arkadaşım Neslihan TOP'a, sorduğum her soruya vaktini ayıran ve baskı alma sürecime yardımcı olan değerli iş arkadaşım Oğulcan EREN'e ve tez dönemi boyunca motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan diğer iş arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yüksek lisans eğitimimin tamamında kendi alanı olmasa dahi bana yardımcı olan, en büyük destekçim sevgili eşim Hakan Berkay BULUT'a, kardeşim Beyza CENGİZ'e ve yalnızca yüksek lisans eğitimi sürecimde değil hayatımın her noktasında her zaman yanımda olan annem Neşe CENGİZ'e, babam Güven CENGİZ'e ve abim Mustafa Yiğithan CENGİZ'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	5
2.1. Eklemeli İmalat (AM)	5
2.1.1. Eklemeli İmalat Çeşitleri	7
2.1.2. Eklemeli İmalat Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler	16
2.1.3. Metal Eklemeli İmalat.....	16
2.1.4. Havacılık Sektöründe Eklemeli İmalat Uygulamaları	18
2.2. Topoloji Optimizasyonu (TO)	21
2.3. Kafes Yapıları	24
2.3.1. Kafes yapılarının mekanik özellikleri.....	27
2.3.2. Kafes yapılarının avantajları ve dezavantajları.....	28
2.3.3. Kafes yapılarının üretilebilirliği.....	30
2.4. Biyomimetik.....	31
2.4.1. Biyomimetik yaklaşımı ile eklemeli imalat	36
2.5. Tork Bağlantısı.....	39

2.5.1. Tork bağlantısı ile ilgili çalışmalar	42
3. TORK BAĞLANTISI TASARIMI	49
3.1. Birim Hücre Tasarımı	49
3.1.1. Venüs'ün Çiçek Sepeti	49
3.2. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Oluşturulması	54
3.3. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Üst Tork Bağlantısına Uygulanması	55
4. KAFES YAPISININ YAPISAL ANALİZ SÜRECİ.....	57
4.2. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Sonlu Elemanlar Analizi (SEA).....	57
4.3. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Dinamik Analizi.....	60
4.4 Orijinal Tork Bağlantısının Statik Analizi	63
4.5. Optimize Edilmiş Tork Bağlantısının Statik Analizi	67
5. MALZEME VE YÖNTEM	73
5.2. uPrint® SE 3B Yazıcı	73
6. TORK BAĞLANTISININ PROTOTİP ÜRETİM SÜRECİ.....	77
6.1. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Prototip Üretim Süreci	77
6.1.1. uPrint® SE cihazı ile üretim	77
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Eklemeli imalat çeşitleri ve işlem sürecinin özeti	15
Çizelge 2.2. Eklemeli imalat çeşitleri ve kullanılan malzemeler	17
Çizelge 2.3. Eklemeli imalat çeşitleri ve ve avantaj ve dezavantajları.....	20
Çizelge 4.1. Ti-6AL-4V (Titanium Alloy) malzeme özellikleri	58
Çizelge 4.2. Analiz modeli için elemanın eleman sayısı.....	58
Çizelge 4.3. Analiz modeli için elemanın eleman sayısı.....	60
Çizelge 4.4. Analiz modeli için elemanın eleman sayısı.....	61
Çizelge 4.5. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının analiz sonuçları.....	63
Çizelge 4.6. Orijinal tork bağlantısı modeli için eleman sayısı.....	64
Çizelge 4.7. Orijinal tork bağlantısı modelinin analiz sonuçları	67
Çizelge 4.8. Optimize edilmiş tork bağlantısı modeli için eleman sayısı	68
Çizelge 4.9. Optimize edilmiş tork bağlantısı modelinin analiz sonuçları.....	71
Çizelge 4.10. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması	71
Çizelge 4.11. Modellerin hacimlerinin karşılaştırılması	72
Çizelge 5.1. uPrint® SE cihazı özellikleri.....	74
Çizelge 5.2. uPrint SE ve uPrint SE Plus cihazlarının katman kalınlıkları	75
Çizelge 6.1. uPrint SE cihazı ile üretilen modellerin özellikleri	87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	DFAM süreci	2
Şekil 2.1.	Eklemeli imalat akış şeması	6
Şekil 2.2.	Eklemeli imalat kategorileri	7
Şekil 2.3	Bağlayıcı püskürtme sisteminin şeması.....	8
Şekil 2.4.	Malzeme ekstrüzyon sistemlerinin şeması	9
Şekil 2.5.	FDM sisteminin şeması	9
Şekil 2.6.	Toz yataklı ergitme sistemlerinin şeması	11
Şekil 2.7.	Seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisinin şeması	12
Şekil 2.8.	Stereolithografi teknolojisinin şeması	14
Şekil 2.9.	Eklemeli imalat çeşitlerinin sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.10.	Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler.....	16
Şekil 2.11.	Bir topolojik optimizasyon prosedürünün akış şeması.....	22
Şekil 2.12.	Dikme tabanlı kafes yapının ana bileşenleri.....	24
Şekil 2.13.	Hücresel katıların kategorileri	24
Şekil 2.14.	Kafes yapısı ve kafes birim hücre.....	25
Şekil 2.15.	Doğrudan modelleme şeması.....	25
Şekil 2.16.	Farklı hücresel topolojilerin birim hücresi	26
Şekil 2.17.	Yükleme koşullarının sınıflandırılması: (a) yükleme türü, (b) yükleme yönü ve (c) uygulama süresi	28
Şekil 2.18.	Doğada bulunan bazı doğal hücresel maddeler, oluştukları elementin türüne (kiriş veya yüzey) ve söz konusu formun içinde veya dışında oluşup oluşmadığına göre sınıflandırılır	32
Şekil 2.19.	Doğadan gelen yapısal tasarım öğeleri	33
Şekil 2.20.	Enerji emilimi için biyo-ilhamlı gözenekli yapıların sınıflandırılması	35
Şekil 2.21.	Biyomedikal ve doku mühendisliğinde biyomimetik 3D baskının durumu.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 2.22.	Darbe yükleme koşullarına göre 3D baskı türlerinin sınıflandırılması37
Şekil 2.23.	(a) Biyomimikri tasarım sarmalı; (b) AM için değiştirilmiş biyomimikri tasarımını37
Şekil 2.24.	Topoloji optimizasyonu uygulanmış ve kafes yaisı uygulanmış "biyonik" tasarım örneği 39
Şekil 2.25.	Çoğu ticari uçakta bulunan iniş takımı bileşenleri41
Şekil 2.26	Tork bağlantısı sistemi.....43
Şekil 2.27.	Referans alınan tork bağlantısının ölçüleri43
Şekil 2.28.	Reçine transfer kalıplamada kullanılan kalıplar44
Şekil 2.29.	Tork bağlantısının test edilmesi.....44
Şekil 2.30.	NLG (a), Boeing (b), UTAS (c) SAFRAN (d) şimsi amortisörlerin şemaları.....45
Şekil 2.31.	(a) NLG of Piper Cheyenne II XL, dahili şimsi sönümleyici, (b) NLG'nin 3D taranmış geometrisi ve (c) bundan oluşturulan CAD modeli.....46
Şekil 3.1.	<i>Euclectella aspergillumun</i> açık ve kapalı hücreleri.....51

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. LPBF ile üretilmiş, malzemesi Ti6Al4V olan Airbus A350 XWB kabin braketinin konnektörü	18
Resim 2.2. Topolojik optimize edilmiş braket.....	21
Resim 2.3. Bir araba süspansiyonunun topolojik olarak optimize edilmiş direği	22
Resim 2.4. Topoloji optimizasyonu ve kafes yapılarını birlikte kullanma örneği....	23
Resim 2.5. Doğada bazı hücresel yapılar bulunur.	30
Resim 2.6. Elektron ışını eritme (EBM) ile üretilen periyodik kafes yapısına sahip sarmal dişli.....	31
Resim 3.1. <i>Euplectella aspergillum</i> 'un iskeletinin fotoğrafı. Ölçek çubuğu 5 cm'dir	50
Resim 3.2. (a) <i>Euplectella aspergillum</i> 'un fotoğrafik görünümü	51
Resim 3.3. E. Aspergillumun hiyerarşik yapısını oluşturan yatay, dikey ve çapraz payandaların gösterimi	53
Resim 3.4. EA süngerinin gövdesinin yakınlştırılmış görüntüsünden temel kafes görünümünün elde edilmesi	54
Resim 3.5. Birim hücrenin 2B görünümü.....	54
Resim 3.6. a) birim hücre, b) periyodik olarak çoğaltılmış kafes yapısı	55
Resim 3.7. a) orijinal üst tork bağlantısı, b) optimize edilmiş üst tork bağlantısı	55
Resim 3.8. a) 2B temel görünüm oluşturulması, b) Birim hücre modellenmesi, c) Oluşturulan kafes yapısı mevcut tork bağlantısına uygulanması, d) Topolojik optmimizasyonu gerçekleştirilmiş model.....	56
Resim 4.1. Statik analizi gerçekleştirilecek olan model	57
Resim 4.2. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının mesh görüntüsü.....	59
Resim 4.3. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının von Mises gerilim dağılımı.....	59
Resim 4.4. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının maksimum kesme gerilim dağılımı.....	59
Resim 4.5. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının total deformasyon dağılımı.....	60
Resim 4.6. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının mesh görüntüsü.....	61

Resim	Sayfa
Resim 4.7. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının total deformasyon dağılımı.....	62
Resim 4.8. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının maksimum kesme gerilim dağılımı	62
Resim 4.9. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının eşdeğer kesme gerinim dağılımı ..	62
Resim 4.10. Orijinal tork bağlantısı.....	63
Resim 4.11. Orijinal tork bağlantısının mesh görüntüsü	64
Resim 4.12. Orijinal tork bağlantısının sabitletme yüzeyleri	65
Resim 4.13. Orijinal tork bağlantısına kuvvet uygulanan yüzey	65
Resim 4.14. Orijinal tork bağlantısının total deformasyon dağılımı	65
Resim 4.15. Orijinal tork bağlantısının von Mises gerilim dağılımı	66
Resim 4.16. Orijinal tork bağlantısının maksimum kesme gerilim dağılımı.....	66
Resim 4.17. Orijinal tork bağlantısının eşdeğer elastik gerinim dağılımı	66
Resim 4.18. Orijinal tork bağlantısının maksimum kesme elastik gerinim dağılımı .	67
Resim 4.19. Analiz yapılacak olan optimize edilmiş tork bağlantısı.....	68
Resim 4.20. Optimize edilmiş tork bağlantısının mesh görüntüsü	69
Resim 4.21. Optimize edilmiş tork bağlantısının total deformasyon dağılımı	69
Resim 4.22. Optimize edilmiş tork bağlantısının von Misess gerilim dağılımı	70
Resim 4.23. Optimize edilmiş tork bağlantısının maksimum kesme gerilimi dağılımı	70
Resim 4.24. Optimize edilmiş tork bağlantısının eşdeğer elastik gerinim dağılımı ...	70
Resim 4.25. Optimize edilmiş tork bağlantısının maksimum kesme elastik gerinim dağılımı.....	71
Resim 5.1. Stratasys uPrint® SE cihazı.....	73
Resim 6.1. Baskısı alınacak modelin genel özellikleri	77
Resim 6.2. Oluşturulan destek malzemesinin ve modelin görüntüsü	78
Resim 6.3. Baskısı alınacak modelin tabladaki konumu	79
Resim 6.4. Baskı sürecinin başlangıcı	80
Resim 6.5. Baskı süreci.....	80

Resim	Sayfa
Resim 6.6. Baskısı biten modelin çözücü kimyasala hazırlanması	81
Resim 6.7. Modelin çözücü kimyasal içerisine konulması.....	81
Resim 6.8. Çözücü kimyasalın ayarlarının yapılması.....	82
Resim 6.9. Biyomimetik tabanlı kübik kafes yapısı modeli	82
Resim 6.10. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının baskı alma süreci	83
Resim 6.11. Baskısı alınacak modelin genel özellikleri	84
Resim 6.12. Oluşturulan destek malzemesinin ve modelin görüntüsü	84
Resim 6.13. Baskısı alınacak modelin tabladaki konumu	85
Resim 6.14. Baskısı tamamlanan tork bağlantısı.....	86
Resim 6.15. Destekleri temizlenmiş tork bağlantısı	86

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Kısaltmalar	Açıklamalar
μm	Mikron
cm	Santimetre
cm^3	Santimetreküp
d	Payanda çapı
dk	Dakika
E	Elastiklik modülü
F	Kuvvet
J	Joule
kg	Kilogram
L	Tork bağlantısının uzunluğu
mm	Milimetre
mm^3	Milimetreküp
Mpa	Megapaskal
N	Newton
Pa	Paskal
S	Saniye
ν	Poisson oranı
θ	Diagonal payandanın açısı
°	Derece
Kısaltmalar	Açıklamalar
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing Format
3D	3 Dimension
3DP	Three-Dimensional Printing

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BT	Bilgisayarlı tomografi
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CT	Computed Tomography
CO₂	Karbondioksit
DED	Directed Energy Deposition
DFAM	Design for Additive Manufacturing
DIW	Direct Ink Writing
DLP	Digital Light Processing
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EA	Eucplectella Aspergillum
EBM	Electron Beam Manufacturing
EBW	Electron Beam Welding
EFF	Electron Beam Freeform Fabrication
FEA	Finite Element Analysis
FDM	Fused Deposition Modelling
GLS	Gradient Lattice Structures
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LFF	Laser Freeform Fabrication
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
LMD	Laser Metal Deposition
LOM	Laminated Objet Manufacturing
MJP	Multijet printing
MRI	Magnetic Resonance Imaging
MPa	Megapaskal
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	Scanning Electron Microscope
SMD	Shaped Metal Deposition
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Moulding
SLS	Selective Laser Sintering

Kısaltmalar**Açıklamalar****STL**

Stantard Triangle Language

Ti6Al4V

Titanyum 6-Alüminyum 4-Vanadyum

TPMS

Triply Periodic Minimal Surfaces

TO

Topoloji Optimizasyonu

UAM

Ultrasonic Additive Manufacturing

ULS

Uniform Lattice Structures

UV

Ultraviyole

WAAM

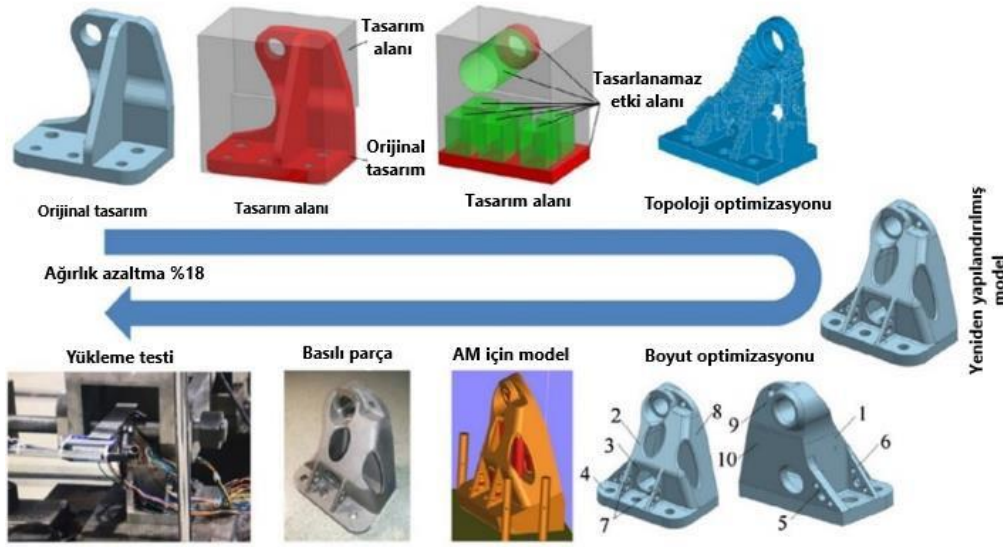
Wire and Arc Additive Manufacturing

1. GİRİŞ

Eklemeli İmalat ve İmalata Uygun Tasarım

İlk olarak 1980'li yıllarda kullanılmaya başlanan eklemeli imalat (AM) teknolojisi, gelişen teknoloji ile çeşitlenerek devam etmektedir. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak AM, doğrudan bu modelden bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli oluşturur. Böylece geleneksel imalat yöntemleriyle üretilemeyen karmaşık mimariye sahip parçaların üretimine olanak sağlar. Sürdürülebilirliğin önem kazandığı bu günlerde parçanın üretim süresini kısaltmak, enerji tüketimini azaltmak, malzeme israfını en aza indirmek gibi faydalar da sunuyor (Tao & Leu, 2016). AM veya 3D baskı teknikleri, yapı iskeleleri oluşturmak için katman katman yaklaşımı kullanan bir grup ilgili üretim tekniğini içerir (Datta, Vyas, Dhara, Chowdhury, & Barui, 2019). Topolojik optimizasyon (TO) ve kafes yapıları, AM tarafından sunulan tasarım özgürlüklerinden en iyi şekilde yararlanan iki hafif ve yüksek mukavemetli tasarım yaklaşımı olarak ortaya çıkmıştır (Plocher & Panesar, 2019).

Çoğu geleneksel üretim yöntemi, AM'nin sağladığı tasarım özgürlüğünü sağlayamaz. Bu nedenle, ürünün verimliliğini artırmak için, AM teknolojilerinin kapasitesine bağlı olarak hiyerarşik yapılar ve malzeme kompozisyonlarının sentezi yoluyla katmanlı imalat için tasarım (DFAM) adı verilen bir tasarım modeli oluşturulmuştur. Bu yöntem, tasarımlarında AM kullanan ve AM'nin dezavantajlarıyla karşı karşıya kalan tasarımcılar ve mühendisler için yeni bir bakış açısı sunuyor. Kafes veya hücreli yapıya mezo düzeyde odaklanan (0,1 mm ile 10 mm arası boyutta) tasarım yöntemleri büyük ilgi görmüştür. Kafes yapıları mükemmel mekanik özellikleri sayesinde ağırlık azaltma, termal koruma, ısı transferi ve enerji absorpsiyonu gibi birçok amaç için oluşturulabilmektedir (Tang, Kurtz, & Zhao, 2015). Tüm tasarım süreci Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. DFAM süreci (Shi, ve diğerleri, 2020)

Tasarımcılar ve mühendisler, hafif ürünler üretmek ve çevre kirliliğini azaltmak için yeni düzenlemeler nedeniyle malzeme israfını önlemek için kafes yapılarını parçalara entegre ediyor (Azman & Nasir, 2019).

Kafes yapıları, belirli bir sırada tekrar eden birim hücrelerdir. Bu en küçük elemanın üretilebilirliği, sırasıyla üretim sürecine ve malzemelere bağlıdır. Bu nedenle, CAD tasarım planlama zorlukları kafes birim hücrelerini belirlemektedir (Niu, Choo, Sun, & Mok, 2018).

AM'nin çözünürlüğü, hücresel yapının tasarımında ve imalatında önemli bir husustur, çünkü dikme kalınlığı, şekillendirme sırasında imalat çözünürlüğünden daha küçük olmamalıdır.

bileşenler. İlk olarak, minimum gözenek büzülmesini önleyebilmeli ve toz bazlı AM işlemine göre artık tozların açık hücrelerden çıkarılmasını mümkün kılmalıdır. İkincisi, kafes giriş yapısının gücü, payanda kalınlığı ile doğru orantılıdır, bu nedenle çok küçük olmalıdır. Mezo ölçekli hücrelerin karakteristik uzunlukları 0,1-10 mm aralığında olmalıdır. Daha önce uygulanan minimum kalınlık 0.15 mm idi. Maksimum boyut için, büyük birim hücre boyutu 5 mm'den büyük olduğunda ciddi deformasyonlara neden olur (Niu, Choo, Sun, & Mok, 2018).

Bu çalışmada, DFAM tasarım modeli ve kullanılan yöntemler incelenmiştir. Kafes yapılarının ve topolojik optimizasyonun biyomimetik yaklaşımla ilgisi araştırılmıştır.

DFAM ve biyomimetik yaklaşımın bir kombinasyonu, avantajları ve dezavantajları verilmiştir. Öncelikle topolojik optimizasyon ve kafes yapıları incelenmiş ardından bu yöntemlerin biyomimikri ile olan ilişkisine değinilmiştir.

DFAM tasarım modeli oluşturma yöntemlerinden biri olan topoloji optimizasyonu hem yoğunluk tabanlı tasarım ile hem de kafes yapıları ile gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda bu iki yöntem birlikte de kullanılabilir. Bunun için optimizasyonu yapılacak parçaya öncelikli CAD programları yardımıyla topoloji optimizasyonu uygulamak, ardından da kafes yapıları uygulamak gerekmektedir. Bu çalışmada topoloji optimizasyonu kafes yapılarından faydalanılarak yapılmıştır.

Araştırmanın amacı

Havacılık sektöründe özellikle iniş takımları ölü ağırlık olarak görülür. Bu çalışmada iniş takımlarından biri olan ve üst ve alt olmak üzere birlikte çalışan tork bağlantısının oluşturduğu ağırlığın azaltılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada topoloji optimizasyonu ve kafes yapıları ile tork bağlantısı optimize edilmiştir.

Araştırmanın önemi

Bir önceki başlıkta eklemeli imalat ve optimizasyon teknikleri kavramları ve biyomimetikle olan ilişkisi verilmiştir. Bu bağlamda biyomimetik, mühendislik tasarımlarında olduğu gibi ve yapısal optimizasyonlarda da önemli bir araç kullanılmaktadır. Bu çalışmada havacılıkta iniş takımlarında bulunan üst tork bağlantısının yapısal optimizasyonunda biyomimetik tabanlı kafes yapıları kullanılmıştır. Uçaklarda iniş takımlarının ağırlığını minimize etmek amacıyla kompozit malzeme, topoloji optimizasyonu gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğü kullanılarak biyomimetik tabanlı kafes yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan biyomimetik tabanlı kafes yapısı üst tork bağlantısının kafes yapısı oluşturma yöntemiyle topolojik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İniş takımlarında yapılan çalışmalarda malzeme üzerine çalışmalar yürütülse de biyomimetik tabanlı bir çözüm yolu sunmak çalışmayı önemli kılmaktadır.

Sınırlılıklar

Orijinal tork bağlantısının malzemesi Ti6Al4V'dir. Bu nedenle metal 3B yazıcılarla üretilmelidir. Ancak analizler Ti6Al4V malzeme bilgileri tanımlanarak gerçekleştirilmiştir.

Tanımlar

Bu tez çalışmasında, havacılık sektöründe iniş takımlarının sebep olduğu ölü ağırlığı minimize etmek amacıyla modern üretim yöntemlerinden biri olan eklemeli imalat ve kafes yapıları kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiş. Çalışmada bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design - CAD) programlarında mevcut olan kafes yapıları yerine biyomimetik tabanlı bir kafes yapısı oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında öncelikle, topolojik optimizasyonda kullanılmak üzere birim hücre tasarlanmıştır. Tasarlanan birim hücre biyomimetik tabanlı olmakla birlikte bu çalışma kapsamında orijinal bir tasarımdır. Tasarlanan birim iniş takımlarında iç içe geçen silindirlerin titreşimini engelleyen tork bağlantılarından üst tork bağlantısına uygulanmıştır. Aynı zamanda çoğaltılan biyomimetik tabanlı kafes yapısı, sonlu elemanlar analizi ile analiz edilmiştir. Biyomimetik tabanlı kafes yapıları 3B yazıcı teknolojisi yardımıyla üretilmiştir. Çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen üst tork bağlantısının yapısal optimizasyonunda kullanılan biyomimetik tabanlı kafes yapısı ve uygunluğu belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Tez çalışmasında üst tork bağlantısının topolojik optmimizasyonunda kullanılması amacıyla biyomimetik tabanlı bir kafes yapısı geliştirildiğinden literatür çalışması beş ana başlık altında incelenmiştir. Başlıklar eklemeli imalat, topoloji optimizasyonunu, kafes yapıları, biyomimetik ve son olarak tork bağlantısı olarak sıralanmıştır.

2.1. Eklemeli İmalat (AM)

Eklemeli imalat (AM), “talaş kaldırarak işleme gibi geleneksel imalat metodolojilerinin aksine, genellikle katman katman 3D model verilerinden tasarımlar üretmek için malzemeleri birleştirme süreci” olarak tanımlanmaktadır. (Bikas, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2016) AM, boyutsal doğruluk açısından daha yüksek ve çok daha kısa sürede prototipler elde etmek için kullanılan en yaygın tekniklerden biridir. (Singh, Ramakrishna, & Singh, 2017)

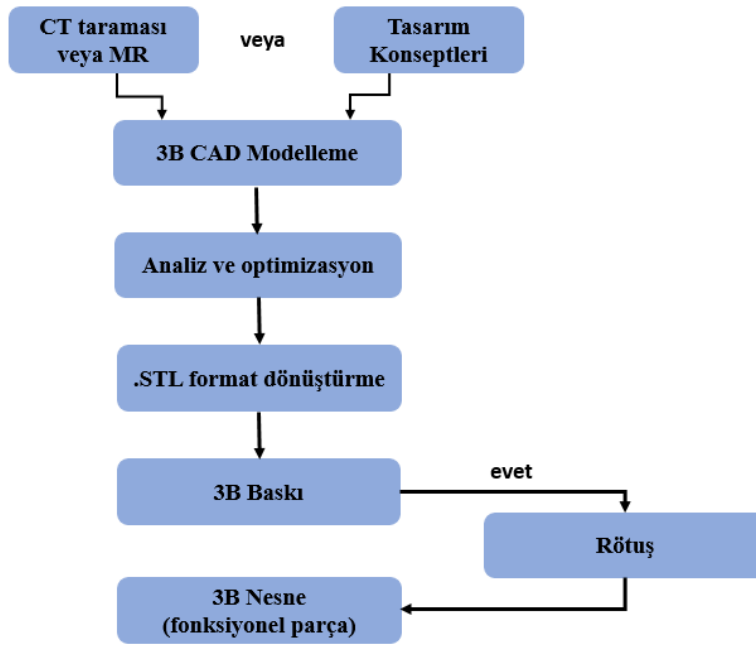
Özellikle yüksek performanslı mühendislik yapılarının tasarımı olmak üzere, geleneksel imalat süreçleri ile kıyaslandığında temel olarak farklı ekonomik ve teknik imalat özelliği sağlar. Eklemeli imalat, malzeme katmanlarının sıralı olarak birleştirilmesi suretiyle gerçekleşir. Bu yöntem, geleneksel imalat yöntemlerinden temel olarak farklıdır. Bu nedenle eşsiz fırsatlar sunar. AM, üstün teknik performansa sahip kafes yapılarının tasarımı da dahil olmak üzere, karmaşık geometriye sahip yapıların üretilmesini sağlar. AM tarafından sağlanan bu karmaşık geometrilerin üretimi fırsatına rağmen, üretimde sağlamlığın elde edilmesinde teknik sınırlamalar vardır. Eklemeli imalat için tasarım (Design for Additive Manufacturing- DFAM) kuralları açık bir çalışma faaliyeti olarak devam etmektedir (Leary, ve diğerleri, 2018).

Eklemeli imalat teknolojisinin çalışır parçalar üretme kapasitesi de giderek artan popülaritesine katkıda bulunan bir faktördür.

AM tıpta genellikle bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi dijital görüntüleme teknikleriyle entegre şekilde çalışmaktadır. CT veya MRI taramalarından (inDucom formatı) toplanan veriler bilgisayar yazılımları yardımıyla 3D

biyo-modele dönüştürülür. Ayrıca, 3B biyo-model, STL dosya formatına dönüştürülür ve bir AM kurulumuna aktarılır (Şekil 2.1.) (Singh, Ramakrishna, & Singh, 2017).

Eklemeli imalat teknolojileri plastikler ve metaller dahil olmak üzere çeşitli malzemelere uygulanabilmesinin yanı sıra, sifra yakın malzeme atığı ile özel malzemelerden yapılmış son işleme için minimum ihtiyaç duyar. Bundan dolayı AM, tasarım özgürlüğü sunarak tasarımcıların ve mühendislerin ekonomik bir şekilde üretilebilen eşsiz ürünler yaratmasını sağlayan bir araçtır. AM teknolojisinin bir başka ilgi çekici yanı ise çevresel ve ekolojik açıdan umut verici olmasıdır. Eklemeli imalat teknolojileri ve yöntemleri, uygulama ve pazar payı bakımından devamlı olarak artmakta, otomotiv, medikal ve havacılık gibi çeşitli sektörlerde yayılmaktadır (Bikas, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2016).



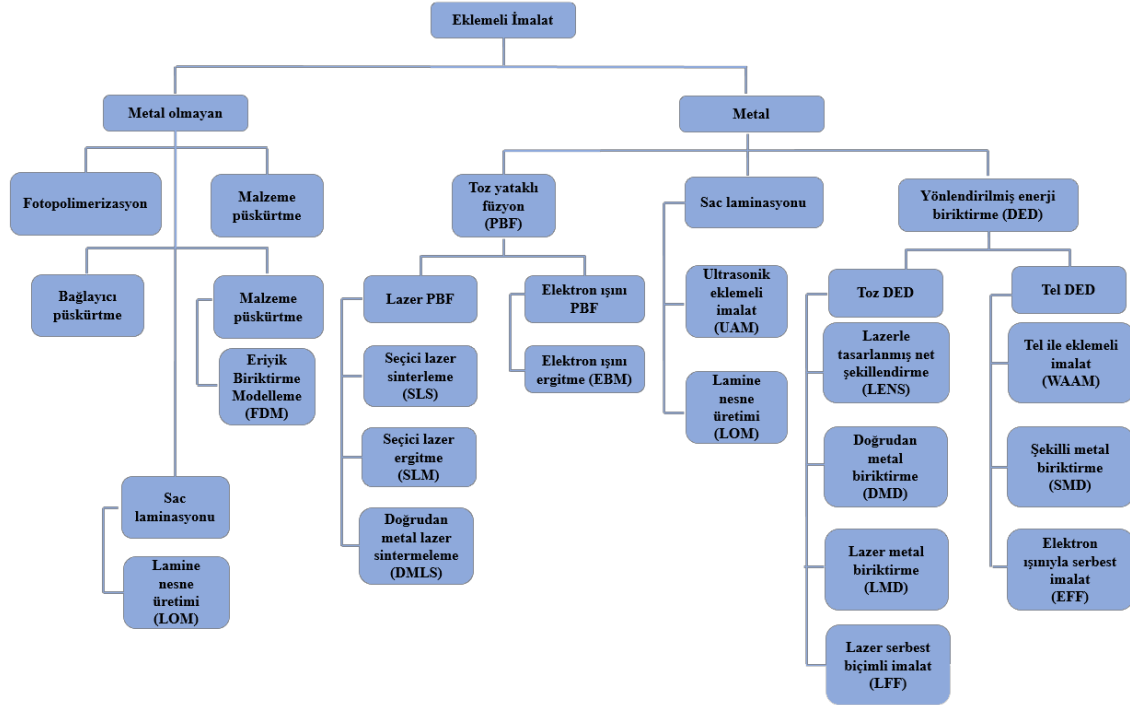
Şekil 2.1. Eklemeli imalat akış şeması (Singh, Ramakrishna, & Singh, 2017)

AM amaçlanan geometrinin Stereolitografi (STL) veya Eklemeli Üretim Formatı (AMF) olarak dijital temsiline dayanır. Bu dijital temsil, mühendislik yapılarının tasarımı için birçok fırsat sağlar. Tasarım hedeflerinin ve kısıtlamalarının tasarım mühendisi tarafından belirlendiği ancak çözümlerin otonom olarak arandığı üretken tasarım gereklilikleri ile üretilen geometrinin dijital temsilleri oldukça uyumludur. Örneğin bir hastaya özel geometri ve mekanik özellikleri taklit eden düşük maliyetli tasarımı ve imalatı gibi küçük üretim

hacimlerinde üretken tasarım, karmaşıklığı yüksek ve düşük maliyetli imalatını sağlar (Yusuf, Cutler, & Gao, 2019).

2.1.1. Eklemeli İmalat Çeşitleri

Eklemeli imalat çeşitleri Şekil 2.2’de özetlenmiştir.

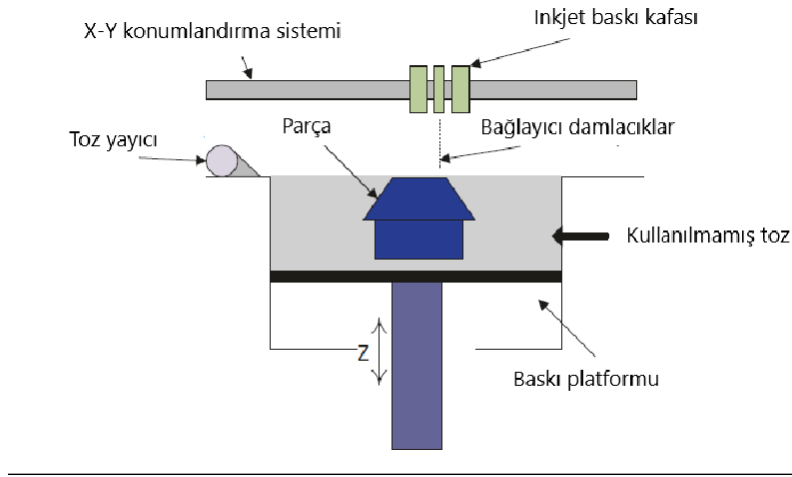


Şekil 2.2. Eklemeli imalat kategorileri

Bağlayıcı püskürtme (Binder jetting)

Bağlayıcı püskürtme, toz parçacıklarını birleştirmek için sıvı bir bağlayıcı maddenin seçici olarak biriktirildiği bir 3D baskı işlemidir. Katmanı oluşturmak için bağlayıcı püskürtme teknolojisi, yayılmış toz üzerine jet kimyasal bağlayıcı kullanır. Yeniden kaplama, toz yatağı yönteminde yapıldığı gibi toz yayma yoluyla gerçekleşir. Üretilen parçalar, bağlanmış tozdan oluşmaktadır ve bu nedenle, yeterli dayanıklılığa sahip olmaları için son işleme sırasında süzme işlemi gerektirir. Bağlayıcı tarafından başarılı bir şekilde yayılabilen ve ısıtılabilen herhangi bir toz halindeki malzeme bu teknoloji ile işlenebilir. Bağlayıcı püskürtme yöntemi ile, metaller, kumlar, polimerler, hibrit ve seramikler dahil olmak üzere çeşitli malzemeler işlenebilir. Ayrıca, toz partikülleri sıvı bir bağlayıcı yardımı ile birbirine yapıştırıldığı için basit, hızlı ve ucuzdur. Bu yöntem ilk olarak MIT’de incelenmiş ve Z

Corporation ve ExOne tarafından ticarileştirilmiştir (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019; Gao, ve diğerleri, 2015). Bağlayıcı püskürtme sisteminin şeması Şekil 2.3'te verilmiştir.



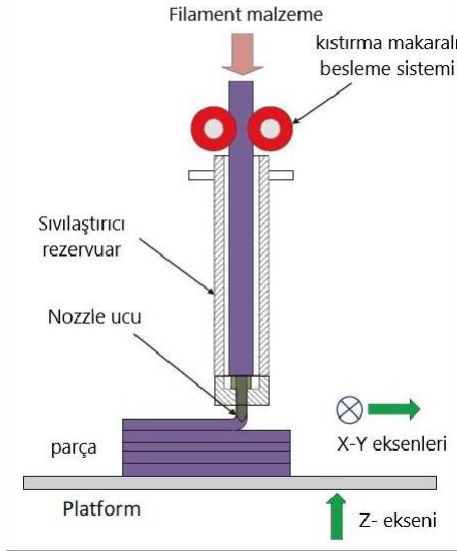
Şekil 2.3. Bağlayıcı püskürtme sisteminin şeması (Gibson, Rosen, Stucker, & Khorasani, 2021)

Yönlendirilmiş enerji biriktirme (Directed energy deposition)

Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) AM teknolojisinde, ergiyik bir havuz oluşturmak için metalik toz veya tel doğrudan bir enerji ışınının odak noktasına beslenir. Yönlendirilmiş enerji biriktirme işlemi, prensip olarak malzeme ekstrüzyonuna benzer, ancak nozzle belirli bir eksene sabitlenmemiştir ve çok eksenli hareket edebilir. Yönlendirilmiş enerji biriktirme, malzemenin %99,9'a varan teorik yoğunluğunu sağlayabilir. Lokal erime ve hızlı soğuma nedeniyle, iyi rafine edilmiş tanelerden oluşan bir mikro yapı ortaya çıkar. Bu işlemle oluşturulan parçalar genellikle döküm yöntemiyle oluşturulan parçalardan %30 daha yüksek mukavemet gösterir. Bir parçanın hasarlı kısmı seçilerek yeniden depolanabileceğinden, bu işlem parçaların onarımı için benzersiz bir şekilde uygulanabilir. Bu nedenle mevcut parçaları onarmak veya bunlara ek malzeme eklemek için yaygın olarak kullanılan karmaşık bir 3B baskı işlemidir. Bu işlemlerin bir başka avantajı da hali hazırda var olan yüzeylere kaplama ekleyebilmesidir. Bu, herhangi bir mühendislik ürününün aşınma performansını iyileştirmek için kullanılabilir (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019; Gao, ve diğerleri, 2015).

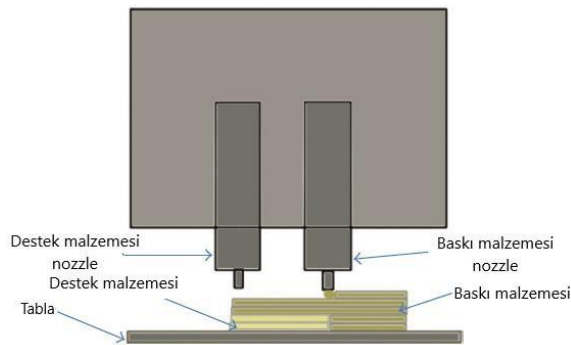
Malzeme Ekstrüzyon (Materials extrusion)

Malzeme ekstrüzyonuna dayalı olan bu 3B baskı teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok malzemeli ve çok renkli plastik, gıda veya canlı hücre üretmek için kullanılabilir ve ucuzdur. Bunların yanında, bu işlem ürünün tamamen fonksiyonel parçalarını oluşturmak için de kullanılabilir (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019).



Şekil 2.4. Malzeme ekstrüzyon sistemlerinin şeması (Gibson, Rosen, Stucker, & Khorasani, 2021)

Erimiş biriktirme modellemesi (Fused deposition modelling - FDM), bir malzeme ekstrüzyon sisteminin ilk örneğidir (Şekil 2.4). FDM 1990' ların başında geliştirilmiştir ve ana malzeme olarak polimer kullanılmaktadır. FDM, termoplastik filamentini ısıtarak ve ekstrüde ederek parçaları aşağıdan yukarıya katman katman oluşturur.



Şekil 2.5. FDM sisteminin şeması (Wong & Hernandez, 2012)

FDM'nin operasyonları aşağıdaki gibidir:

I. Termoplastik, yarı sıvı hale ısıtılır ve onu ekstrüzyon yolu boyunca ultra ince boncuklar halinde biriktirir.

II. 3D yazıcı destek veya arabelleğe alma gerektiğinde, iskele görevi gören çıkarılabilir bir malzeme bırakır. Örneğin, FDM, bir 3D kemik modeli üretmek için işlem sırasında sert plastik malzeme kullanır.

Herhangi bir malzeme ekstrüzyon sisteminde ortak olan bir dizi temel özellik vardır:

- Malzemenin yüklenmesi
- Malzemenin sıvılaştırılması
- Malzemeyi memeden geçirmek için basınç uygulaması
- Ekstrüzyon
- Önceden tanımlanmış bir yola göre ve kontrollü bir şekilde grafik çizme
- Tutarlı bir katı yapı oluşturmak için malzemenin kendisine veya ikincil yapı malzemelerine bağlanması
- Karmaşık geometrik özellikleri mümkün kılmak için destek yapılarının dahil edilmesi (Gibson, Rosen, Stucker, & Khorasani, 2021)

Bu işlemde kullanılan malzemeler çevreye zarar vermemektedir. Aynı zamanda, çeşitli malzemeleri birbirine karıştırmadan renkli objeler de üretebilmektedir. Bu işlem kullanılarak üretilen parçalar, hiçbir kimyasal işlem sonrası adım gerektirmez (Alammar A. , Kois, Revilla-León, & Att, 2022).

Malzeme püskürtme (Material jetting)

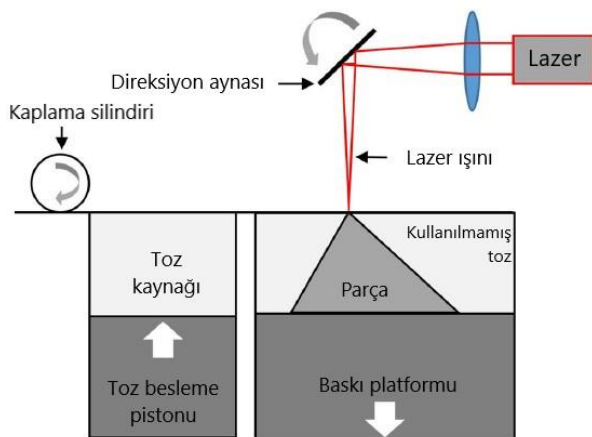
Malzeme püskürtme, ASTM Standartlarına göre, yapı malzemesinin damla damla seçici olarak biriktirildiği bir işlemdir. Malzeme püskürtme işleminde, ultraviyole (UV) ışık altında katılaştıran ve parçayı katman katman oluşturan ışığa duyarlı bir malzemeden elde edilen damlacıklar, bir yazıcı kafasından dağıtılmaktadır. Aynı zamanda, malzeme püskürtme, çok pürüzsüz bir yüzey kalitesine ve yüksek boyutsal doğruluğa sahip parçalar oluşturur. Malzeme püskürtmede çok malzemeli baskı ve polimerler, seramikler,

kompozitler, biyolojik malzemeler ve hibrit malzemeler gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019; Gibson, Rosen, Stucker, & Khorasani, 2021).

Toz yataklı ergitme (Powder bed fusion)

Toz yataklı ergitme işlemi, elektron ışını ergitme (EBM), seçici lazer sinterleme (SLS) ve seçici ısı sinterleme (SHS) baskı tekniğini içerir. Bu yöntemde, malzeme tozunu eritmek veya birleştirmek için bir elektron ışını veya lazer kullanılır. Bu işlemde kullanılan malzemeler metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve hibrit olarak örneklendirilebilir (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019).

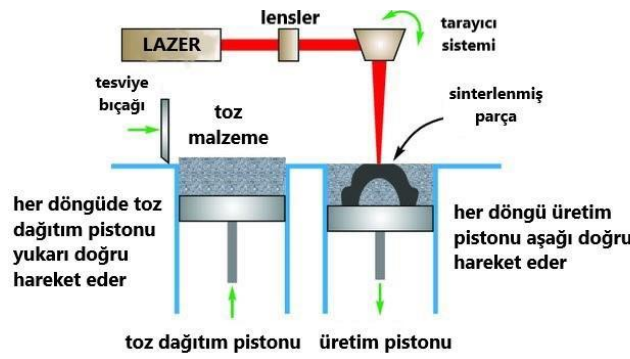
Toz yataklı 3B baskı teknolojisinin ana örneği olan Seçici lazer sinterleme (SLS), 1987 yılında Carl Deckard tarafından geliştirilmiştir. SLS, yüksek hızda işlevsel olan, yüksek doğruluğa sahip ve yüzey kaplamasını değiştiren bir 3D baskı teknolojisidir. Seçici lazer sinterleme, metal, plastik ve seramik nesneler oluşturmak için kullanılabilir. SLS, 3B ürün oluşturma işleminde polimer tozlarını sinterlemek için yüksek güçlü bir lazer kullanır. SHS teknolojisi ise, 3B parça oluşturmak için termoplastik tozu eritme sürecinde bir kafa termal baskı kullanan 3B Yazdırma teknolojisinin başka bir parçasıdır. Son olarak, elektron ışını eritme teknolojisi, malzemeyi ısıtmak için bir enerji kaynağını geliştirir (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019).



Şekil 2.6. Toz yataklı ergitme sistemlerinin şeması (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019)

Seçici lazer sinterleme, bir lazer ışını ile ısıtılan (plastik için 7 W ila 200 W arasında değişen) ince bir toz kullanır, böylece taneler birbirine kaynaşır. Süreç sinterleme olarak bilinmesine

rağmen, bu tam olarak doğru değildir. Termal bozulmayı minimize etmek ve önceki katmanda birleşmeyi kolaylaştırmak için toz olmadan önce lazer ışını ile sinterlenen tüm yatak, malzemenin erime noktasının hemen altında ısıtılır. Her katman oluşturulduktan sonra yatak indirilir ve yeni bir toz katman uygulanır. Daha sonra uygulanan tozu eşit şekilde yaymak için dönen bir silindir kullanılır. Sinterlenmemiş malzeme yapıyı desteklemek için yerinde kalırken, sinterlenmiş malzeme parçayı oluşturur. Sinterlenmemiş malzeme, yapı tamamlandıktan sonra temizlenebilir ve geri dönüştürülebilir. Bu işlemde metal tozları, naylon, naylon kompozitler, kum, mum ve polikarbonatlar kullanılabilir. Süreç, EBM ile karşılaştırıldığında hala nispeten yavaştır ve ürün üzerinde termal bozulmaya ve çatlaklara yol açabilecek tekdüze olmayan termal alan dağılımı gibi sorunlardan muzdariptir. Buna rağmen, SLS'nin yüksek doğruluk derecesi ve yüzey kalitesi, onu en yaygın kullanılan metal AM işlemlerinden biri haline getirir (Bikas, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2016).



Şekil 2.7. Seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisinin şeması (Bikas, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2016)

Sac laminasyonu (Sheet lamination)

ASTM sac laminasyonunu, nesnenin bir parçasını üretmek için malzeme tabakalarının birbirine bağlandığı 3 boyutlu baskı işlemi olarak tanımlamıştır. Katmanlı nesne üretimi (LOM) ve ultrason eklemeli üretim (UAM), bu 3B baskı teknolojisinin örnekleridir. Tam renkli baskılar yapabilmesi, nispeten ucuz olması, malzeme taşımanın kolay olması ve fazla malzemenin geri dönüştürülebilmesi bu işlemin avantajlarıdır (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019).

Katmanlı nesne üretimi (LOM), daha düşük üretim maliyeti ve daha az çalışma süresi ile karmaşık geometrik parçalar üretme kapasitesine sahiptir. Ultrason katkılı üretim (UAM),

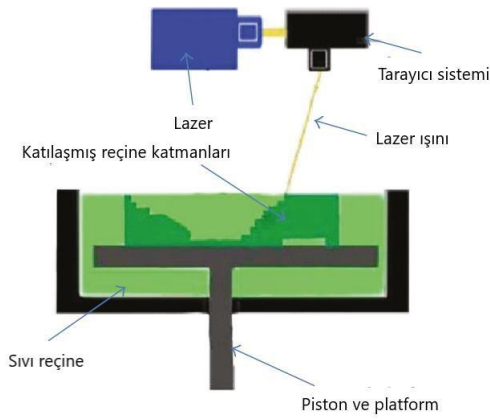
özelliği olmayan folyo stoğundan çekilen metal katmanlarını birleştirmek için sesi kullanan yenilikçi bir proses teknolojisi (Shahrubudin, Lee, & Ramlan, 2019).

LOM'de kullanılan malzeme, bir kenarına ısıya duyarlı yapıştırıcı uygulanmış özel bir kağıt türüdür. Kağıt bir rulodan tedarik edilir ve kağıdın yapışkanını harekete geçiren ısıtılmış bir rulo kullanılarak bir önceki katmana yapıştırılır. Katmanın konturu bir CO² lazeri ile kesilir ve tam olarak bir katman (kağıt) kalınlığı derinliğine nüfuz edecek şekilde dikkatlice modüle edilir. Fazla atık malzeme, çıkarılmasını kolaylaştırmak için dikdörtgenler halinde kırılır, ancak destek olarak kullanılmak üzere inşa sırasında yerinde kalır. Kullanılan malzeme levhası inşaat alanından daha geniştir, böylece parça tabakası kesildiğinde, levhanın kenarları bir germe rulosu tarafından çekilmek ve böylece bir sonraki tabakaya sürekli olarak malzeme sağlamak için bozulmadan kalır (Wong & Hernandez, 2012).

Kazan fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization)

En sık kullanılan 3B baskı tekniği, genel olarak foto-reaktif polimerlerin bir lazer, ışık veya ultraviyole (UV) kullanılarak kürlenmesini ifade eden fotopolimerizasyondur. Fotopolimerizasyonun kullanıldığı 3B baskı teknolojilerine örnek olarak ise stereolitografi (SLA) ve dijital ışık işleme (DLP) verilebilir (Wong & Hernandez, 2012).

SLA'da, foto başlatıcıdan ve belirli koşullara ışınlanmış maruz kalmanın yanı sıra herhangi bir boya, pigment veya diğer eklenen UV emicilerden etkilenmiştir. Bu arada, dijital ışık işleme, fotopolimerlerle çalışan Stereolitografiye benzer bir işlemdir. Işık kaynağı önemli bir farktır. Digital Light Process, sıvı kristal ekran panelli bir ark lambası gibi daha geleneksel bir ışık kaynağı kullanır. Fotopolimer reçine teknesinin tüm yüzeyine tek bir geçişte uygulanabilir, bu da onu genellikle Stereolitografiden daha hızlı hale getirir. Vat Fotopolimerizasyonunun önemli parametreleri, maruz kalma süresi, dalga boyu ve güç kaynağı miktarıdır. Başlangıçta kullanılan malzemeler sıvıdır ve sıvı ultraviyole ışığa maruz kaldığında sertleşirler. Fotopolimerizasyon, iyi ayrıntılara ve yüksek kaliteli bir yüzeye sahip birinci sınıf bir ürün yapmak için uygundur (Wong & Hernandez, 2012).



Şekil 2.8. Stereolithografi teknolojisinin şeması (Wong & Hernandez, 2012)

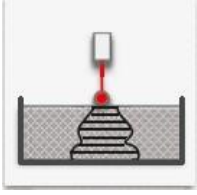
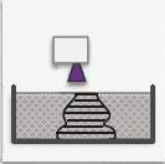
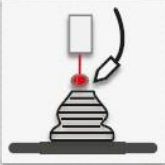
AM uygulamaları için çeşitli malzemeler kullanılmaktadır ve yeni malzemelerin daha da geliştirilmesi için araştırmalar devam etmektedir. Günümüzde metaller, alaşımlar, seramikler, biyoaktif camlar, plastikler ve bunların kombinasyonları açısından çeşitli biyomedikal malzeme kategorileri mevcuttur. Şekil 3, çeşitli AM tekniklerine tahsis edilen malzeme kategorisini göstermektedir (Singh, Ramakrishna, & Singh, 2017).

(Blakey-Milner, ve diğerleri, 2021) Ti-6Al-4V'den üretilecek olan bileşenin L-PBF teknikleri kullanılarak geleneksel bir imalat yöntemi olan döküm işlemine göre kütle ve maliyet azaltma hedefiyle mevcut menteşe braketinin yerini almasını amaçlamıştır. Yürütülen çalışma L-PBF tabanlı AM tekniklerinin kullanılmasının kütle azaltmada ciddi avantajlar sağladığını göstermiştir.

Eklemeli İmalat (AM) İşlemleri														
İşlem	Lazer Tabanlı AM İşlemleri						Termal Ekstrüzyon	Malzeme Püskürtme	Malzeme Yapıştırma	Elektron Işın				
	Lazer Ergitme		Lazer Polimerizasyon											
İşlem Şeması														
İsim Malzeme	SLS		DMD		SLA		FDM		3DP		LOM		EBM	
	SLM		LENS		SGC		Robocasting		IJP		SFP			
	DMLS		SLC		LTP				MJM					
			LPD		BIS				BPM					
					HIS				Thermojet					
Toplu Malzeme Türü		Toz		Sıvı		Katı								

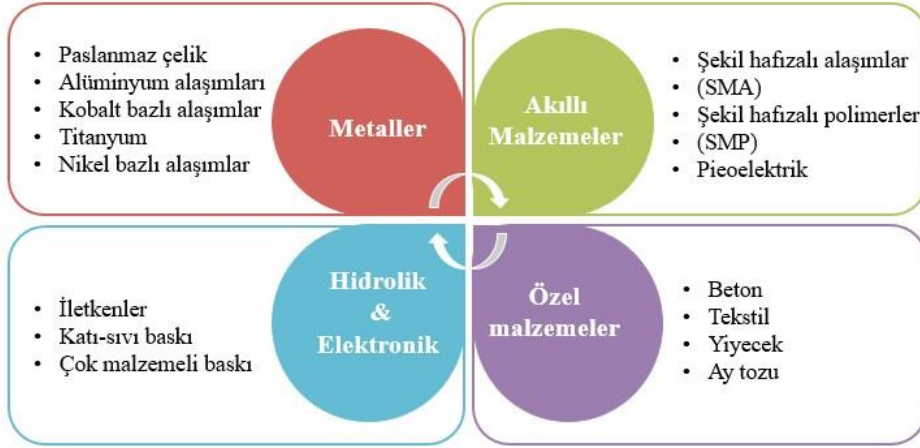
Şekil 2.9. Eklemeli imalat çeşitlerinin sınıflandırılması (Singh, Ramakrishna, & Singh, 2017)

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat çeşitleri ve işlem sürecinin özeti (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, & Dolen, 2017)

Sembol	Kategori	Teknoloji	İşleme süreci
	Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	Erimiş malzemenin katman katman biriktirilmesi
		Kontur İşleme	
	Toz Yataklı Birleştirme	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Seçilen bölgeyi eriterek bir yatakta tozun füzyonu
		Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)	
		Seçici Lazer Ergitme (SLM)	
		Elektron Işını Ergitme (EBM)	
	Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	Sıvı bir kapta foto-kürlenebilir malzemenin seçici kürlenmesi
	Malzeme Püskürtme	Polijet/İnkjet Baskı	Malzeme biriktirme ve ardından kütleme
	Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Mürekkep Püskürtme Baskı (3DP)	Tozun bir yatakta birleştirilmesi için bağlayıcının seçici olarak dağıtılması
	Sac Laminasyon	Lamine Nesne Üretimi (LOM)	Tek tek malzeme tabakalarının yapıştırılması
	Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme	Lazer Tasarımı Net Şekillendirme (LENS)	Malzemenin doğrudan füzyonu
		Elektron Işını Kaynağı (EBW)	

2.1.2. Eklemeli İmalat Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler

Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan malzemeler Şekil 2.8.'de verilmiştir.



Şekil 2.10. Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, & Dolen, 2017)

Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Metaller
- Polimerler
- Seramikler
- Kompozitler
- Akıllı malzemeler

2.1.3. Metal Eklemeli İmalat

Metaller mekanik özelliklerinden dolayı mühendislikte en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Metal Eklemeli İmalat (MAM), metalik malzemeleri işleyen AM yöntemlerinin alt kümesini ifade etmektedir. 3D baskı endüstrisi, geleneksel imalat yöntemlerle üretilmiş parçaların muadili olabilecek metal parçalar oluşturmak için yeni çözümler aramaktadır. Bu bağlamda 3b baskı teknolojisindeki gelişmeler neticesinde metal eklemeli imalat (MAM) ortaya çıkmıştır. Son yıllarda, birçok metalik parça, ana malzeme olarak alüminyum, titanyum, paslanmaz çelik vb. Kullanılarak AM teknolojileri ile

üretilebilir. Ticari metal 3B yazıcıların çoğunda metal tozları kullanılmaktadır. Ancak diğer uygun malzeme karışımları da MAM için incelenmiştir (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, & Dolen, 2017).

MAM teknolojilerinden Seçici Lazer Eritme (SLM), sağlam mekanik özelliklere sahip karmaşık geometrileri üretmek için lazer füzyonunu kullanan bir toz yatağı işlemidir. İlişkili ticari fırsatlara rağmen SLM, karmaşık çoklu fizik etkileşimlerine, karmaşık geometrilere, geçici ısı transfer yollarına ve doğası gereği stokastik olan ve yeterince belgelenmemiş malzeme özelliklerine tabi olan oldukça boyutlu bir süreçtir (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, & Dolen, 2017; Leary, ve diğerleri, 2018).

Çizelge 2.2. Eklemeli imalat çeşitleri ve kullanılan malzemeler (Gao, ve diğerleri, 2015)

Kategori	Teknoloji	Malzeme
Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	Termoplastikler, seramikler, metal macunlar
	Kontur İşleme	
Toz Yataklı Birleştirme	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Poliamidler/polimerler
	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)	Atomize edilmiş metal toz (17-4 paslanmaz çelik, kobalt krom, titanyum Ti6Al4V), seramik toz
	Seçici Lazer Ergitme (SLM)	
	Elektron Işını Ergitme (EBM)	
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	Fotopolimer, Seramikler (alümina, zirkon, PZT)
Malzeme Püskürtme	Polijet/Inkjet Baskı	Fotopolimer, mum
Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Mürekkep Püskürtme Baskı (3DP)	Polimer tozu (plaster, reçine), Seramik toz, Metal toz
Sac Laminasyon	Lamine Nesne Üretimi (LOM)	Plasik film, Metal sac, Seramik şerit
Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme	Lazer Tasarımlı Net Şekillendirme (LENS)	Eritilmiş metal toz
	Elektron Işını Kaynağı (EBW)	

2.1.4. Havacılık sektöründe eklemeli imalat uygulamaları

Havacılık ve uzay sektöründe üretim, işlevsel performans, tedarik süresi azaltma, hafiflik, karmaşıklık, maliyet yönetimi ve sürdürme gibi birbiriyle etkileşim halindeki çok sayıda teknik ve ekonomik hedefe tabidir. Bu hedeflerin her birinin birbiriyle güçlü ilişkileri vardır ve en uygun tasarım çözümü seçilirken her bir faktörün dikkate alınması dikkatle değerlendirilmelidir (Blakey-Milner, et al., 2021).

Son yirmi yılda, havacılık uygulamalarında Ti6Al4V alaşımı ve diğer metalik bileşenlerin eklemeli imalatında önemli gelişmeler olmuştur. Genel olarak, uzay aracı uygulamalarında kullanılan metalik braketler, eklemeli imalat sürecinin dökme haddelenmiş veya ekstrüde edilmiş ürünlerinden işlenir, çeşitli Ti-6Al-4V alaşım braketleri üretilir ve dökme alaşımla kıyaslamak için mekanik özelliklerine bakılır. Rawal, Brantley, & Karabudak, 2013, gerçekleştirdikleri çalışmada Juno uzay aracında birkaç EBM ile işlenmiş Ti-6Al-4V desteğinin kullanımını açıklamıştır. İlk olarak, braket çizimlerinin her birinin üç boyutlu (3D) CAD modeli, pürüzsüz bir yüzey kaplaması için işleme için biraz fazla yüzey katmanları içerecek şekilde geliştirilmiştir. Mevcut bölme boyutunda aynı anda birden fazla parça oluşturulmuştur. Aynı EBM işleme koşulları altında, hazırlamak için birden fazla Ti-6Al-4V çubuk numunesi yapılmıştır ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Test sonucunda ortalama malzeme özelliklerinin işlenmiş alaşımla oldukça karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir (Rawal, Brantley, & Karabudak, 2013).

Resim 2.1’de LPBF teknolojisi ile üretilmiş bir braket verilmiştir.



Resim 2.1. LPBF ile üretilmiş, malzemesi Ti6Al4V olan Airbus A350 XWB kabin braket konnektörü (Rawal, Brantley, & Karabudak, 2013)

Schiller, 2015, yaptığı çalışmada eklemeli imalatın üretim kapasiti artsa da havacılık uygulamalarında teknolojinin mevcut durumuyla ilgili özellikle fırlatma araçları için bir uyarı listesi olduğuna dikkat çekmiştir. Polimer bazlı malzemelerin kullanımı her ne kadar imalat araçlarında yaygınlaşsa da uçuş uygulamaları için özel ihtiyaçları zorlukla karşıladığını ifade etmiştir. Diğer yandan ise estetik tasarımların çeşitliliği ve düşük hacim göz önüne alınırsa eklemeli imalat için en uygun alanlardan biri olduğunu vurgulamıştır.

Blakey-Milner ve diğerleri 2021, havacılık sektöründeki metal eklemeli imalatın kapsamlı bir incelemesini sunmuştur. Metal eklemeli imalat, metal parçalar üretmek için tipik olarak katman katman üretim tekniklerini içerir. Bu teknolojideki önemli gelişmelerin, göreceli olarak havacılık endüstrisindeki ticari ve performans avantajlarından kaynaklanmakta olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda teknolojinin mevcut durumunu aynı zamanda bu uygulamalarda eklemeli imalatın birincil uygulama senaryolarını ve ilgili ticari ve teknik faydalarını özetlemişlerdir. Gözlemlerine dayanarak, her uygulama senaryosu için metal eklemeli imalat için zorluklar ve potansiyel fırsatları vurgulamıştır.

Çizelge 2.3. Eklemeli imalat çeşitleri ve ve avantaj ve dezavantajları (Nazir, Abate, Kumar, & Jeng, 2019)

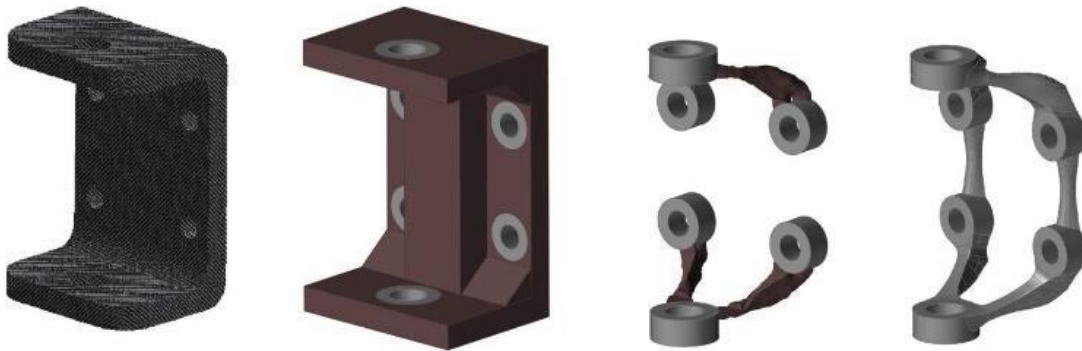
Kategori	Teknoloji	Avantaj ve dezavantajları
Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	- Yüksek inşa hızı - İyi parça çözünürlüğü - Aşırı sertleşme, taranan çizgi şekli - Sarf malzemeleri ve malzemeler için yüksek maliyet
	Kontur İşleme	
Toz Yataklı Birleştirme	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	- Çok malzemeli 3d baskı - Yüksek yüzey kalitesi - Düşük mukavemetli malzeme
	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)	
	Seçici Lazer Ergitme (SLM)	
	Elektron Işını Ergitme (EBM)	
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	- Ucuz ekstrüzyon makinesi - Çok malzemeli baskı - Sınırlı parça çözünürlüğü - Kötü yüzey kalitesi
Malzeme Püskürtme	Polijet/Inkjet Baskı	- Tam renkli nesneler yazdırma - Son işleme sırasında sızma gerektir - Geniş malzeme seçimi - Bitmiş parçalarda yüksek gözeneklilik
Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Mürekkep Püskürtme Baskı (3DP)	- Yüksek doğruluk ve detaylar - Tamamen yoğun parçalar - Yüksek özgül güç - Toz geri dönüşümü - Destek ve ankraj yapısı
Sac Laminasyon	Lamine Nesne Üretimi (LOM)	- PBF işlemine kıyasla yüksek biriktirme oranı - Hasarlı/aşınmış parçaların onarımı - İşlevsel olarak kademeli malzeme baskısı - Son işlem gerektir
Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme	Lazer Tasarımli Net Şekillendirme (LENS)	- Yüksek yüzey kalitesi - Düşük malzeme, makine, proses maliyeti - Çözme sorunları
	Elektron Işını Kaynağı (EBW)	

2.2. Topoloji Optimizasyonu (TO)

Yapısal optimizasyon, bir yapının tasarımını, rijitlik ve dayanıklılık gibi istenen bazı davranışlara göre performansını iyileştirmek için değiştiren klasik bir mühendislik disiplini. Yapısal optimizasyon için Bendsøe ve Kikuchi (1988) tarafından homojenleştirme yaklaşımı ile topoloji optimizasyonu (TO) kullanılmış ve hızla gelişmeye devam etmektedir (Mahatme, Giri, Chadge, & Sonwane, Compression Deformation Analysis Of Cellular Lattice Structure For Structural Optimization in Additive Manufacturing, 2021).

TO, yapısal optimizasyon tasarımının temelidir. TO ile elde edilen karmaşık yapı iskelelerinin üretimi için en uygun yöntem AM'dir. Yapısal optimizasyon açısından birçok optimizasyon teknolojisi ortaya çıkmıştır ve bu gelişmelerle birlikte daha fazla yapısal özelliğin optimizasyona entegre edilmesi gerekmektedir (Ha & Lu, 2020; Top, Şahin, Gökçe, & Gökçe, 2021).

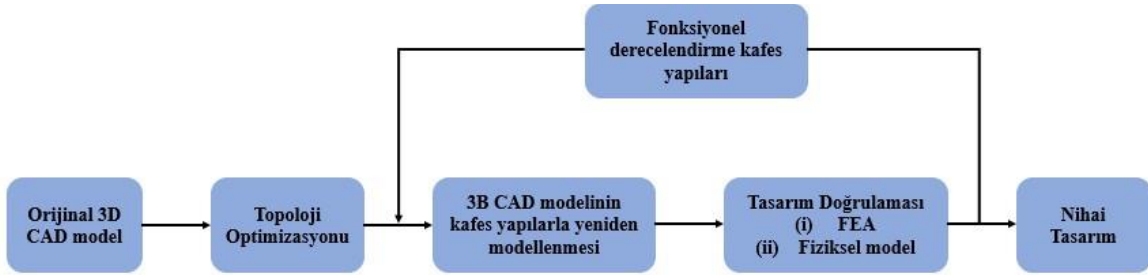
Topoloji optimizasyonu ile ilgili ilk çalışmalar 1988'de yayınlanmış olmasına rağmen, topoloji optimizasyonu alanı hala araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. Yük taşıma braketleri olan topoloji optimize edilmiş bir parçanın bir örneği, Resim 2.2'de optimize edilmiş bir braket örneği verilmiştir (Ha & Lu, 2020).



Resim 2.2. Topolojik optimize edilmiş braket (du Plessis, ve diğerleri, 2019)

AM süreci, bazı geleneksel imalat teknikleriyle (örneğin işleme ve enjeksiyon kalıplama) üretilmesi zaman alan karmaşık mimariye sahip tasarımların üretilmesini sağladı. TO, önceden tanımlanmış dış hacim içinde malzeme kütle dağılımını optimize ederek hafif

yapılar oluşturan ve malzeme kullanımını en aza indiren bir yöntemdir. Topolojik optimizasyonun temel amacı, yapının kütlesini belirlenen sınırlar içinde minimuma indirirken, üründen beklenen mekanik özellikleri korumaktır. Bunu yaparken gözenekliliği ve yüzey alanı-hacim oranı yüksek bir yapı oluşturur (Hoang, Tran, Vu, & Xuan, 2020) (Şekil 2.10).



Şekil 2.11. Bir topolojik optimizasyon prosedürünün akış şeması (Hoang ve diğerleri, 2020)

TO, yoğunluk tabanlı ve kafes tabanlı olmak üzere iki farklı yaklaşımla başarıyla uygulanabilir. Kafes tabanlı yaklaşım, diğerinden farklı olarak, ideal kütle dağılımını elde etmek için kafesler olarak da adlandırılan periyodik hücreleri kullanır. Bugün, havacılık, otomotiv (Resim 2.3) ve biyomekanik endüstrilerindeki çeşitli endüstrilerde, yukarıda özetlenen her iki yaklaşımı kullanarak topolojik olarak optimize edilmiş tasarımlara sahip çok sayıda uygulama vardır (Hoang ve diğerleri 2020) (Resim 2.4).

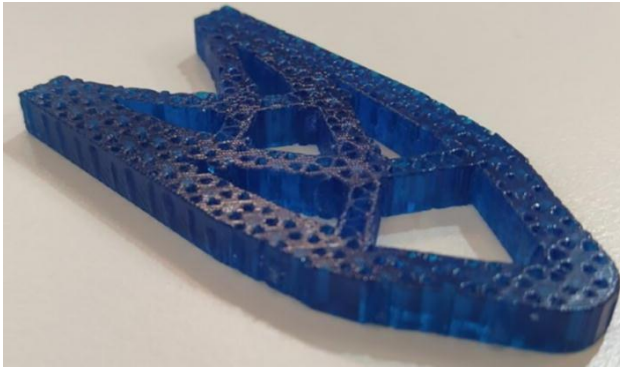
Bu çalışmada topoloji optimizasyonu yalnızca kafes yapıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 2.3. Bir araba süspansiyonunun topolojik olarak optimize edilmiş direği (Datta ve diğerleri, 2019)

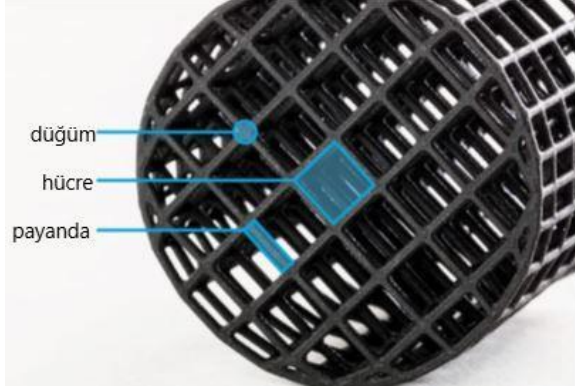
Kafes yapısı, belirli yönlerde özel bir desende tekrar eden birim hücrelerin düzenli bir düzenlemesidir. Kafes malzemeleri üstün özellikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmış olmasına rağmen, mevcut topolojik optimizasyon yöntemlerine kıyasla makro yapı tasarımından ziyade mikro yapı tasarımına odaklanmaktadır. Bu nedenle kafes yapılar en etkili ve ucuz optimizasyon yöntemi olarak önerilebilir. Ancak son yıllarda topoloji optimizasyonu, kafes yapılarının optimizasyonu ile eş zamanlı olarak çalışılmaktadır. Bu eşzamanlı optimizasyon çalışmalarında hem makro yapı hem de mikro yapı optimize edilmiştir (Voucu Andrei, Hadar, & Vlascenau, 2021)

Kafes yapısı, belirli yönlerde özel bir desende tekrar eden birim hücrelerin düzenli bir düzenlemesidir. Kafes malzemeleri üstün özellikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmış olmasına rağmen, mevcut topolojik optimizasyon yöntemlerine kıyasla makro yapı tasarımından ziyade mikro yapı tasarımına odaklanmaktadır. Bu nedenle kafes yapılar en etkili ve ucuz optimizasyon yöntemi olarak önerilebilir. Ancak son yıllarda topoloji optimizasyonu, kafes yapılarının optimizasyonu ile eş zamanlı olarak çalışılmaktadır. Bu eşzamanlı optimizasyon çalışmalarında hem makro yapı hem de mikro yapı optimize edilmiştir (Voucu Andrei, Hadar, & Vlascenau, 2021)



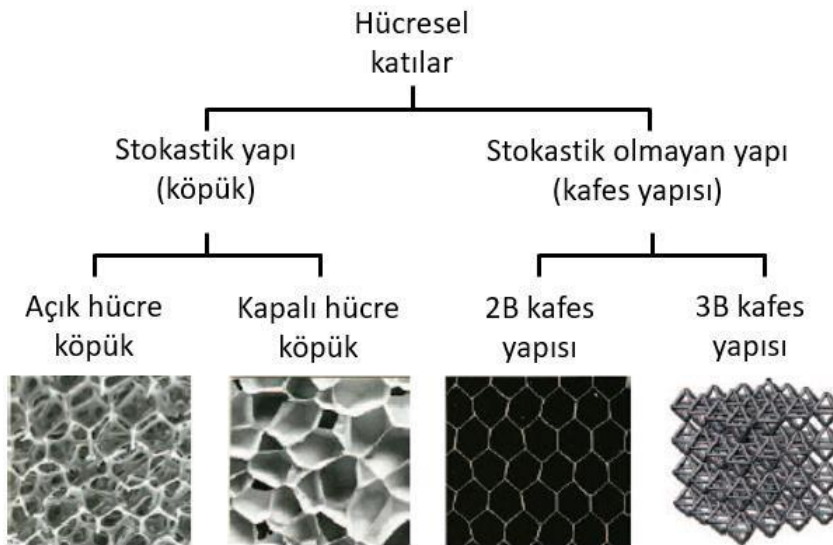
Resim 2.4. Topoloji optimizasyonu ve kafes yapılarını birlikte kullanma örneği (Hoang ve diğerleri, 2020)

2.3. Kafes Yapıları



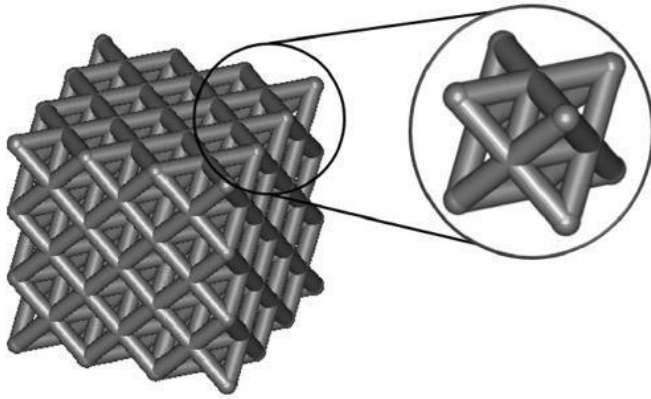
Şekil 2.12. Dikme tabanlı kafes yapının ana bileşenleri (Voucu Andrei ve diğerleri, 2021)

Kafes yapıları üç bileşenden oluşur: düğümler, kirişler ve hücreler. Düğüm, kirişlerin kesişme noktasıdır. Kirişler hücrelerin kenarlarını oluşturur. Son olarak, hücreler, kirişin boyutuna ve konumuna bağlı olarak farklı şekil ve boyutlara sahiptir. Kafes yapıları, Şekil 2.14'te gösterildiği gibi tekrarlayan hücre dizileri oluşturarak parçaların performansını iyileştirmeyi amaçlayan yenilikçi bir yöntemdir. Eklemeli imalat tekniklerinin geliştirilmesi, kafes yapılarının üretilebilirliğini sağlayarak kafes yapı tasarımlarını özgürleştirmiştir (Voucu Andrei, Hadar, & Vlascenau, 2021). Kafes yapıları öncelikle, ağırlığın azaltılmasına ve ayrıca yapısal bütünlüğün korunmasına önemli ölçüde yardımcı olan düğümlerden ve kirişlerden veya payandalardan oluşur (Tang, Dong, Zhou, & Zhao, 2018).



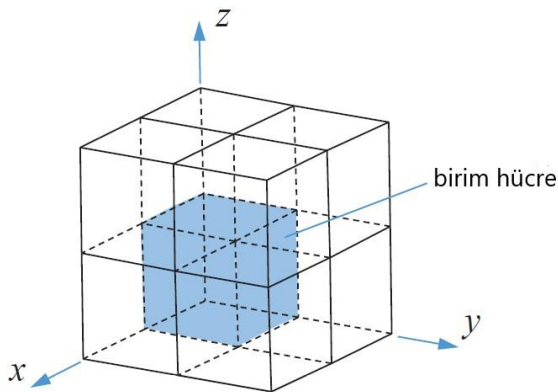
Şekil 2.13. Hüresel katıların kategorileri (Tao & Leu, 2016)

Kafes yapısı, kenarları ve yüzleri olan tekrar eden bir periyodik birim hücre kümesinden oluşan orta ölçekli (0,1-10 mm) veya mikro ölçekli (<0,1 mm) bir mimaridir. Genellikle hücresel katılarla ilişkilendirilen iki ve üç boyutlu kafes yapıları vardır (Şekil 2.13) (Tao & Leu, 2016; Tang ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.14. Kafes yapısı ve kafes birim hücre (Nguyen, Kim, & Choi, 2019)

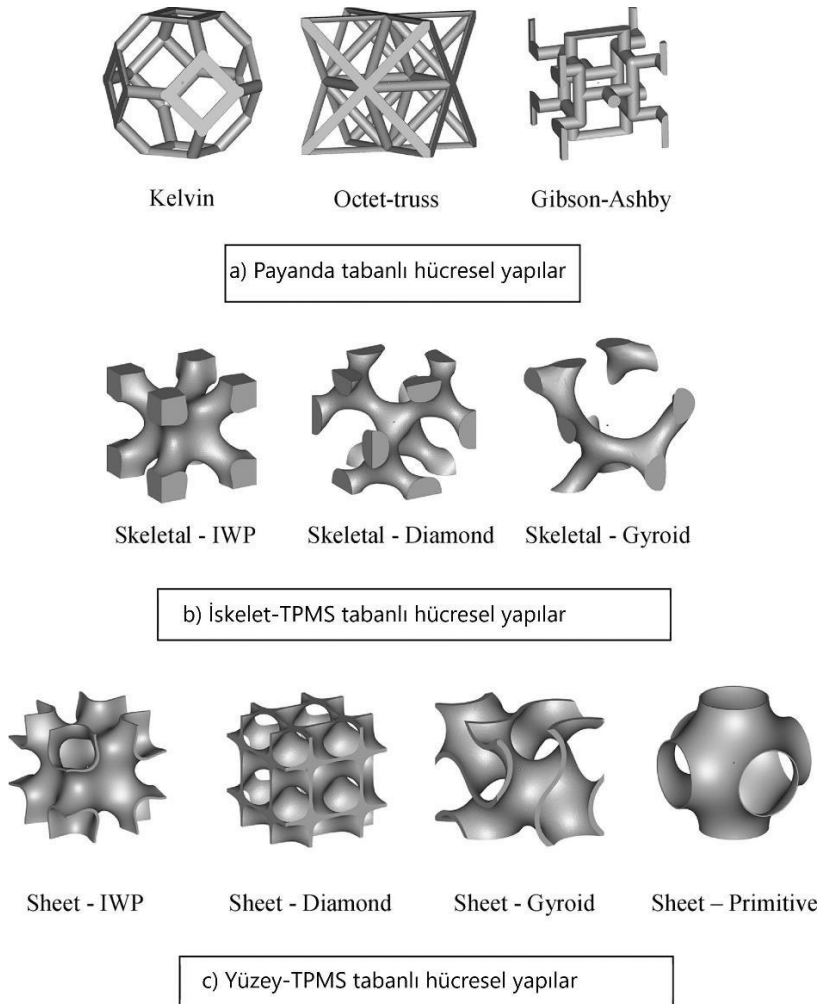
Kafes yapısını oluşturan en küçük elemanlara kafes birim hücreleri denir (Şekil 2.14). Birim hücrelerin kübik olarak tasarlanması daha kolay olduğu için çoğunlukla kübik olarak oluşturulurlar. Ardından, oluşturulan birim hücre, Şekil 2.15'te gösterilen üç eksen boyunca yinelemeli olarak tasarlanabilir. Kafes yapıları, köpük ve bal peteği dahil olmak üzere hücresel yapı sınıfına ait olsa da, yüksek sertlik-ağırlık gibi özellikleri elde etmek için daha esnektirler. oranı, negatif Poisson oranı ve düşük termal genleşme katsayısı (Tang ve diğerleri, 2018; Feng, Liu, Lin, & Fu, 2021).



Şekil 2.15. Doğrudan modelleme şeması (Tkac, Samborski, Monkova, & Debski, 2020)

Kafes yapıları bu üstün özelliklerinden dolayı ortopedik implantlar (Guariento, Buonomici, Marzola, Volpe, & Governi, 2020; Cheng, Bai, & To, 2019; Top, Şahin, & Gökçe, 2019; Soro, et al., 2022; Yang, ve diğerleri, 2008) enerji emiciler (Khosroshahi, Duckworth, Galvanetto, & Ghajari, 2019; Cengiz, Biçer, & Başak, 2021) ve ısı değiştiriciler (Kim & Yoo, 3D Printed Compact Heat Exchangers With Mathematically Defined Core Structures, 2020) gibi birçok alanda benzeri görülmemiş değişiklikler yapmıştır.

Kafes yapıların biyomalzeme olarak kullanılmasının yanı sıra havacılık, inşaat ve makine mühendisliğinin diğer alanlarında da yaygın olarak tercih edilmektedir. Rijit, güçlü ve hafif kafes yapıların tasarım ve üretimine yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. Tekrarlayan düzende birim yapılarının tasarımı bazı uygulamalarda kritik öneme sahiptir (Xu, Shen, Zhou, Huang, & Xie, 2016).



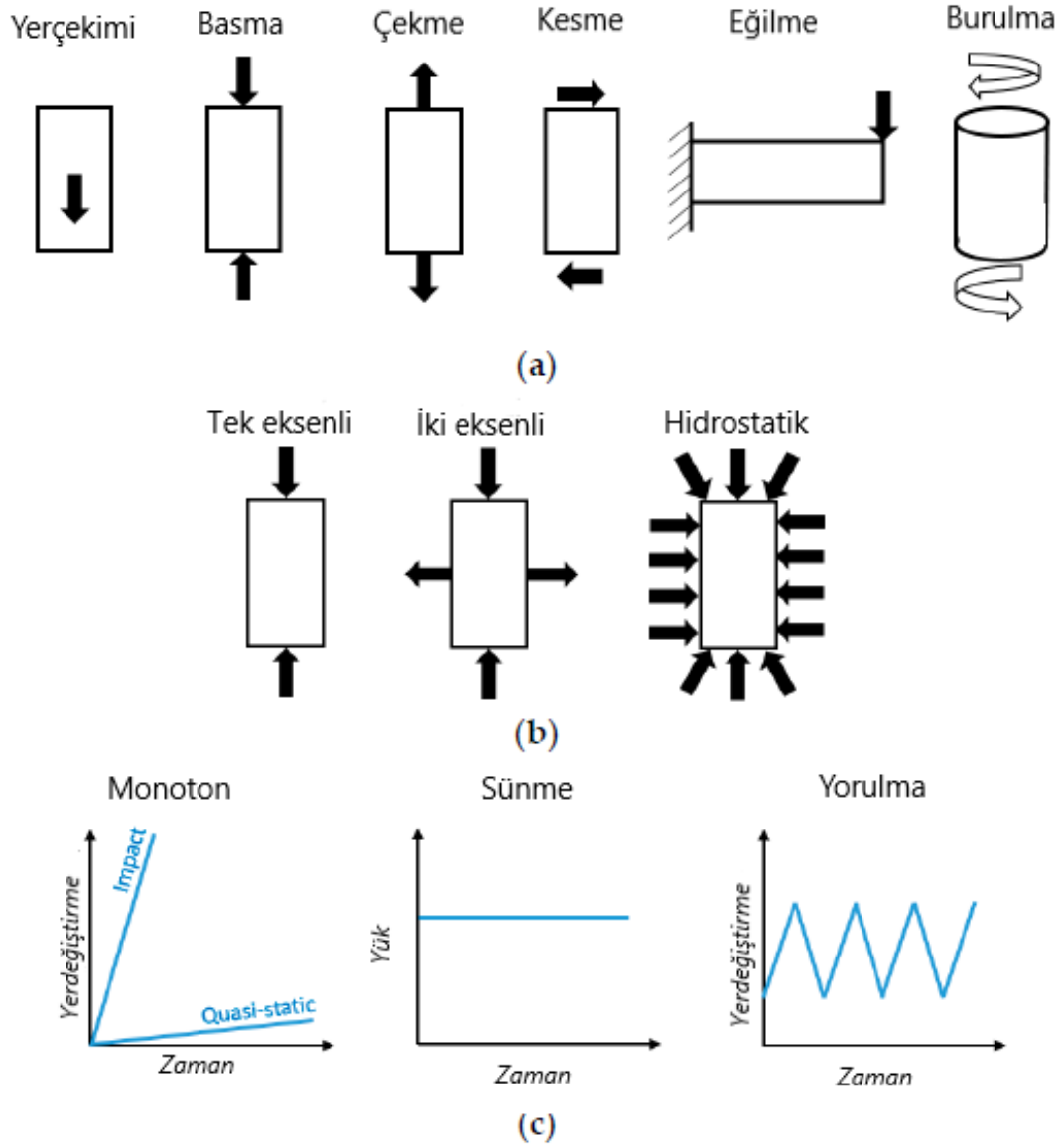
Şekil 2.16. Farklı hücresel topolojilerin birim hücresi (Al-Ketan, Rowshan, & Al-Rub, 2018)

2.3.1. Kafes yapılarının mekanik özellikleri

Kafes yapıların özellikleri doğrudan birim hücrenin şekline ve yapısına bağlı olduğundan, her birim hücrenin farklı mekanik özellikleri vardır. Gradyan kafes yapıları (GLS) (Li, Liao, Dai, & Xie, 2020; Cheng, Bai, & To, 2019) ve tek tip kafes yapıları (ULS) arasındaki en büyük fark, gradyan kafes yapılarına kuvvet uygulandığında katman katman yok etme mekanizmasıdır (Seharing, Azman, & Abdullah, 2020). Gözenekli malzemelerin birim hücre yapısı, malzemelerin işlevsel özelliklerinde önemli bir rol oynar. Bu nedenle, gözeneklilik, özgül yüzey alanı ve gözenek boyutu gibi parametreler, karakterizasyon için yaygın olarak kullanılmaktadır (Lei, Li, & Wang, 2020).

Doğada bulunan hücresel yapıların mekanik özelliklerini tanımlamak için şu soru sorulabilir: “Doğa tasarımı X için nasıl çalışır?” Bu mekanik özelliklerden bazıları sertlik/rijitlik, mukavemet ve tokluk olarak sıralanabilir.

Bu özellikler tanımlanırken canlının bulunduğu koşullar ve maruz kaldığı yükler (yerçekimi yüklemesi, sıkıştırma, çekme, burulma, eğilme, kesme) dikkate alınır. Bu yükler bir veya birden fazla yönde ve farklı zamanlarda uygulanabilir. Bu nedenle, yükleme durumu, Şekil 2.17’de gösterildiği gibi yüklem türü, yükleme yönü ve yürütme süresi olmak üzere üç bilgi parçası belirtilerek tanımlanabilir (Bhate, Penick, Ferry, & Lee, 2019).



Şekil 2.17. Yükleme koşullarının sınıflandırılması: (a) yükleme türü, (b) yükleme yönü ve (c) uygulama süresi (Bhate ve diğerleri 2019)

Kafes yapılarının farklı yüklemeleri için üç tip gerilme mümkündür. Gerilme baskın yapılar, çekme veya basma gerilmesine maruz kalan kafes yapılardır (Nagesha B. , ve diğerleri, 2020)

2.3.2. Kafes yapılarının avantajları ve dezavantajları

Geleneksel olarak kafes yapılar, döküm, sac şekillendirme veya tel bağlama işlemleri ile üretilir. Bununla birlikte, bu yöntemlerin üretim sınırlamaları, tasarlanan kafes yapılarının karmaşıklığını ciddi şekilde sınırlar. Bu nedenle, bu yöntemler makro ölçekte

düzenli bir şekilde sadece birkaç basit birim hücre topolojisine sahip kafes yapıları üretmek için kullanılabilir (Tang ve diğerleri, 2018).

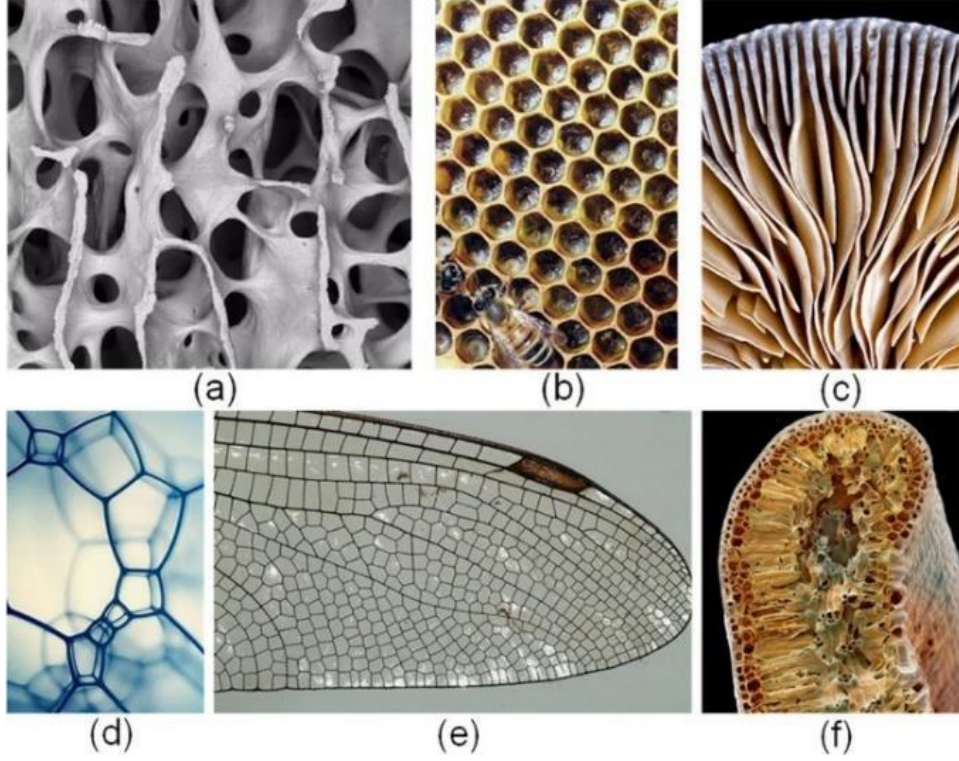
Bir uygulamada kafes tasarımcısı için en önemli zorluk, uygun kafes tasarım değişkenlerini seçmektir. Kafes malzemesi, hücre tipi ve hacim oranı, yapısal sertlik ve mukavemetin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Aynısı diğer mekanik özellikler için de geçerlidir (Maskery, ve diğerleri, 2018)

Boyut, kafes yapılarının mekanik performansını etkilediğinden, bağıl yoğunluk ne kadar küçükse, boyut etkisi o kadar büyük olur (Kladovasilakis, Tsongas, & Tzetzis, 2020).

Eklemeli imalatın dört ana hedefi vardır ve bu hedeflere ulaşmak için eklemeli imalattaki gelişmeler sayesinde kafes yapılar ön plana çıkmıştır. Bu dört ana hedef aşağıda açıklanmıştır:

1. Üretim sürecinde kullanılan malzeme miktarının azaltılması
2. Bir tasarım üretmek için gereken süreyi azaltmak
3. Üretim sürecinde kullanılan enerji miktarının azaltılması
4. Ağırlığı en aza indirirken üretilen nesnenin gücünü optimize edin

Bu hedeflere ulaşmak için yapılan çalışmaların sonucu olan kafes yapılar, ürün yaşam döngüleri için oldukça faydalıdır. Malzeme israfını, üretim sırasındaki enerji tüketimini en aza indirir ve özellikle tek bir malzemeden oluştuğunda kolayca geri dönüştürülebilir (Helou & Kara, 2018). Böylece sürdürülebilir tasarımlar sağlar.



Resim 2.5. Doğada bazı hücresel yapılar bulunur. a) SEM altındaki insan kemiği, b) Petek yapısı, c) Mantar mantarları, d) Baloncuklardaki Voronoi yapısı, e) Yusufçuk kanadı, f) yaprak yapısı (Nazir, Abate, Kumar, & Jeng, 2019)

2.3.3. Kafes yapılarının üretilebilirliği

3D baskı gibi eklemeli üretim tekniklerinin geliştirilmesi, kafes yapıları tasarlanırken daha karmaşık yapıların oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Böylece, AM yöntemleriyle oluşturulan kafesler, vücutta dokuları yenileyen kemik gibi biyomateryal yapıları taklit edebilir (Briguiet & Egan, 2020).

Doğada bulunan yapıların enerji soğurma yetenekleri her zaman malzeme bilimcilerin ve mühendislerin ilgisini çekmiştir. Kafes yapıları, Şekil 19'de gösterildiği gibi geometrik özelliklerine göre üç kategoriye ayrılır. Bunlar sırasıyla 2B ekstrüde ağlar, kafes benzeri kafesler ve 3B kabuk/plaka benzeri ağlardır. 2B ekstrüde ağlar, döküm, biçimlendirme ve ekstrüzyon gibi geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak kafes benzeri kafesler üretilebilirken, karmaşık mimari yapıları bile üretilebilir hale getirdiği için AM yöntemiyle 3D kabuk/plaka benzeri ağlar üretilebilir (Şekil 2.6) (Nikham & Akbarzadeh, 2020).

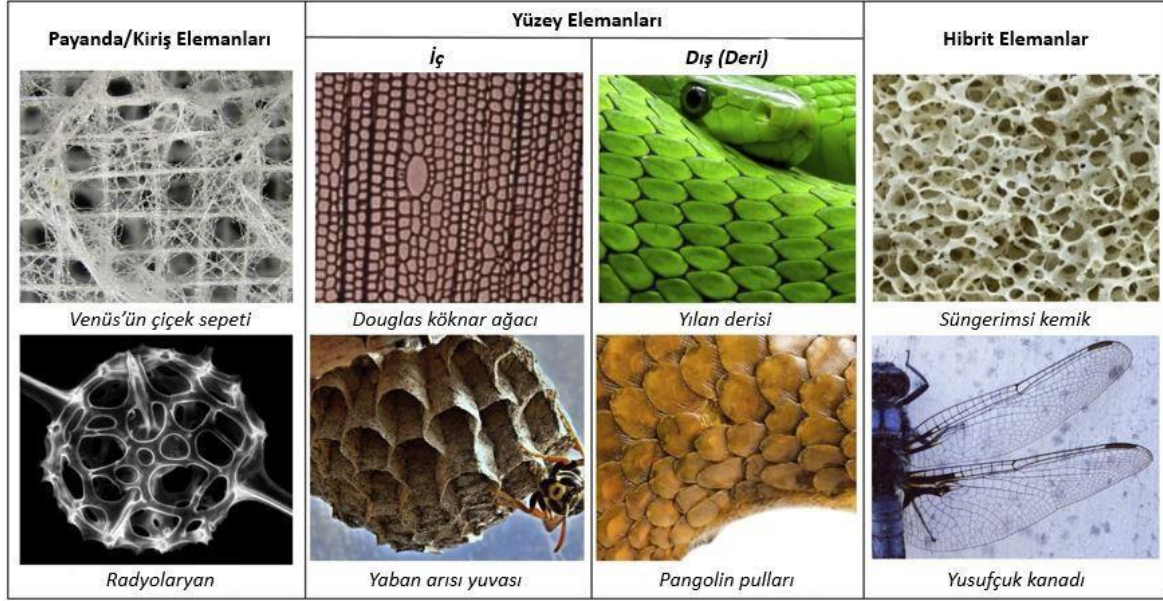


Resim 2.6. Elektron ışını eritme (EBM) ile üretilen periyodik kafes yapısına sahip sarmal dişli (Nguyen D. S., 2019)

2.4. Biyomimetik

Doğada bulunan güzellik ilham vericidir ve bu ilham, eklemeli üretimdeki (AM) son gelişmeler sayesinde yaygınlaşmıştır. Doğa, 3,8 milyar yıldan fazla bir süredir maruz kaldığı kısıtlamalar dahilinde belirli bir işlevi/işlevleri gerçekleştirmek için karmaşık yapıları optimize etmiştir. Bu biyolojik yapılardan ilham almak, mühendislik yapılarının daha verimli kullanılmasını sağlar. Çözümlerin sürdürülebilir olmasına da yardımcı olur. Biyomimikrinin genel bir tanımı, "doğadan ilham alan yenilik" veya "doğanın dehasının bilinçli öykünmesidir". Biyomimikrinin mühendislikte kullanımı, biyolojik yapıların, sistemlerin veya mekanizmaların incelenmesini ve mühendislik uygulamalarında doğadan gelen bilginin kullanımını içerir (du Plessis, ve diğerleri, 2019).

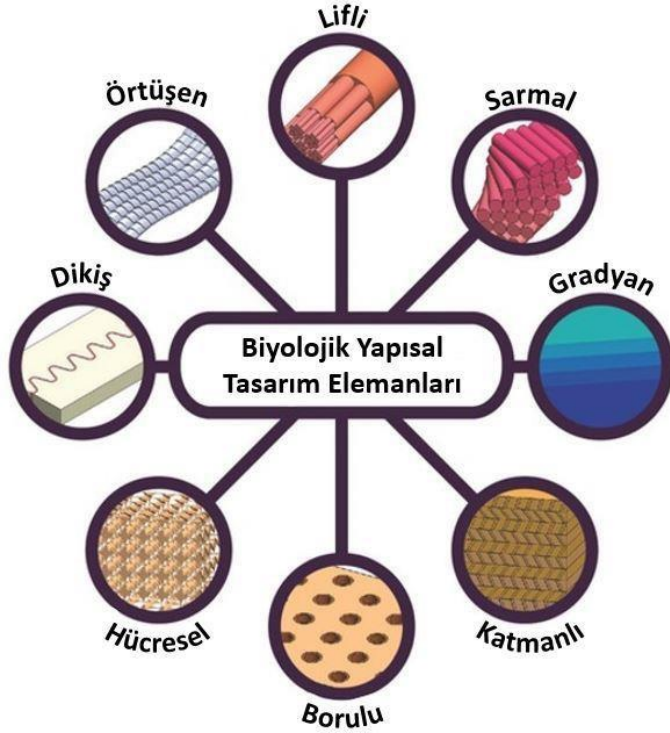
Doğada bulunan biyomalzemelerin mekanik özelliklerinin daha çok hücresel yapıları ile ilgili olduğu görülmektedir. Doğada oldukça yaygın olan bu yapılar, mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere çeşitli hücresel yapıların tasarımına ilham kaynağı olmaktadır. Bu mühendislik yapıları hafiftir ve daha az malzeme kullanır (Hoang, Tran, Vu, & Xuan, 2020). Doğadaki bitkiler ve hayvanlar, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve yüksek enerji absorpsiyon kapasitesine sahip birçok mükemmel yapıya sahip, dikkate değer enerji absorpsiyonuna sahip yapıların tasarımına ilham verir (Şekil 2.17) (Ha & Lu,, 2020).



Şekil 2.18. Doğada bulunan bazı doğal hücresel maddeler, oluştukları elementin türüne (kiriş veya yüzey) ve söz konusu formun içinde veya dışında oluşup oluşmadığına göre sınıflandırılır (du Plessis, ve diğerleri, 2019).

Son yıllarda, havacılık (Ha & Lu, 2020; du Plessis & Broeckhoven, 2019; Li, Liao, Dai, & Xie, 2020), ulaşım, nükleer reaktörler (Han, Hui, Tian, & Chen, 2021) ve inşaat mühendisliği (Sun, ve diğerleri, 2018) gibi birçok mühendislik alanında enerji absorpsiyon uygulaması için yüksek enerji absorpsiyon kapasitesine sahip hafif yapılara olan talep artmaktadır. Buna göre son yıllarda kolon yapıları, sandviç yapılar (du Plessis, ve diğerleri, 2021), levhalar, petek ve köpükler gibi farklı yapılara sahip birçok enerji soğurucu önerilmiştir (Ha, Lu, & Xiang, 2019).

Doğal yapılar genellikle birkaç tekrarlayan yapısal tasarım öğelerine dayanır. Bu biyolojik yapılar Şekil 2.19'da görüldüğü gibi lifli, sarmal, gradyan, katmanlı, tübüler, hücresel, sütür ve örtüşen olarak sıralanabilir. Doğada her biri farklı uzunluk skalasında olan bu yapısal birimler ve bunların arkasındaki prensipler şu şekilde sıralanabilir: çeşitli mühendislik uygulamalarında performansı artırmak için kullanılır (Sun, ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.19. Doğadan gelen yapısal tasarım öğeleri (Sun, ve diğerleri, 2018)

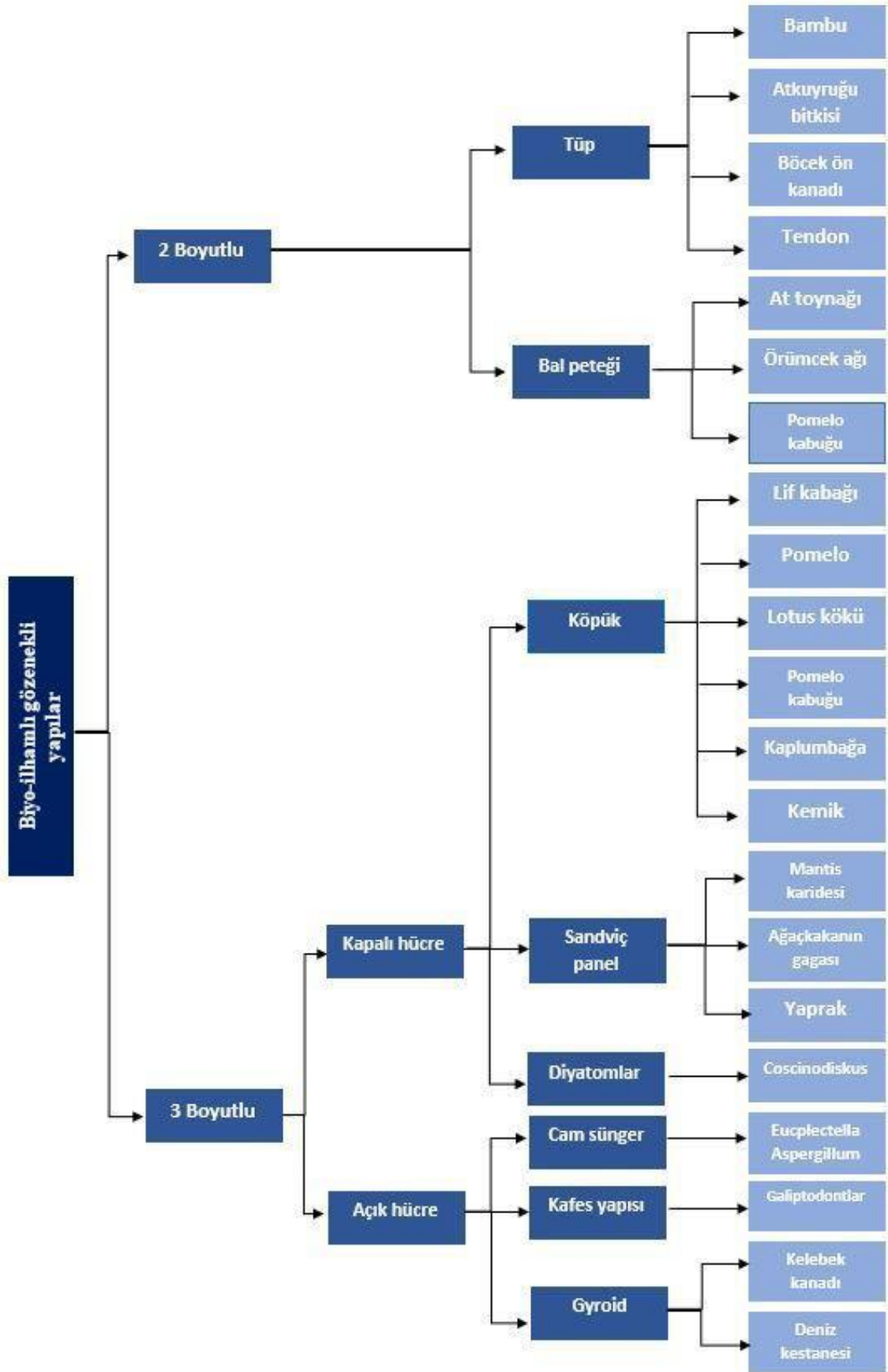
Biyomimikri terimi, AM'de ve genel olarak mühendislik terimlerinde çok sayıda anlamda kullanılmaktadır. Bu noktada biyomimikrinin bu alanla ilgili farklı biçimleri ve yaklaşımlarının açıklığa kavuşturulması ve birbirinden ayırt edilmesi önemlidir (du Plessis, ve diğerleri, 2019).

Genel olarak doğada bulunan bir şeye herhangi bir şekilde benzeyen yapılara "biyomimetik" veya "biyonik" denmesine rağmen, burada hiçbir biyolojik girdi bulunmadığına dikkat edilmelidir. Ayrıca bir yapının biyomimetik veya biyonik olarak adlandırılabilmesi için, belirli biyolojik rolünden yararlanarak bir uygulamada kullanılması gerekir. Topoloji optimizasyonu, üretken tasarım ve simülasyon tabanlı tasarım (mekanik) simülasyonu kullanarak optimize edilmiş tasarımlar oluşturur. Oluşan şekillerin genellikle karmaşık olduğu için doğada bulunan yapıları taklit edebilecekleri sonucuna varılabilir (du Plessis, ve diğerleri, 2019).

Biyomimetik ve biyo-ilhamlı malzeme tasarımına ilham veren yaklaşımı ile malzeme bilimi ve mühendisliği gibi çeşitli alanlarda çalışan bilim insanlarının ilgisini çekmektedir (du Plessis, ve diğerleri, 2019).

Doğa, şok emici kirpi dikenlerinden, özellikle gözenekli yapılar için birçok etkili çözüm sunar (Fernandes, ve diğerleri, 2021) trabeküler kemiğe (Helguero, ve diğerleri, 2017). Doğada bulunan diğer silisli iskelet türleri gibi, diatomlar ve deniz süngerleri (Libonati, Graziosi, Ballo, Mognato, & Giacomo, 2021), gözenekli hafif yapılardan ve farklı geometrik yapıların hiyerarşik bir düzenlemesinden kaynaklanan çok yüksek mukavemet gösterir (Yang, ve diğerleri, 2018).

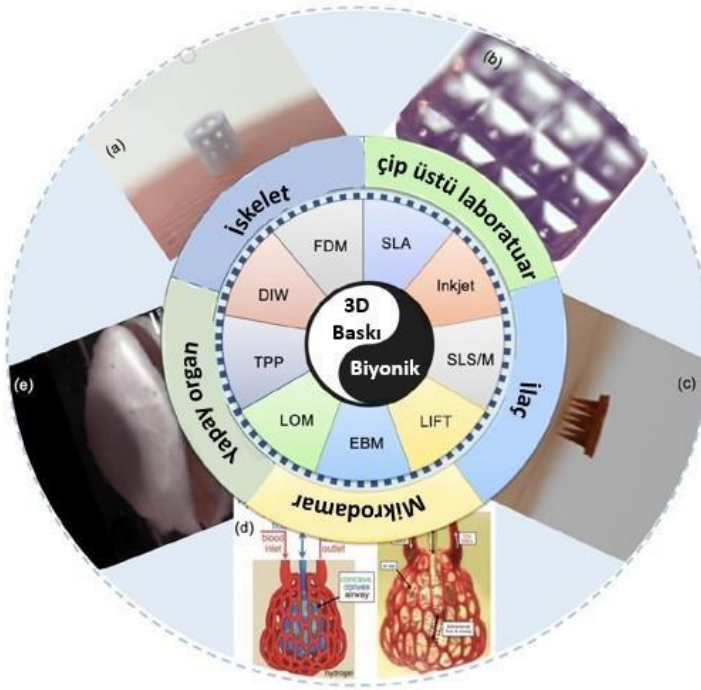
Şekil 2.20’de enerji emilimi yapan canlıların sınıflandırılması verilmiştir. Burada verilen canlıların yaşam koşulları ve maruz kaldığı yükler dikkate alınarak birçok mühendislik çalışması yapılabilir.



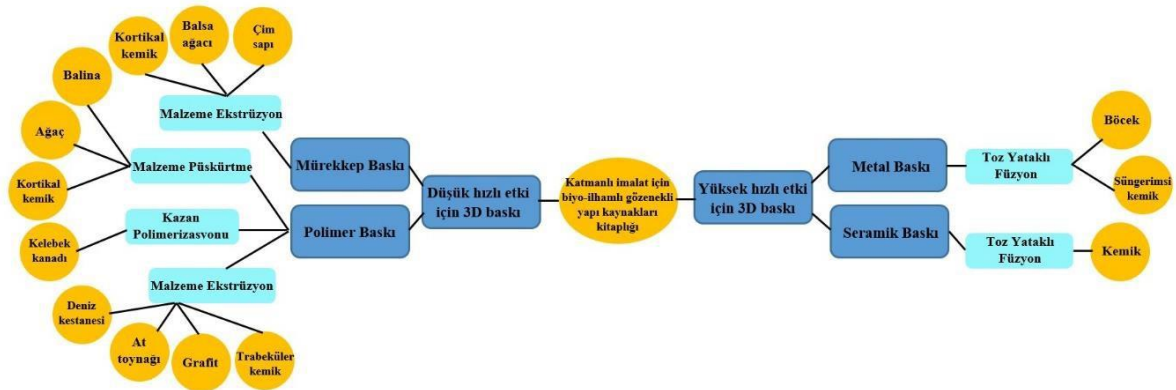
Şekil 2.20. Enerji emilimi için biyo-ilhamlı gözenekli yapıların sınıflandırılması (Siddique, Hazell, Wang, Escobedo, & Ameri, 2022)

2.4.1. mimetik yaklaşımı ile eklemeli imalat

Doğa, yaklaşık 3,8 milyon yıllık evrim boyunca yüksek performanslı malzemeler ve yapılar geliştirmiştir. Geliştirdiği bu mükemmel mekanik, hidrodinamik, optik ve elektriksel özelliklerin çeşitliliği göz önüne alındığında, yenilikçi yapı malzemelerinin tasarımına ilham kaynağı olması kaçınılmazdır. Biyomimikri, doğa ve tasarım ilkeleri kavramlarından öğrenmek, modern malzeme bilimi ve teknolojisindeki geleneksel değerlerin değişmesine yol açar. Bununla birlikte, doğadaki karmaşık yapılar, geleneksel tasarım ve üretim teknolojilerinin yeteneklerini aşarak biyomimetik çalışmaların ilerlemesini ve mühendislik uygulamalarında kullanılmasını engellemektedir. AM, doğası gereği çok ölçekli olan çok malzemeli ve çok işlevli yapıları taklit etmek için yeni fırsatlar yarattı (Şekil 2.20) (Zhu, ve diğerleri, 2021).



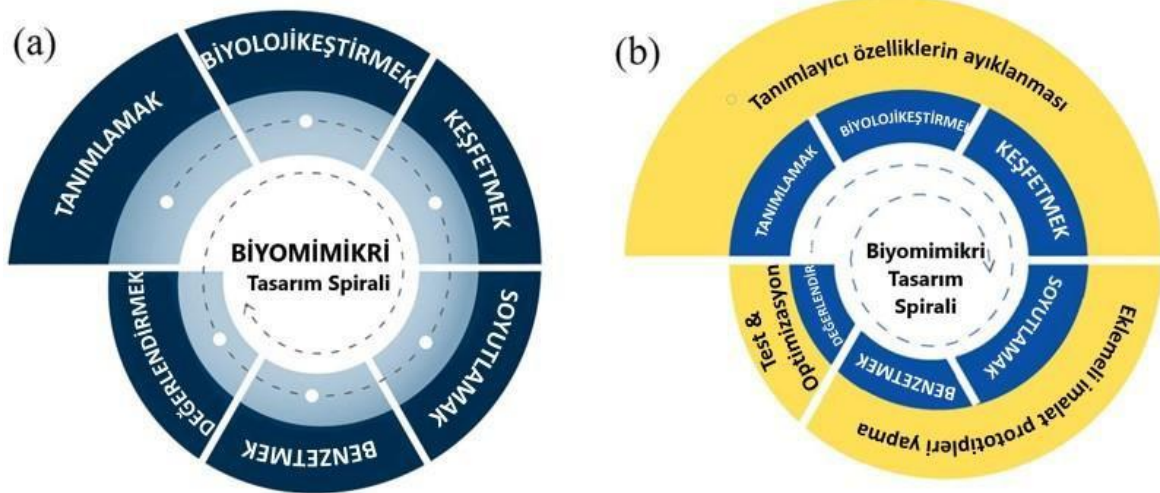
Şekil 2.21. Biyomedikal ve doku mühendisliğinde biyomimetik 3D baskının durumu (Islam, Hazell, Escobedo, & Wang, 2021)



Şekil 2.22. Darbe yükleme koşullarına göre 3D baskı türlerinin sınıflandırılması (Siddique, Hazell, Wang, Escobedo, & Ameri, 2022)

Biyomimetik tabanlı malzeme ve yapıların tasarımı, geleneksel üretim yöntemlerinin ve malzeme seçiminin sınırlamaları nedeniyle zordur. Ancak eklemeli imalat bu tasarımların üretimini desteklemektedir (Islam, Hazell, Escobedo, & Wang, 2021). AM teknolojileri doğada bulunan canlıların darbe yükleme koşullarına göre sınıflandırılmıştır (Şekil 2.22).

Biyomimikri, doğal yapıları taklit etmenin bir yolunu sunarken, AM, bu biyo-ilhamlı yapıları tasarlama ve üretme konusunda esneklik sunar. Şekil 2.23 (a)'da gösterilen biyomimikri tasarım sarmalı, biyo-ilhamlı bir yapı tasarlamak için altı adım belirleyen Carl Hastrich tarafından tanıtıldı (Wang, Chen, & Chen, 2020).



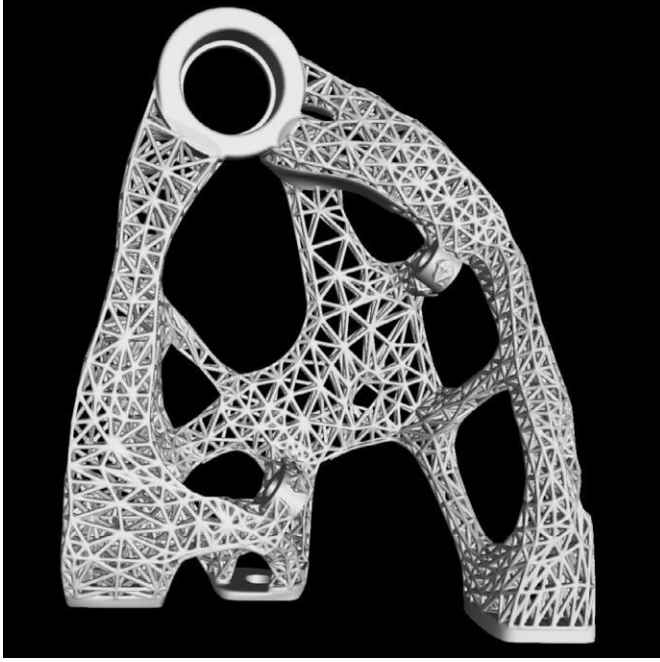
Şekil 2.23. (a) Biyomimikri tasarım sarmalı; (b) AM için değiştirilmiş biyomimikri tasarımı (Wang, Chen, & Chen, 2020)

1. Tanımla (Define): Koruma, savunma veya enerji emilimi gibi tasarımda gerekli olan işlevi tanımlamaktır.
2. Biyolojikleştirmek (Biologize): Tasarım çözümünü işleyecek işlevin biyolojik terimlerle aktarılmasını içerir.
3. Keşfet (Discover): 2. Adımdakiyle aynı veya benzer işleve sahip doğal kalıplar, stratejiler veya kalıplar vardır.
4. Özet (Abstract): Temel özelliklerin ve mekanizmaların incelendiği ve biyolojik stratejilerin tasarım stratejilerine dönüştürüldüğü soyut adımdır.
5. Öykünme (Emulate): Doğadan gelen temel bilgilerle bir tasarım konsepti geliştirilir.
6. Değerlendirin (Evaluate): Tasarım, uygulanabilir bir çözüm olarak kabul edilmesi için uygulanabilir tasarım kriterlerine ve kısıtlamalarına göre kontrol edilir.

Bu adımlar uygulanabilir bir çözümle sonuçlanmıyorsa biyomimikri tasarım sarmalındaki adımlar gözden geçirilmeli, gerekli iyileştirmeler yapılmalı ve optimum tasarıma ulaşılmalıdır. AM, biyomimetikte iki şekilde kullanılır. Birincisinde biyolojik yapıların maruz kaldıkları mekanik yüklere tepkilerini incelemek ve bu tepkiyi yöneten yapıları belirlemek için kullanılır. İkincisinde, biyo-ilhamlı tasarımlar üretmek için AM teknikleri uygulanır. AM için biyolojik bir yapının yönetim mekanizmalarını belirlemek ve anlamak için, biyomimikri tasarım sarmalının tanımlama, biyolojikleştirme ve keşif adımlarını incelemek gerekir (Şekil 2.23(b)). Aşamalar sonucunda ortaya çıkan tasarımların prototipleri üretilir ve test edilir. Test verilerine göre gerekirse optimizasyon veya iyileştirme yapılır ve bu süreç tasarım sarmalının değerlendirme aşaması ile birleştirilir. Optimize edilmiş bir ürün elde etmek için genel süreç tekrarlanabilir olmalıdır. Bu sürece yapay zeka yaklaşımının dahil edilmesi, otomatikleştirilmiş endüstriyel uygulamalar için AM geliştirme önünü açacaktır (Wang, Chen, & Chen, 2020).

Biyo-ilhamlı yapıların imalatındaki zorlukları çözmek için yaygın olarak kullanılan 3D baskı teknolojileri, diğer teknolojilerin yanı sıra, kaynaşmış biriktirme modelleme (FDM), doğrudan mürekkeple yazma (DIW), seçici lazer sinterleme (SLS), stereolitografi (SLA) içerir.), multijet baskı (MJP) ve seçici lazer eritme (SLM) (Yang, ve diğerleri, 2018).

Şekil 2.24'te topoloji optimizasyonu yapılmış biyonik tasarım örneği verilmiştir.



Şekil 2.24. Topoloji optimizasyonu uygulanmış ve kafes yaısı uygulanmış "biyonik" tasarım örneği (Yang, ve diğerleri, 2018).

2.5. Tork Bağlantısı

İniş takımı, bir uçağı yerde destekleyen ve yere yakın uçma (taxi), kalkış ve iniş yapmasını sağlayan yapı olarak tanımlanabilir (Şekil 2.25) (Thota, Krauskopt, & Lowenberg, 2008).

İniş takımı, iniş operasyonundan kaynaklı etkileri absorbe etmek ve aynı zamanda yere yakın uçmaktan durmaya veya tam tersi yer operasyonlarını gerçekleştirir. Bu nedenle hem statik hem de dinamik yüke maruz kalır. Ancak statik ve dinamik yükler birbirine bağlı olsa da, statik ve dinamik analiz, hesaplama kısıtlamaları sebebiyle birbirinden bağımsız olarak yapılır. Bu çalışmanın amaçları doğrultusunda yalnızca yapısal analiz gerçekleştirilmiş. İniş ekipmanları yalnızca tekerlekler olarak düşünülse de çok sayıda elemandan oluşmaktadır (Patil, Kumar, & Patel, 2019).

İniş takımı tasarımında belirlenmesi gereken iniş takımı parametreleri aşağıdaki gibidir:

1. Tip (ör. burun dişlisi (üç tekerlekli bisiklet), kuyruk dişlisi ve bisiklet)
2. Sabit (kaplamalı veya kaplamasız) veya geri çekilebilir, kısmen geri çekilebilir
3. Yükseklik
4. Tekerlek tabanı
5. Tekerlek izi

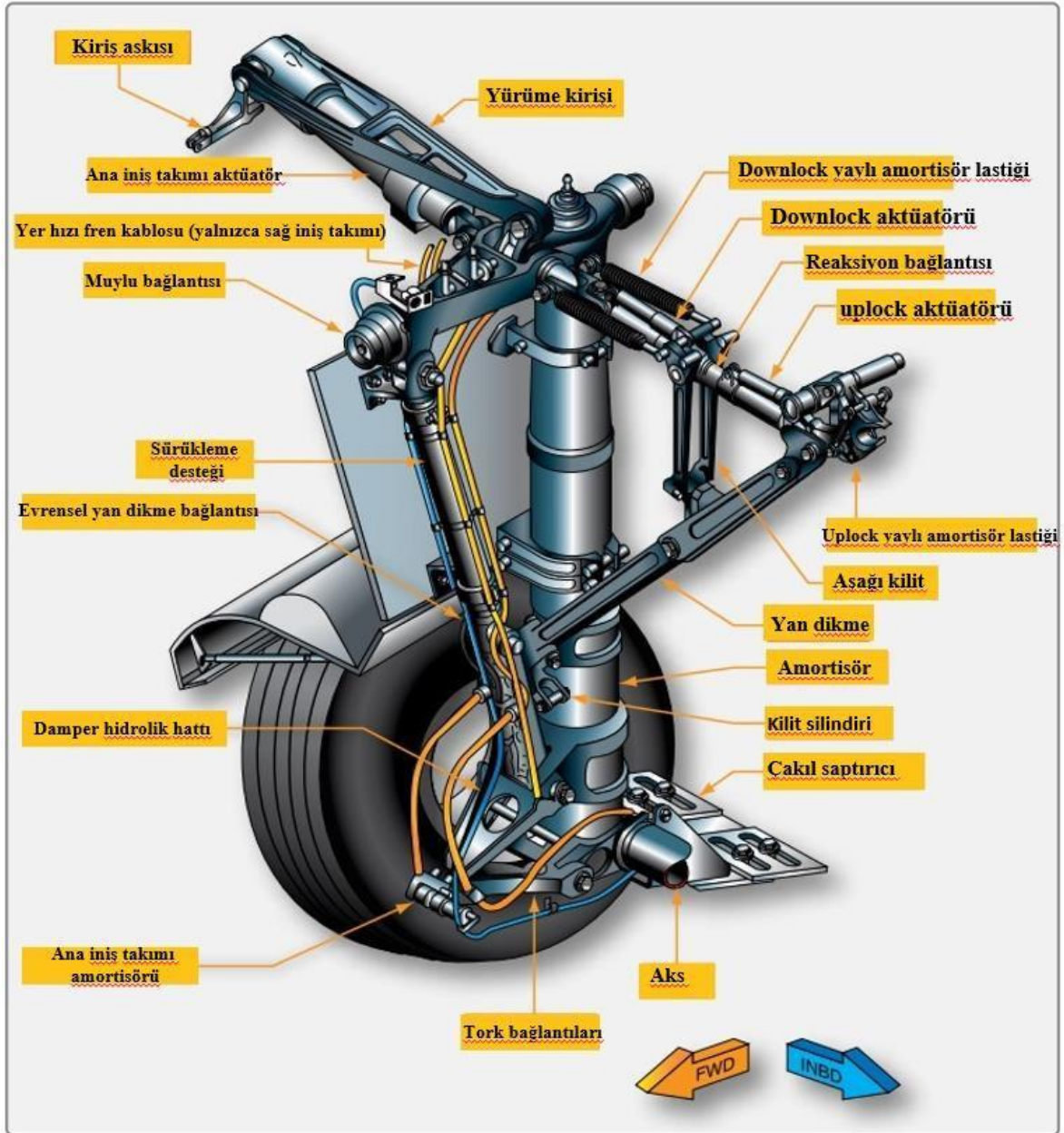
6. Ana dişli ile uçak ağırlık merkezi arasındaki mesafe
7. Strut çapı
8. Lastik ebatları (çap, genişlik)
9. Geri çekilmişse iniş takımı bölmesi
10. Her payandaya yük (Patil, Kumar, & Patel, 2019)

Uçak, motosiklet, arabalar ve römorklar gibi tekerlekli araçların hareketi sırasında yanal, istenmeyen salınımlar, güvenlik açısından zararlı etkileri ve araç bakımındaki maliyetler nedeniyle istenmeyen bir durumdur. Bu tür salınımlar genellikle shimmy salınımları olarak adlandırılır (Thota, Krauskopt, & Lowenberg, 2008).

Uçak, motosiklet, arabalar ve römorklar gibi tekerlekli araçların hareketi sırasında yanal, istenmeyen salınımlar, güvenlik açısından zararlı etkileri ve araç bakımındaki maliyetler nedeniyle istenmeyen bir durumdur. Bu tür salınımlar genellikle shimmy salınımları olarak adlandırılır (Thota, Krauskopt, & Lowenberg, 2008).

Uçaklarda özellikle uçuş sırasında iniş takımı sadece ölü ağırlıktır. Bu nedenle, uçağın performansını düşürmemek için kütlesi ve hacmi mümkün olduğunca küçük olmalıdır. İniş takımlarının kütlesi (tekerlekler ve lastikler dahil) genellikle uçak kütlesinin %6-10'u kadardır. Aynı zamanda uçağın aerodinamiğini olumsuz yönde etkilememelidir.

Bir sivil jet uçağı için, iniş sırasında yerdeki hızı 200 ila 300 km/s aralığındadır. İniş sırasında tekerleklerin hızlanması gerekir ve bu dönme olayı iniş takımı yapısında çok yüksek yüklere neden olur. İniş çarpması sırasında oluşan dikey yükler, gövdenin çeşitli bölümlerinin tasarımı için belirleyici olabilir (Patil, Kumar, & Patel, 2019).



Şekil 2.25. Çoğu ticari uçakta bulunan iniş takımı bileşenleri (Aircraft Landing Gear Systems, 2014)

İniş takımı birçok parçadan oluşmaktadır. Çoğu ticari uçakta bulunan iniş takımı bileşenleri Şekil 2.25'te verilmiştir. Bu çalışmada iniş takımının önemli bileşenlerinden biri olan tork bağlantısı ele alınmıştır.

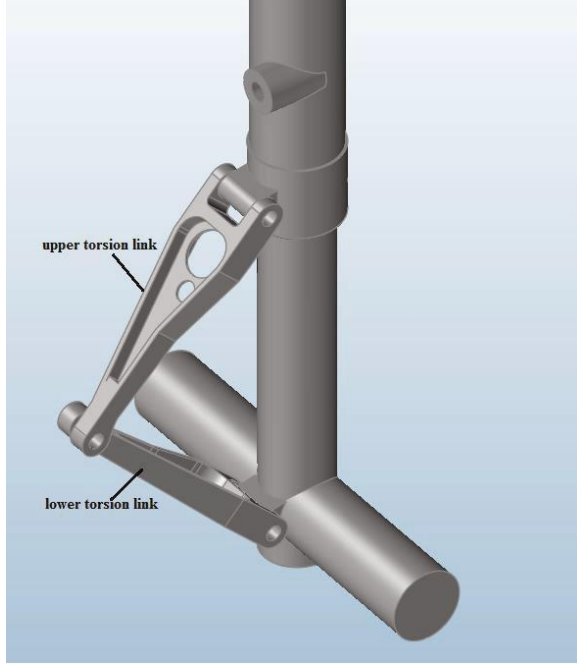
2.5.1. Tork bağlantısı ile ilgili çalışmalar

Tork bağlantıları, iniş sırasında daha fazla darbe yükleme gerektiren iniş takımının ana bileşenlerinden biridir (Arravind, Saravanan, & Rijuvan, 2013).

İniş takımı sistemi bir uçaktaki en önemli sistemlerden biridir. İniş takımının geri çekilmesi, sistemlerdeki bileşenlerin çok fazla kısıtlanmaması adına büyük bir özenle simüle edilir. Aynı derece önem verilmesi gereken diğer bir konu ise sistem üzerinde yüksüz durumda iken bir stres analizi yürütme gerekliliğidir. Dinamik bir sistem olduğu için yapılan stres analizleri, atalet gerilmelerinin tork bağlantısı üzerindeki etkisini gösterir. Diğer bir deyişle, bileşenlerin kendi ağırlığı strese neden olur. Bu nedenle geometri ve ağırlık ve buna bağlı olarak maksimum stresi azalma hedefi ile optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır (Krishnan, Thejus, & Arjun, 2017).

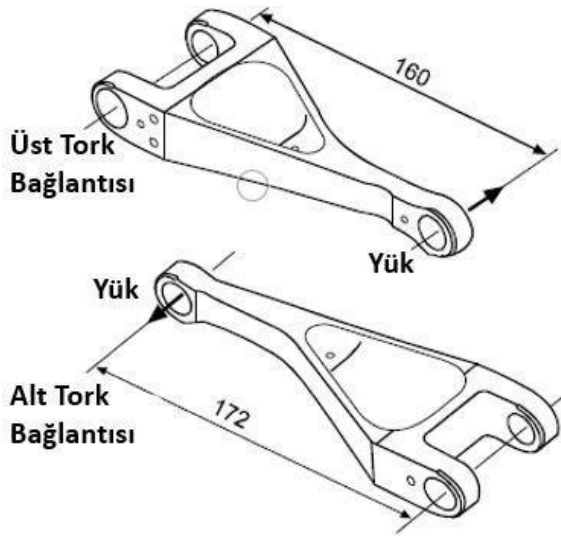
Tork bağlantıları, bir iniş takımı mekanizmasının iç ve dış silindirlerini birleştirir. Silindir ve piston bileşenleri arasında burulma veya bükülmeyi önler. Bu bileşenlerin bütünü, bir uçağın iniş ekipmanındaki shimmy titreşimlerini önlemek için gereklidir. Mekanizmanın hareketi ele alındığında, bir kiriş gibi davrandığı söylenebilir. Bileşenin bir ucundan verilen hareket, bir momente sebep olur (Krishnan, Thejus, & Arjun, 2017).

Bu yalpalama hareketine verilebilecek en iyi örnek, tekerleklerin düz hareket etmediği ve sürekli yön değiştirdiği bir alışveriş arabasıdır. Tork bağlantısı, darbe desteğinin dikey hareketini engellemez. Tork bağlantısı, bir V şekli oluşturan V şeklinin ortasında bir menteşe ile birbirine bağlanan iki özdeş parçadan oluşmaktadır (Şekil 2.26). Bu özdeş parçalardan dış silindire bağlı olana üst tork bağlantısı ve iç silindire bağlı olana alt tork bağlantısı denir. Menteşeye, her iki tork bağlantısındaki iniş titreşimlerini azaltan bir tork bağlantısı şok emicisi bağlanır (Deokar & Kale, 2012).



Şekil 2.26. Tork bağlantısı sistemi (Krishnan, Thejus, & Arjun, 2017)

İniş takımı sırasındaki kuvvetler hesaplandığında bazı değerler bilinmemekte ve bulunamamaktadır. Bu nedenle, iniş takımı üzerindeki kuvvetleri tanımlamak için varsayımlar yapılmalıdır (Deokar & Kale, 2012).

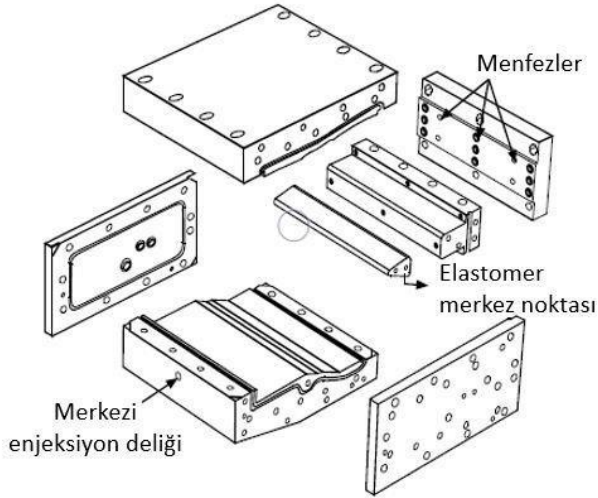


Şekil 2.27. Referans alınan tork bağlantısının ölçüleri (Thuis, 2004)

Şekil 2.27’de görüldüğü NH-90 helikopterin tork bağlantısının ölçüleri gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında tork bağlantısı tasarımında bu çalışmadaki ölçüler referans alınarak modelleme yapılmıştır (Thuis, 2004).

Kompozit tork bağlantılarının imalatı

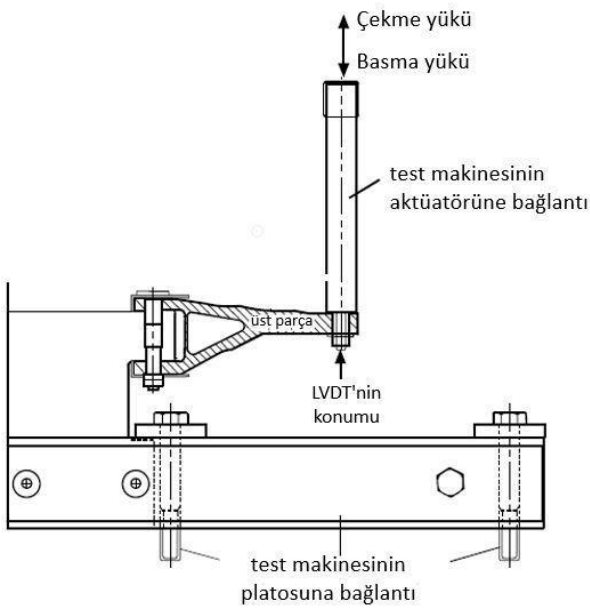
Kompozit tork bağlantıları reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi ile üretilmektedir. Kullanılan kalıbın patlatılmış görünümü Şekil 2.28’de gösterilmiştir (Thuis, 2004).



Şekil 2.28. Reçine transfer kalıplamada kullanılan kalıplar (Thuis, 2004)

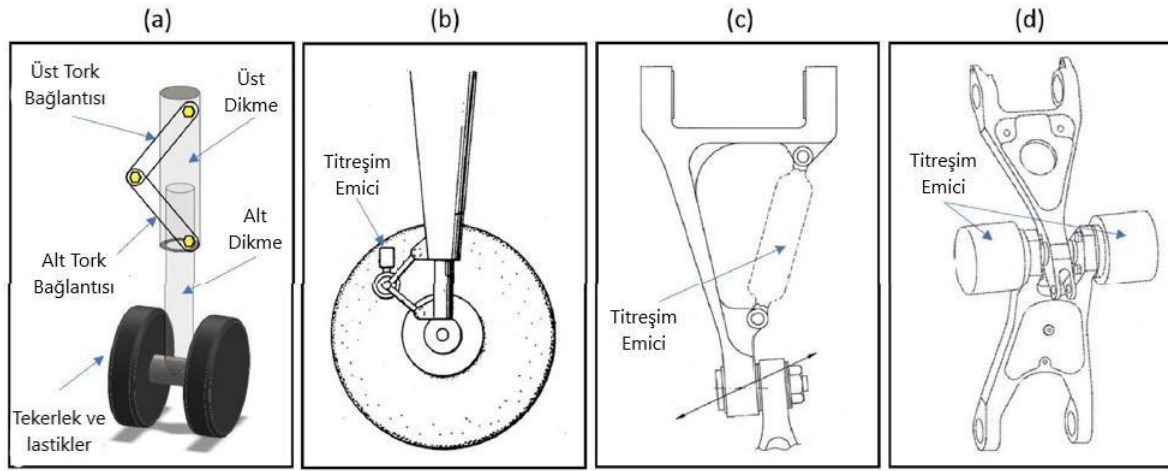
Kompozit tork bağlantılarının test edilmesi

Tork bağlantısı Şekil 2.29’da gösterildiği şekilde test edilmektedir.



Şekil 2.29. Tork bağlantısının test edilmesi (Thuis, 2004)

Bu çalışmada tork bağlantısının üretimin geleneksel yöntemler yerine eklemeli imalat yöntemleri ile üretilecek şekilde tasarlanmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluşan bir sistemdir. Bu sisteme aynı zamanda bir titreşim emici bağlıdır. İniş takımlarına gelen yük bu şekilde sönmölenir. Bu çalışmada tork bağlantısı sisteminin üst tork bağlantısı parçası tasarlanmıştır. Üst tork bağlantısının modellenmesinde NH-90 helikopterin ölçüleri referans kullanılmıştır.



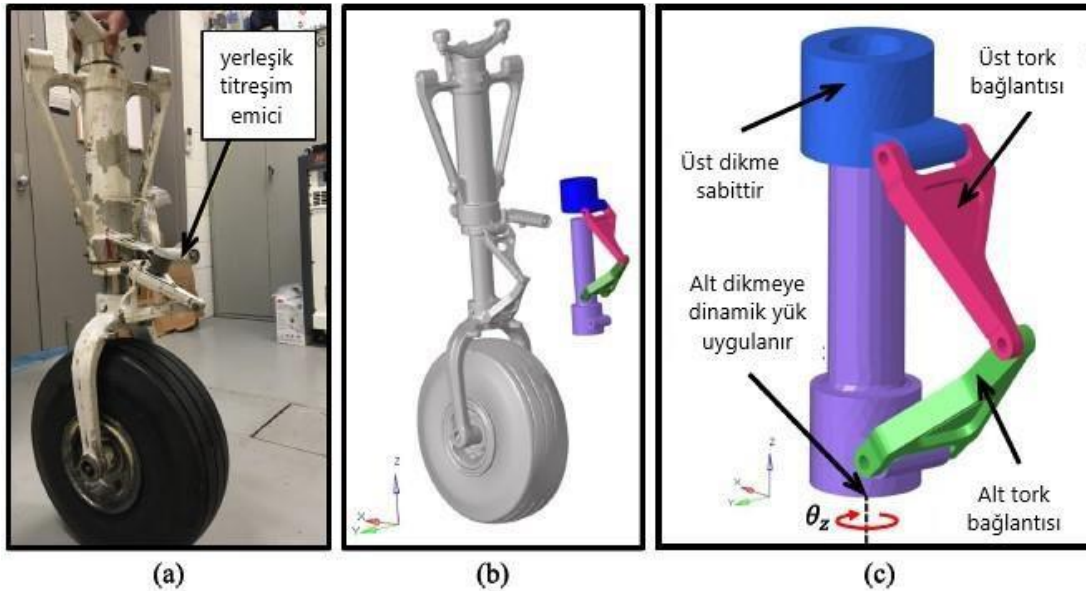
Şekil 2.30. NLG (a), Boeing (b), UTAS (c) SAFRAN (d) şimsi amortisörlerin şemaları (Arravind, Saravanan, & Rijuvan, 2013)

Rahmani ve Behdinin tork bağlantısının parametrelerinin etkisini ve titreşimlerin yalpalama haritaları araştırmıştır. Yalpalama haritalarını oluşturmak için iniş takımlarının doğrusal olmayan çok gövdeli dinamik modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada tork bağlantısının yalpalama (shimmy) hareketi ve bu titreşimli sönümleyicilerin analizi incelenmiştir (Şekil 2.30) (Rahmani & Behdinin, Parametric study of a novel nose landing gear shimmy, 2019).

Arravind, Saravanan ve Rijuvan nakliye uçağı iniş takımı uygulamaları için tork bağlantısı geliştirmiştir. Tork bağlantısı, sonlu elemanlar analizi ile maksimum gerilim koşullarına göre tasarlanmıştır. Bu çalışmada tork bağlantısı Catia V5 R20 programında modellenmiş ve ANSYS yazılımında analiz yapılmıştır. Tork bağlantısına 100 N kuvvet uygulanmıştır. Analizde malzeme olarak yapısal çelik, kevlar ve karbon fiber malzeme kullanılmıştır ve karşılaştırılmıştır. Parçanın ağırlığı kullanılan malzeme ile hafifletilmeye çalışılmıştır (Arravind, Saravanan, & Rijuvan, 2013).

Krishnan, Thejus ve Arjun, tork bağlantısı üzerindeki gerilme ve delik geometrisini ve delik modellerini değiştirmenin tork bağlantısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışma üst tork bağlantısı seçilerek analiz yapılmıştır. Flanşlara yakın uçlarda üst tork bağlantısının üst yüzeyinde maksimum eğilme gerilmelerinin olduğu görülmektedir. Analiz programı olarak MotionView ve HyerMesh kullanılmıştır. Delik konumları ve geometrileri değiştirilerek gerilmeleri azalmak hedeflenmiştir. Deliklerin birbirine yakın olması halinde gerilmelerin arttığı görülmüştür (Krishnan, Thejus, & Arjun, 2017).

Wong, Ryan, VE Kim, hem yapısal hem de dinamik davranışları göz önünde bulundurarak ağırlık, maliyet ve yapısal performans için çok disiplinli tasarım optimizasyon teknikleri uygulayan bir metodoloji uygulamıştır. Safran Landing Systems'den temin edilen çizimleri referans alarak basit bir iniş takımı montaj modeli oluşturmuştur. Sonrasında da sistemin dinamik davranışını anlamak için çok gövdeli dinamik gerçekleştirilmiştir. Sonrasında analizden elde edilen sonuçlarla topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve son olarak oluşturulan iki tasarım yorumlanmıştır. İlk tasarımda, ağırlık %67'lik bir tasarruf elde edilirken %74'lük gerilim artışı meydana geldiği görülmüştür. Karmaşık özellikler sebebiyle maliyet tasarrufu sağlanamamıştır. İkinci tasarımda, üretilebilirliğe odaklanarak toplam ağırlık %36 oranında azalırken, gerilimde %6'lık bir artış görülmüştür. Aynı zamanda da %60'lık bir maliyet tasarrufu sağlanmıştır (Wong, Ryan, & Kim, 2018).



Şekil 2.31. (a) NLG of Piper Cheyenne II XL, dahili şimsi sönümleyici, (b) NLG'nin 3D taranmış geometrisi ve (c) bundan oluşturulan CAD modeli (Rahmani & Behdian, 2020)

Rahmani ve Behdinan, yaptığı çalışmada iniş takımları için yeni bir shimmy sönümleyici yapısl optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Oluşturkları yeni tasarım, simetrik yük dağılımına sahiptir ve mevcut iniş takımlarına uyarlanabileceği vurgulanmıştır. Bu çalışmada Piper Cheyenne uçağının iniş takımları optimize edilmiştir (Şekil 2.31). Analiz ve tasarım prosedürlerinde dinamik yükler kullanılır. Eşdeğer statik yük yöntemi kullanılarak, kısıtlamaları karşılayan optimum malzeme dağılımını elde etmek için geçici yüklerle topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Nihai tasarımı belirlemek adına sonlu elemanlar analizine dayalı dinamik analiz yapılmıştır. Dinamik tork yükleri altında, topoloji optimizasyonunun yönlendirdiği çoklu tasarım yinelemeleri yoluyla üç parçalı bir tork bağlantı mekanizması ortaya çıktığı görülmüştür (Rahmani & Behdinan, 2020).

3. TORK BAĞLANTISI TASARIMI

Bu başlık altında tork bağlantısının birim hücre tasarımı gerçekleştirilmiş ve birim hücrenin tasarımında ilham alınan Venüs'ün çiçek sepeti canlısının hiyerarşik yapısı incelenmiştir. Biyomimetik tabanlı olarak oluşturulan birim hücre tork bağlantısına uygulanmıştır.

3.1. Birim Hücre Tasarımı

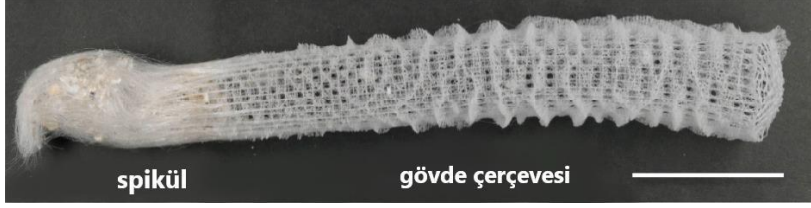
Topoloji optimizasyonu kapsamında kafes yapısı oluşturma çalışmalarında, öncelikle kafes yapılarının en küçük elementi olan birim hücre tasarlanmalıdır. Daha sonra, tasarlanan hücre birimin periyodik bir şekilde artarak yan yana gelmesiyle tasarımı gerçekleştirilen parçayı oluşturmaya gerekir.

Bu tez çalışmasında mevcut CAD programlarında bulunan kafes yapıları kullanılmak yerine biyomimetik tabanlı bir kafes yapısı oluşturulmuştur. Bu nedenle ilham alınan canlının maruz kaldığı kuvvetlere karşı dayanıklılığı sağlayan yapılar incelenmiştir. İncelemeler neticesinde canlının sahip olduğu hiyerarşik yapıdan ilham alınarak birim hücre tasarlanmıştır.

Tasarlanan birim hücre periyodik olarak artırılarak biyo-ilhamlı kafes yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra, üst tork bağlantısı üzerine gelen yükler referans alınarak biyomimetik tabanlı kafes yapısının yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizi tamamlanan kafes yapısı 3B yazıcı teknolojileri yardımı ile üretilmiştir.

3.1.1. Venüs'ün Çiçek Sepeti (Venus's flower basket, *Euplectella aspergillum*)

Bu çalışmada kafes yapısı, Venüs'ün çiçek sepeti olarak da bilinen, Pasifik Okyanusu'nun derin sularında (450-900 m) bulunan bir deniz süngerisi olan *Euplectella aspergillum* gözenekli yapısının iskeletinden türetilmiştir. Silindirik iskeletin yüzeyi, bir dizi dikey ve yatay silika dikme ile düzenli bir kare kafesten oluşur. Her bir silika payanda, ömrü boyunca, gevşek bir şekilde bağlanmış spiküllerden oluşan kolayca deforme olabilen bir fazdan, çeşitli aşamalarından geçerek sonunda rijit spikül demetlerinden oluşur (Resim 3.1) (Sharma & Hiremath, 2022).



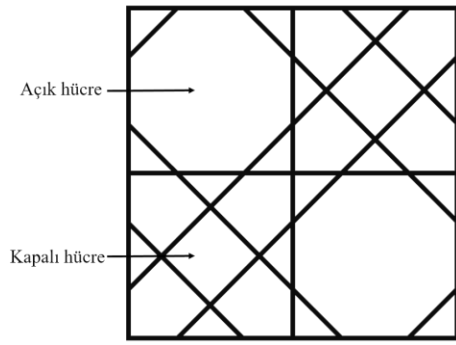
Resim 3.1. *Euplectella aspergillum*'un iskeletinin fotoğrafı. Ölçek çubuğu 5 cm'dir. (Arasuna, ve diğerleri, 2018)

Payandalar, birbirini takip eden bir dizi açık ve kapalı hücre oluşturacak şekilde birbirine bağlanan bir dizi diyagonal elemanla birleştirilir. Diyagonal payandaların görevi, denizin derinliklerinde bulunan yüksek basınç altında süngerin burkulmasını önlemek ve deniz suyunun süngerin bir ucundan diğer ucuna akması sırasında oluşan girdapların neden olduğu titreşimleri emmeye yardımcı olmaktır.

Deniz süngerleri sınıflarından demospongiae ve hexactinellida, biyomineralize silisli bileşene sahiptir. Hexactinellida sınıfındaki süngerler genelde cam süngerler olarak adlandırılır. İskeletleri hidratlı amorf silikadan oluşan bu süngerler, herhangi bir okyanusta yaşayabilir (Arasuna, ve diğerleri, 2018).

Hekzatinellid süngerlerden biri olan *Euplectella aspergillum* diğer adıyla Venüs'ün çiçek sepeti mineralize iskelet sistemi, hiyerarşik yapısı ve mekanik sağlamlığı nedeniyle mühendislik ve malzeme bilimi alanında oldukça ilgi görmektedir (Fernandes, Aizenberg, Weaver, & Bertoldi, 2021).

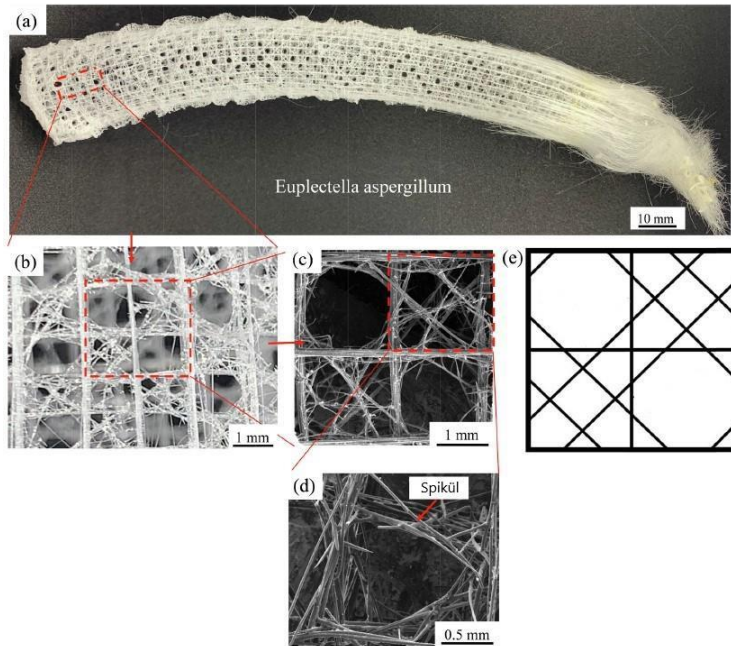
Cam süngerler, silindirik gövde çerçevelerinin altından büyüyor gibi görünen, spikül adı verilen silisli lifli kök benzeri yapılara sahiptir. Bu yapılar süngerin deniz tabanındaki yumuşak tortuya tutunması sağlar (Arasuna, ve diğerleri, 2018).



Şekil 3.1. *Eucplectella aspergillum*'un açık ve kapalı hücreleri

Spiküller ayrıca, birbirini kesen iki çift diyagonal payanda (strut) ile güçlendirilmiş, açık ve kapalı hücrelerden oluşan dama tahtasını andıran, düzenli bir kare ızgara oluşturacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 3.1) (Fernandes, Aizenberg, Weaver, & Bertoldi, 2021).

Bu karmaşık biyomineralize yapının son zamanlarda en az altı hiyerarşi seviyesi üzerinde yapılandırıldığı bulundu (Woesz, ve diğerleri, 2006)



Resim 3.2. (a) *Eucplectella aspergillum*'un fotoğrafik görünümü (ölçek: 10 mm), (b) açık ve kapalı hücrelerin modellerini gösteren yakınlaştırılmış görünüm (ölçek: 1 mm), (c) açık ve kapalı hücreleri gösteren HRSEM görüntüsü (ölçek: 1 mm), (d) HRSEM görüntüsü, desteklerin spiküllerden yapıldığını gösterir (ölçek: 0,5 mm) ve (e) 2B tasarım (Sharma & Hiremath, 2022).

E. aspergillum'un iskelet sisteminde bulunan ızgara benzeri açık hücre kafesleri, düşük ağırlıkları, yüksek enerji soğurmaları ve akustik ve termal dalgaların yayılmasını kontrol etme yetenekleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tür geometrilerin özellikleri ve işlevselliği genellikle düğüm bağlantıları tarafından belirlenir. Örnek verilecek olursa, iki boyutlu kafeslerin esneme ağırlıklı olması için altı minimum düğüm bağlantısı gerekir, böylece yapısal uygulamalar için daha yüksek bir güç-ağırlık oranı elde edilir (Fernandes, Aizenberg, Weaver, & Bertoldi, 2021).

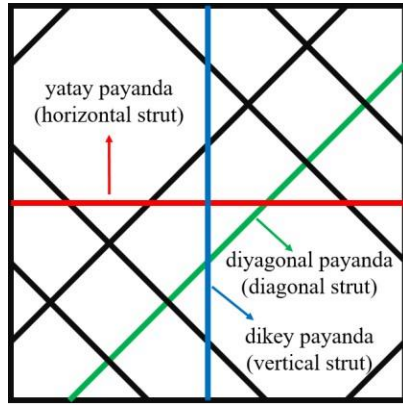
Bunun aksine, basit kare geometrilere sahip kafesler (dört düğüm bağlantısı ile), yükleme vektörünün enine bir bileşeni olduğunda kararsızdır (bükülme baskındır ve tek kesme direnci eklemlerden kaynaklanır) ve tipik olarak stabilizasyon için çapraz destek gerektirir (Resim 3.4) (Fernandes, Aizenberg, Weaver, & Bertoldi, 2021).

Spiküllerin doğal kesitleri homojendir aynı zamanda yapısal sınırları yoktur ve genellikle 5–15 cm uzunluğunda ve 40–70 μm çapındadır. Spiküller stres veya aşındırma altında, üç ayrı bölge olarak görünen, karakteristik bir katmanlı morfoloji ve enine kesitsel varyasyonlar ortaya çıkarır. Bunlar organik lif; üçünün en büyük organik içeriğine sahip merkezi bir silindir, giderek azalan organik içeriğe sahip olan ve organik filmlerle birbirine yapııştırılmış çizgili bir kabuk olarak sıralanabilir (Sundar, Yablon, Grazul, Ilan, & Aizenberg, 2003).

Euplectella aspergillum, iskeletini belirli türleri hapsedecek şekilde oluşturduğu için popüler bir camsı süngerdir. Mekanik özellikler açısından, sırasıyla 850 MPa ve %2,5'luk daha iyi eğilme mukavemetine ve gerilmeye sahiptirler. Resim 3.2 tipik bir EA süngerinin iskeletini ve mikro yapısını göstermektedir. EA'nın iskelet sistemi, simetrik boş alana sahip gözenekli bir mimariye sahiptir. EA süngerlerinin iskeletini oluşturan küçük silika seramik liflerinden ve organik bileşenlerden oluşur. İnce lifler, spicule olarak bilinen eşmerkezli silindirler şeklinde katmanlı bir tasarıma sahiptir (Siddique, Hazell, Wang, Escobedo, & Ameri, 2022).

Araştırmacılar spikül tabakalarının amorf silikadan (SiO_2) oluştuğunu keşfettiler. Bu silis tabakaları arasında proteinler veya kollajen gibi organik maddeler bulunur. Bu katmanlı yapılar, temel tokluk, güç ve eğilme modülü için katkıda bulunan faktördür. Bu tip süngerlerin lamine yapısı çatlak ilerlemesini engelleyebilmektedir. Bir çatlak başlarsa, bir sonraki sonraki katmana ilerleyemez, böylece kırılğan malzemelerin ileri derecede bozulması önlenir (Siddique, Hazell, Wang, Escobedo, & Ameri, 2022).

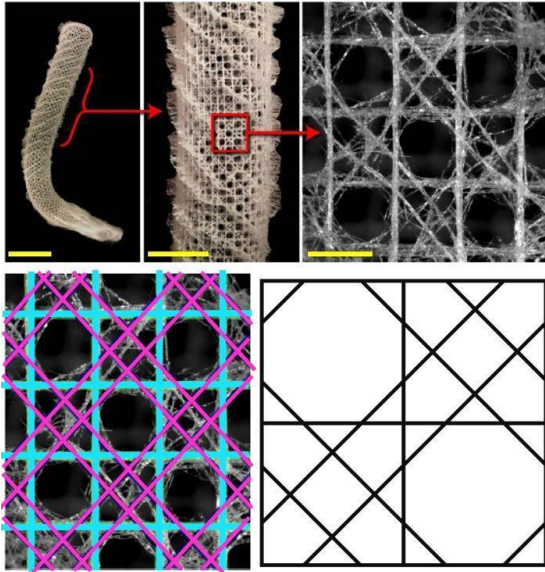
Tavangarian, Sadeghzad, & Davami, 2021, gözenekli EA süngerinin dikenli yapısını taklit ederek mekanik özelliklerini iyileştirmek için yeni bir yapı geliştirmiştir. Yeni tasarlanan model 3D yazıcı kullanılarak farklı çaplarda silindirler üretilerek iç içe yerleştirilmiştir. Numuneler, 160 mm açıklığa ve 200 mm/dk çaprazkafa deformasyon hızına sahip 3 noktalı bir eğme test makinesinde sabitlenmiştir. Yeni geliştirilen iç içe silindir yapısının eğilme mukavemeti, gerinme ve tokluk değerlerinin önemli mekanik gelişmeler gösterdiği görülmüştür. SEM gözlemlerine göre, 0.8 mm'lik bir silindirik duvar kalınlığına sahip olarak test edildiğinde numunelerin toklaşmasında çatlak dallanması, çatlak köprüleme ve çatlak sapması baskın mekanizmalar olmuştur (Siddique, Hazell, Wang, Escobedo, & Ameri, 2022).



Resim 3.3. E. Aspergillumun hiyerarşik yapısını oluşturan yatay, dikey ve çapraz payandaların gösterimi

Yatay, dikey ve çapraz desteklerin kombinasyonu, optimuma yakın bir payanda tabanlı tasarımla sonuçlanır. Bu nedenle, bu çalışmada, tasarlanan payanda tabanlı tasarımın statik basınç yükü altındaki dayanımı değerlendirilmeye çalışılmıştır (Resim 3.3).

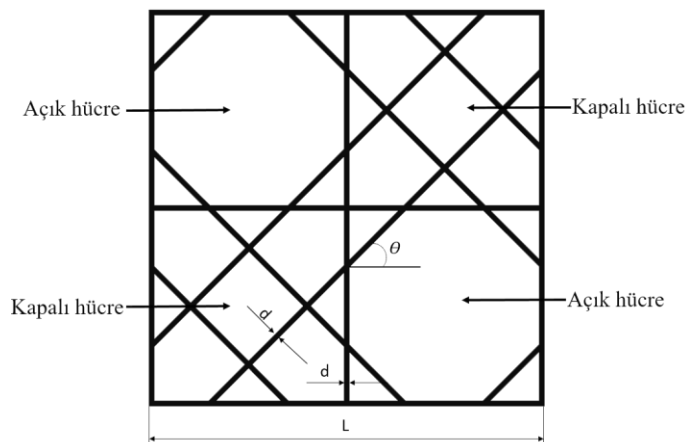
Bu çalışmada EA süngerinin gövdesinin yakınlştırılmış görüntüsünden faydalanılarak 2B temel görüntü oluşturulmuştur.



Resim 3.4. EA süngerinin gövdesinin yakınlaştırılmış görüntüsünden temel kafes görünümünün elde edilmesi (Fernandes, Aizenberg, Weaver, & Bertoldi, 2021)

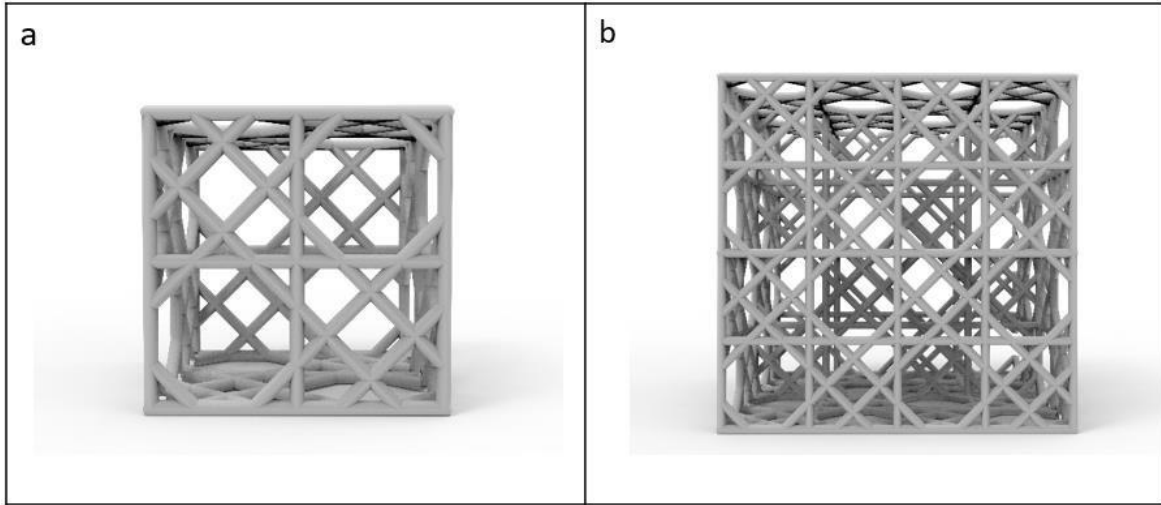
3.2. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Oluşturulması

Bir önceki başlıktaki bilgiler dikkate alınarak temel kafes görüntüsü çıkarılmıştır (Resim 3.5).



Resim 3.5. Birim hücrenin 2B görünümü

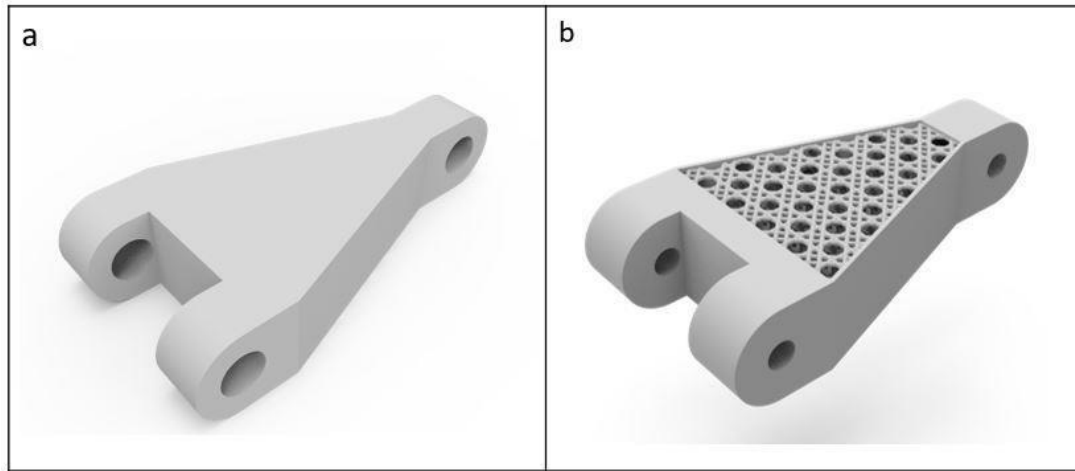
Resim 3.6(a)'da tasarlanan birim hücre ve 3.6 (b)'de ise periyeodik olarak çoğaltılan kafes yapısı verilmiştir.



Resim 3.6. a) birim hücre, b) periyodik olarak çoğaltılmış kafes yapısı

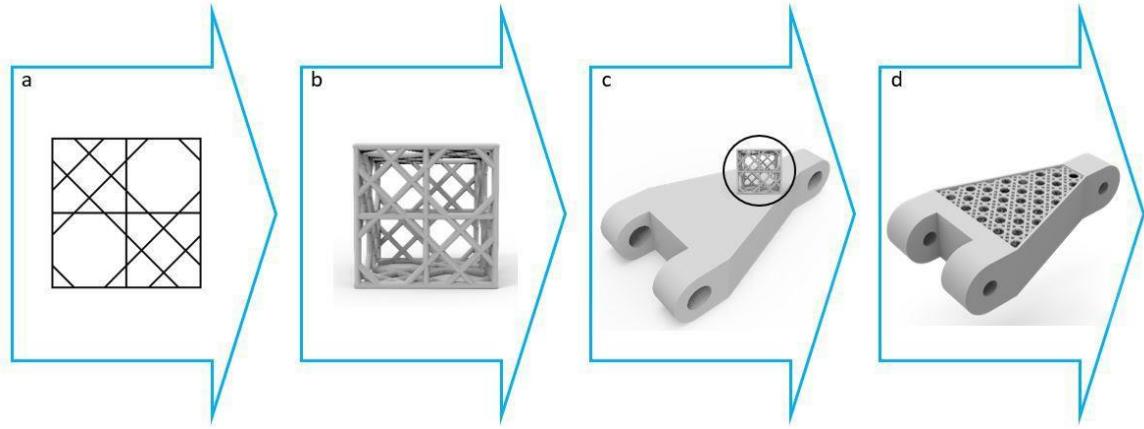
3.3. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Üst Tork Bağlantısına Uygulanması

Modellemesi yapılan birim hücre, bu çalışmada daha önce de bahsedilen üst tork bağlantısına uygulanmıştır. Modelleme yapılırken önce mevcut üst tork bağlantısının ölçüleri dikkate alınmıştır. Resim 3.7(a)' da orijinal tork bağlantısı, Resim 3.7(b)'de optimize edilmiş tork bağlantısı görülmektedir.



Resim 3.7. a) orijinal üst tork bağlantısı, b) optimize edilmiş üst tork bağlantısı

Kafes yapıları oluşturularak topoloji optimizasyonun gerçekleştirilme süreci Resim 3.8'de özetlenmiştir.



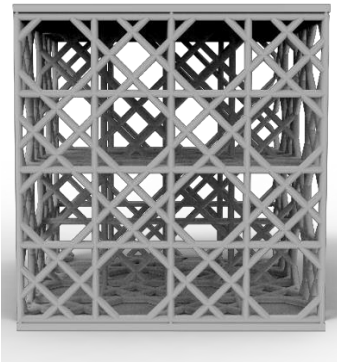
Resim 3.8. a) 2B temel görünüm oluşturulması, b) Birim hücre modellenmesi, c) Oluşturulan kafes yapısı mevcut tork bağlantısına uygulanması, d) Topolojik optmimizasyonu gerçekleştirilmiş model

4. KAFES YAPISININ YAPISAL ANALİZ SÜRECİ

Bu başlık altında, tasarlanan biyomimetik tabanlı kafes yapısı modeli üzerinde ANSYS Workbench programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi (SEA) gerçekleştirilmiştir. İniş sırasında iniş takımlarında oluşan “shimmy” titreşimlerinden kaynaklanan deformasyon ve gerilmeler incelenmiştir. Bu başlık altında birim biyo-ilhamlı kafes yapısının statik ve dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Birim bazında yapılan bu analizin amacı elde edilen sonuçların başka çalışmalarda kullanılması için fikir oluşturmastır. Ayrıca birim bazında tasarım değişikliği gerçekleştirilerek gerçekleştirilen analiz ile biyo-ilhamlı kafes yapısının birim olarak

4.2. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Sonlu Elemanlar Analizi (SEA)

Rhinoceros programında tasarlanan 3B kafes modele uygulanacak yükün, modele eşit bir şekilde uygulanabilmesi için kafes modelinin üst ve alt kısmına 1 mm kalınlığında plaka eklenmiştir. Oluşturulan model, ANSYS analiz programında Static Structural>Model kısmına .step uzantısı ile aktarılmıştır. ANSYS programına analiz için aktarılan model Resim 4.1’ de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Statik analizi gerçekleştirilecek olan model

Model aktarıldıktan sonra analizi yapılacak modelin malzemesi tanımlanmalıdır. Sonrasında da mesh uygulanması ve sınır şartlarının belirlenmesi ile devam edilmelidir. Bu çalışmada odak noktası biyomimetik tabanlı kafes yapısı olduğu için piyasada üst tork bağlantısında kullanılan titanyum alaşımı (Ti6Al4V) modele tanımlanmıştır. Titanyum alaşımının malzeme özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Titanyum alaşımları Ti-6Al-4V, alüminyum alaşımlarından daha yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek modül, düşük termal genleşme katsayısı ve daha yüksek çalışma sıcaklığının mükemmel bir kombinasyonunu sağladığı için uzay aracı yapıları için çekici, hafif bir malzemedir (Rawal, Brantley, & Karabudak, 2013). Arravind ve diğerleri, 2013 yaptığı çalışmada tork bağlantısının alaşımlar kullanıldığından bahsetmiştir. Prasad, 2020 ise çalışmasında farklı alaşımları kullanarak iniş takımlarının analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada Ti6Al4V alaşımı da analiz edilmiş sonuçlarına bakıldığında iyi sonuç elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada da titanyum alaşımı kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Ti-6AL-4V (Titanium Alloy) malzeme özellikleri

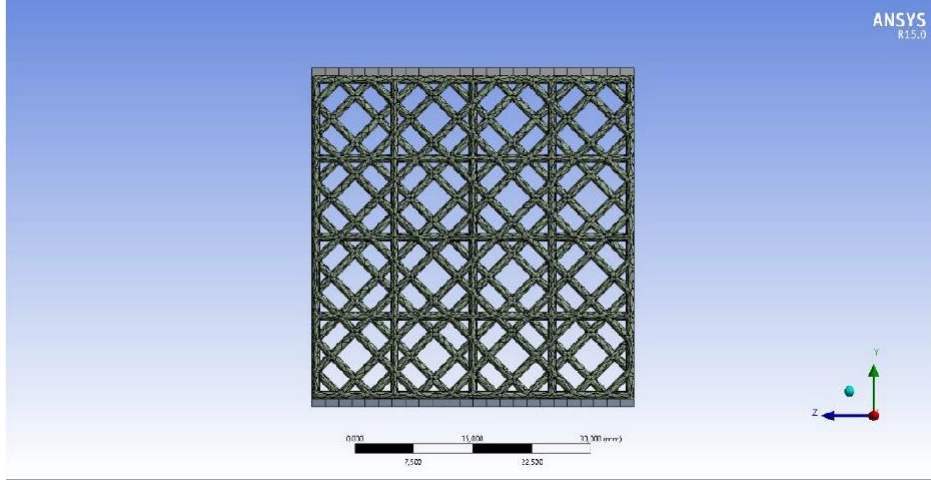
Mekanik Özellik	Değer
Yoğunluk (kg/m^3)	4430
Elastikiyet Modülü (MPa)	114 000
Çekme Akma Dayanımı (MPa)	1100
Üst Çekme Dayanımı (MPa)	1170
Basma Akma Dayanımı (MPa)	1070
Poisson's Oranı	0,342
Shear Modülü (MPa)	44 000

Malzeme özellikleri Static Structural>Engineering Data kısmından seçilmiştir. Daha sonrasında Model kısmından katı modele malzeme ataması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Mesh Generation ile çözüm ağır oluşturulmuştur. Tasarımdaki karmaşıklık göz önüne alındığında mesh kalitesi “Fine” olarak seçilmiştir.

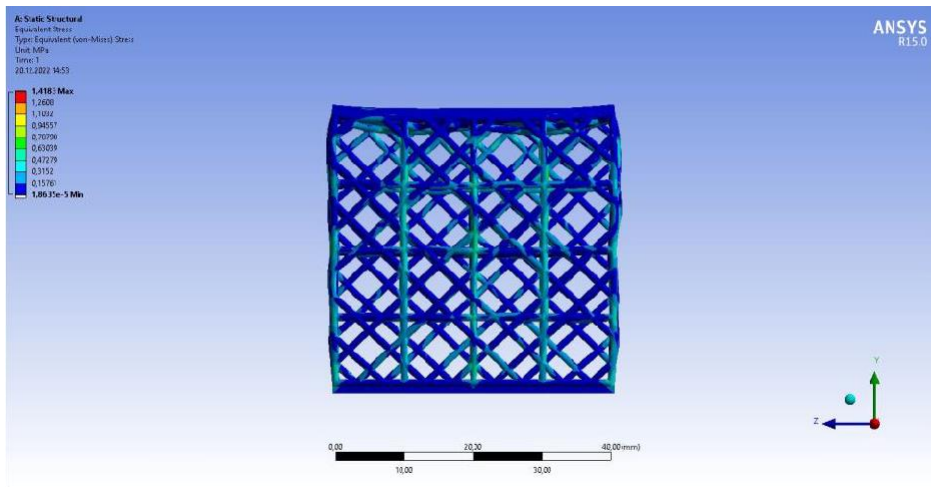
ANSYS analiz programında analiz işlemi gerçekleştirilmeden önce kuvvetin şiddeti ve yönünün tanımlanması, gerilme ve deformasyon işlemlerinin parçanın hareket kabiliyeti sınırlandırılması gibi işlemler uygulanmıştır. 10 N kuvvete uygulanmıştır.

Çizelge 4.2. Analiz modeli için elemanın eleman sayısı

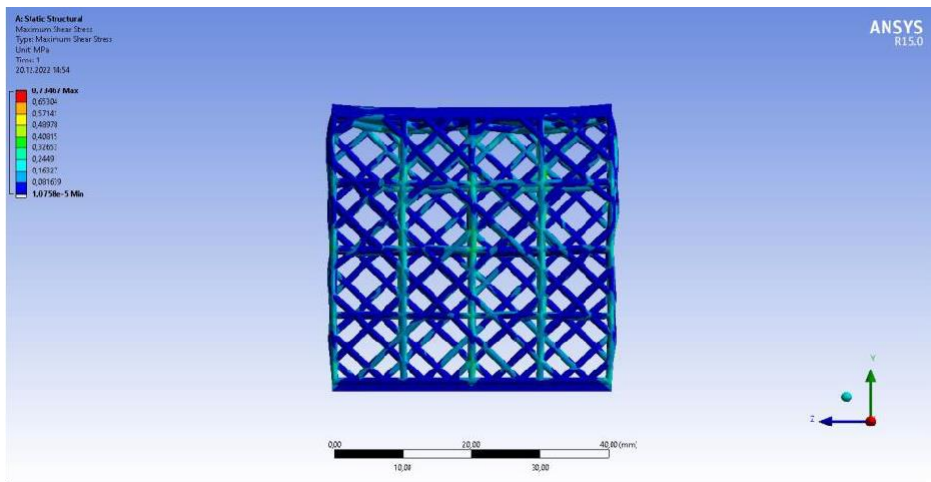
Geometri	Node Sayısı	Eleman Sayısı
Biyomimetik tabanlı kafes yapısı 40x40 mm	220 387	112 694



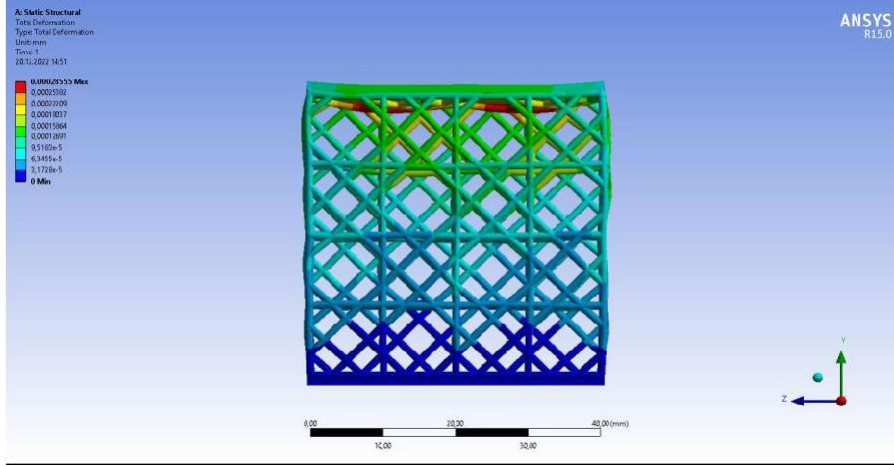
Resim 4.2. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının mesh görüntüsü



Resim 4.3. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının von Mises gerilim dağılımı



Resim 4.4. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının maksimum kesme gerilim dağılımı



Resim 4.5. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının total deformasyon dağılımı

Çizelge 4.3. Analiz modeli için elemanın eleman sayısı

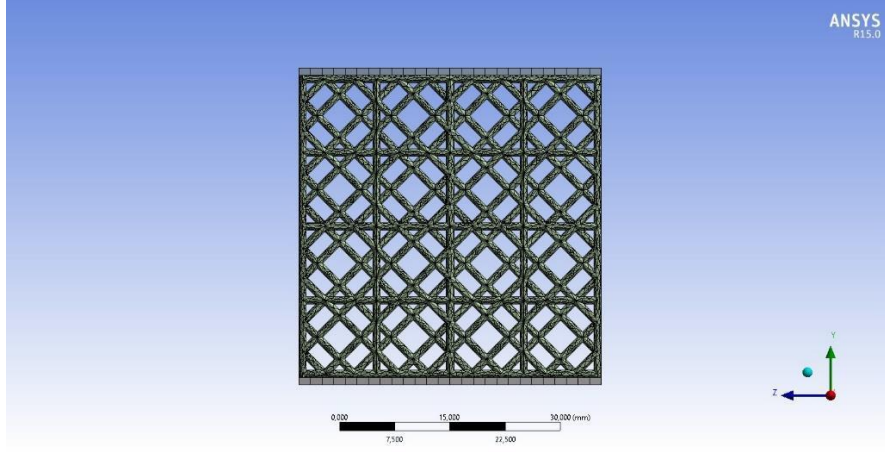
Analiz Türü	Sonuçlar
Total Deformasyon (Total Deformation)	0,00028555 mm
Maksimum Kesme Gerilmesi (Maximum Shear Stress)	0,73467 MPa
Maksimum Kesme Elastik Gerinim (Maximum Shear Elastic Strain)	$2,0816 \times 10^{-5}$ mm/mm
Eşdeğer Elastik Gerinim (Equivalent Elastic Strain)	$1,657 \times 10^{-5}$ mm/mm
Eşdeğer (von-Mises) Gerilme (Equivalent (von-Mises) Stress)	1,4183 MPa

4.3. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Dinamik Analizi

Tork bağlantısı hem statik hem de dinamik yüke maruz kalmaktadır. Bu nedenle daha önce statik analizi yapılan biyomimetik tabanlı kafes yapısına ANSYS yazılımında “Explicit Dynamics” analizi yapılmıştır. Bu analizde de statik analizinde olduğu gibi Rhinoceros programında tasarlanan 3B kafes modele uygulanacak yükün, modele eşit bir şekilde uygulanabilmesi için kafes modelinin üst ve alt kısmına 1 mm kalınlığında plaka eklenmiştir. Oluşturulan model, ANSYS analiz programında Explicit Dynamics>Model kısmına .step uzantısı ile aktarılmıştır.

Dosya aktarıldıktan sonra Design Modeler kısmında parçanın komutu ayarlanmıştır. Sonrasında ise Mechanical kısmına geçilmiştir. Burada öncelikle step uzantısı ile aktarılan geometri seçilerek malzeme tanımlanmıştır. Malzeme olarak Ti6Al4V atanmıştır. Ardından

mesh ayarları yapılmıştır. Mesh işlemi gerçekleştirilen model Şekil 4.6’da verilmiştir. Modele ait node ve eleman sayıları ise Çizelge 4.3’te verilmiştir.

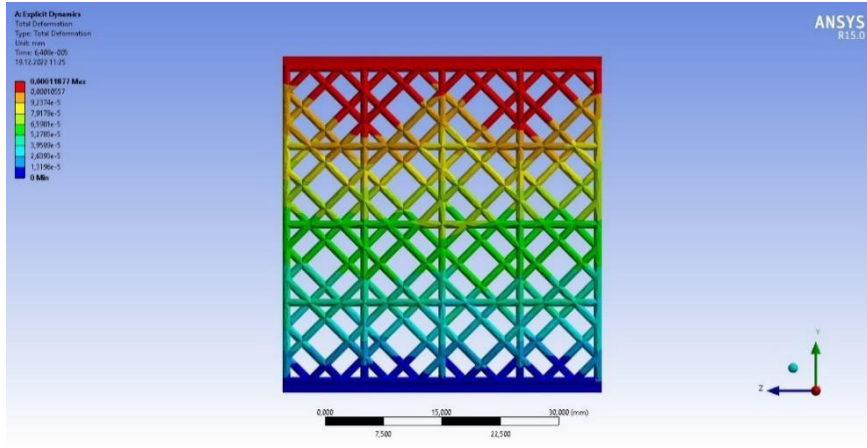


Resim 4.6. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının mesh görüntüsü

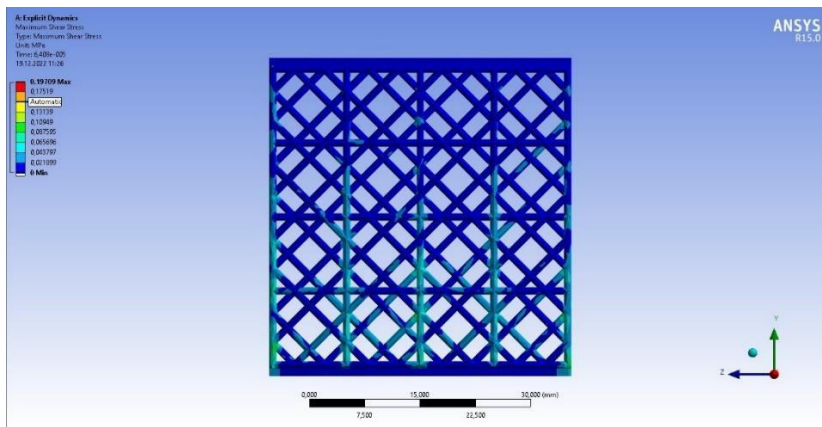
Çizelge 4.4. Analiz modeli için elemanın eleman sayısı

Geometri	Node Sayısı	Eleman Sayısı
Biyomimetik tabanlı kafes yapısı 40x40 mm	56 596	182 034

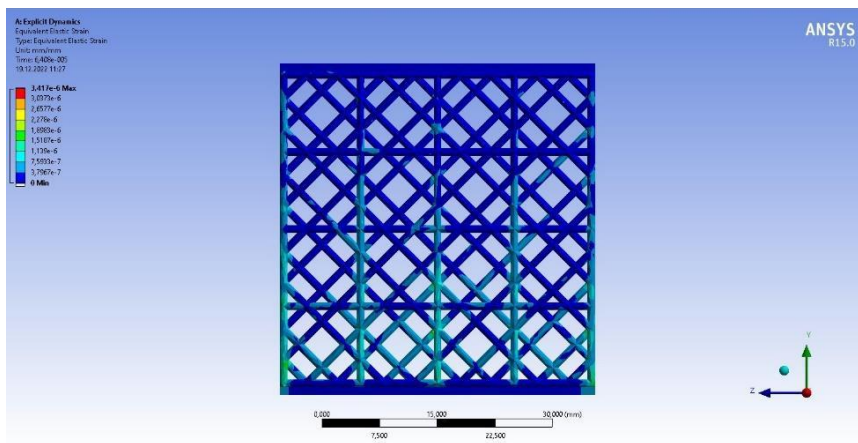
Parçanın alt kısmına eklenen plakanın alt yüzeyi seçilerek “fixed support” ve üst plaka seçilerek “displacement” eklenmiştir. Analiz ayarlarında analiz süresi girildikten sonra “Solution” kısmında istenen sonuçlar seçilmiştir. Bu analiz için total deformasyon (Resim 4.7), maksimum kayma gerilim dağılımı (Resim 4.8), yapısının maksimum kesme gerinim dağılımı, maksimum kesme elastik gerilimi (Resim 4.9) ve Von misess gerilim dağılımı seçilmiştir. Sonrasında analiz başlatılmıştır.



Resim 4.7. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının total deformasyon dağılımı



Resim 4.8. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının maksimum kesme gerilim dağılımı



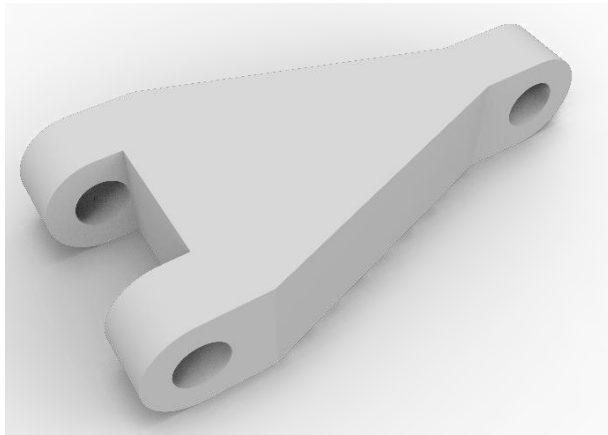
Resim 4.9. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının eşdeğer kesme gerilim dağılımı

Çizelge 4.5. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının analiz sonuçları

Analiz Türü	Sonuçlar
Total Deformasyon (Total Deformation)	0,00011877 mm
Maksimum Kesme Gerilmesi (Maximum Shear Stress)	0,19709 MPa
Maksimum Kesme Elastik Gerinim (Maximum Shear Elastic Strain)	$4,7038 \times 10^{-6}$ mm/mm
Eşdeğer Elastik Gerinim (Equivalent Elastic Strain)	$3,41700 \times 10^{-6}$ mm/mm
Eşdeğer (von-Mises) Gerilme (Equivalent (von-Mises) Stress)	0,35897 MPa

4.4 Orijinal Tork Bağlantısının Statik Analizi

Solidworks yazılımında modellenen orijinal tork bağlantısı Static Structural>Model kısmına .step uzantısı ile aktarılmıştır. ANSYS yazılımına aktarılan model Resim 4.10’da verilmiştir. Parçanın hacmi 426,27 cm³ ($4,2627 \times 10^5$ mm³), kütlesi ise 1,8884 kg olarak belirlenmiştir.



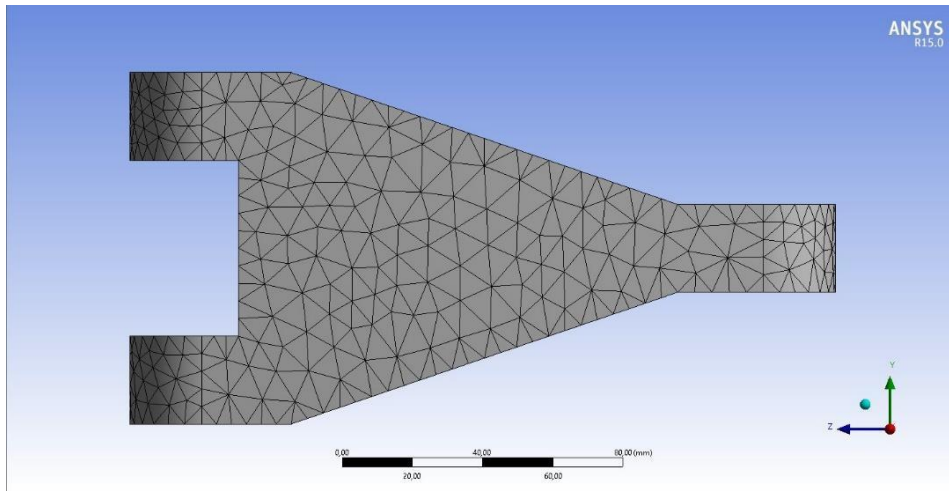
Resim 4.10. Orijinal tork bağlantısı

Model aktarıldıktan sonra biyomimetik tabanlı kafes yapısının statik analizinde de anlatılan adımlar izlenerek analizi yapılacak modelin malzemesi tanımlanmalıdır. Sonrasında da mesh uygulanması ve sınır şartlarının belirlenmesi ile devam edilmiştir. Bu çalışmada odak noktası biyomimetik tabanlı kafes yapısı olduğu için piyasada bulunan üst tork bağlantısının ölçülerine göre modelleme yapılmıştır ve piyasada bulunan üründe kullanılan titanyum alaşımı (Ti6Al4V) modele tanımlanmıştır.

Malzeme özellikleri Static Structural>Engineering Data kısmından seçilmiştir. Daha sonrasında Model kısmından katı modele malzeme ataması gerçekleştirilmiştir. Ardından Mesh Generation ile çözüm ağı oluşturulmuştur (Şekil 4.11). Modele ait node ve eleman sayısı bilgileri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Orijinal tork bağlantısı modeli için eleman sayısı

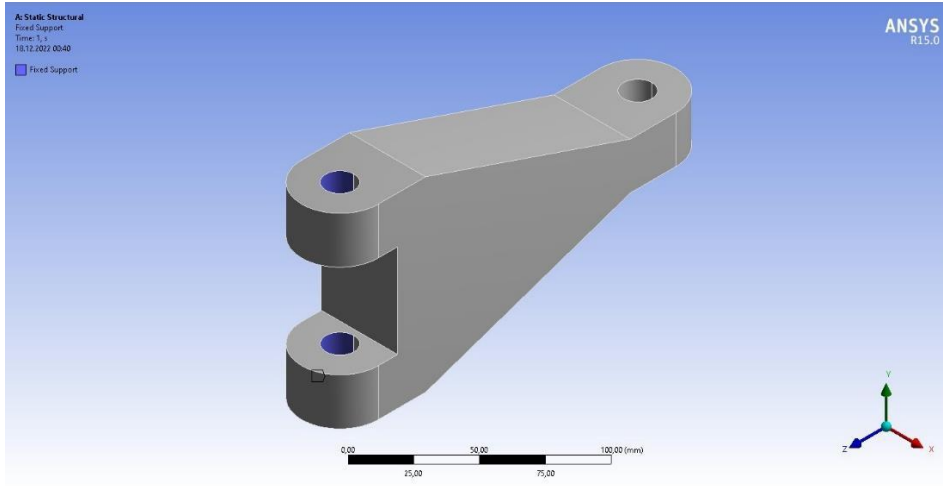
Geometri	Node Sayısı	Eleman Sayısı
Orijinal tork bağlantısı	7447	3977



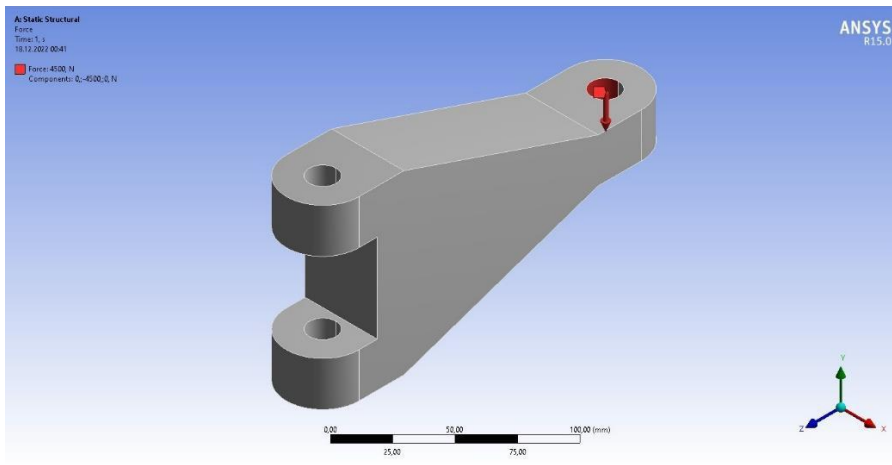
Resim 4.11. Orijinal tork bağlantısının mesh görüntüsü

ANSYS analiz programında analiz işlemi gerçekleştirilmeden önce kuvvetin şiddeti ve yönünün tanımlanması, gerilme ve deformasyon işlemlerinin parçanın hareket kabiliyeti sınırlandırılması gibi işlemler uygulanmalıdır. Bu parçada araştırma neticesinde elde edilen test ortamına göre model konumlandırılmıştır. Sonrasında da gerekli yerlere hareket sınırlaması getirilmiş ve kuvvet uygulaması yapılmıştır (Resim 4.12 ve Resim 4.13). Tork bağlantısının maruz kaldığı yük tam olarak bilinmediği için literatürde varsayımsal değerler verilmiştir. Bu çalışmada Arravind ve diğerlerinin yaptığı çalışma referans alınarak 100 N kuvvet uygulanmıştır.

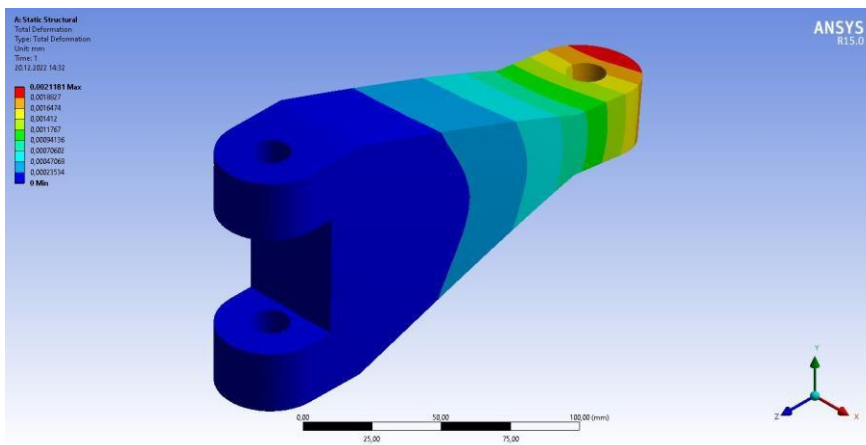
Bu analiz için total deformasyon (Resim 4.14), Von misess gerilim dağılımı (Resim 4.15), maksimum kesme gerilim dağılımı (Resim 4.16), eşdeğer elastik gerilim dağılımı (Resim 4.17), maksimum kesme elastik gerilim dağılımı (Resim 4.18) seçilmiştir. Sonrasında analiz başlatılmıştır.



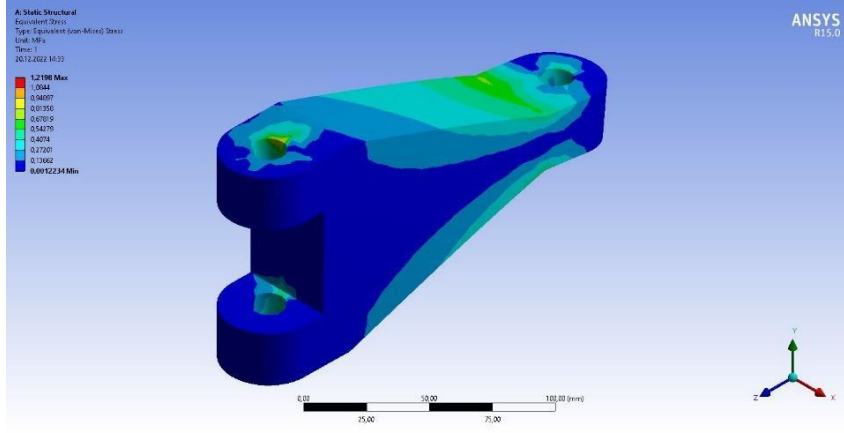
Resim 4.12. Orijinal tork bağlantısının sabitlenme yüzeyleri



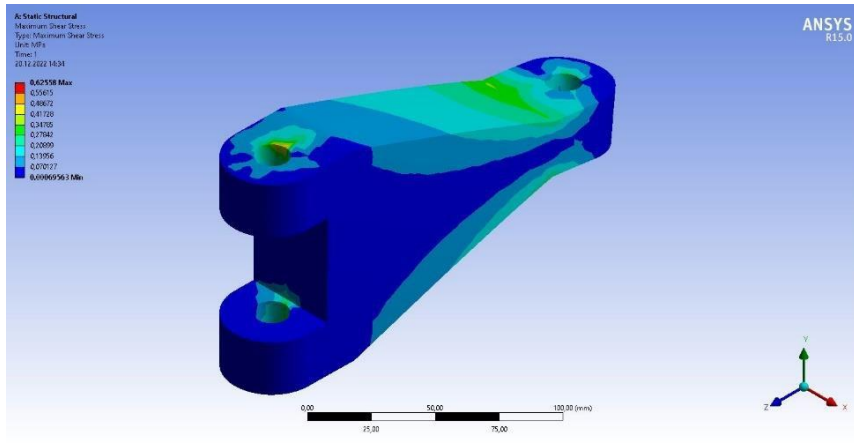
Resim 4.13. Orijinal tork bağlantısına kuvvet uygulanan yüzey



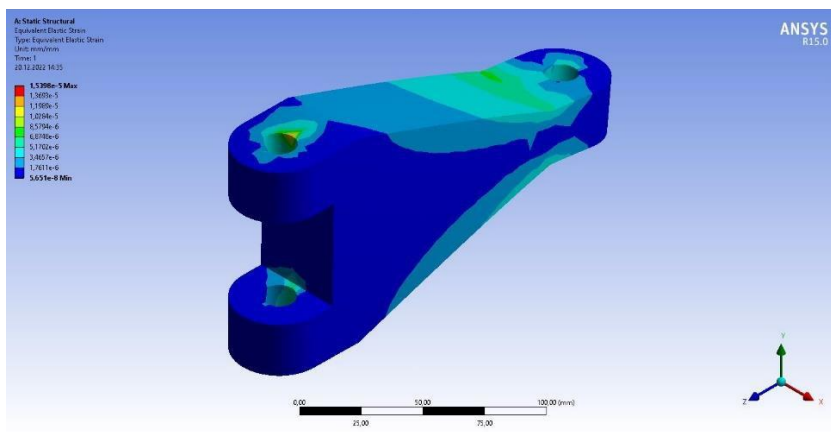
Resim 4.14. Orijinal tork bağlantısının total deformasyon dağılımı



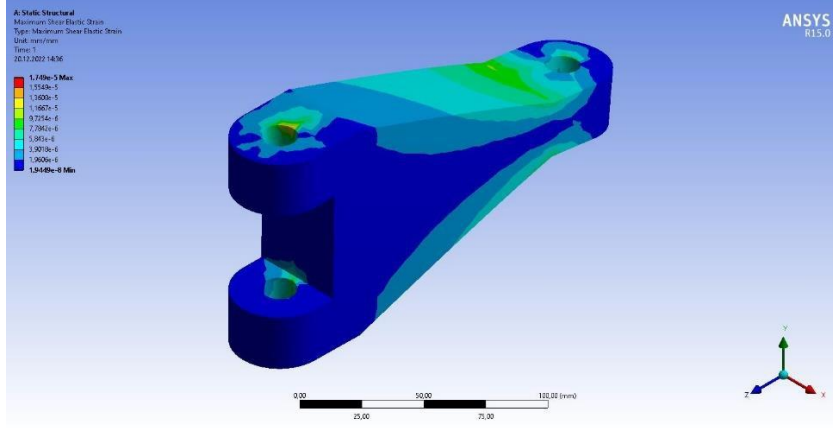
Resim 4.15. Orijinal tork bağlantısının von Mises gerilim dağılımı



Resim 4.16. Orijinal tork bağlantısının maksimum kesme gerilim dağılımı



Resim 4.17. Orijinal tork bağlantısının eşdeğer elastik gerilim dağılımı



Resim 4.18. Orijinal tork bağlantısının maksimum kesme elastik gerinim dağılımı

Çizelge 4.7. Orijinal tork bağlantısı modelinin analiz sonuçları

Analiz Türü	Sonuçlar
Total Deformasyon (Total Deformation)	0,095313 mm
Maksimum Kesme Gerilmesi (Maximum Shear Stress)	0,62558 MPa
Maksimum Kesme Elastik Gerinim (Maximum Shear Elastic Strain)	$1,749 \times 10^{-5}$ mm/mm
Eşdeğer Elastik Gerinim (Equivalent Elastic Strain)	$1,5398 \times 10^{-5}$ mm/mm
Eşdeğer (von-Mises) Gerilme Equivalent (von-Mises) Stress)	1,2198 MPa

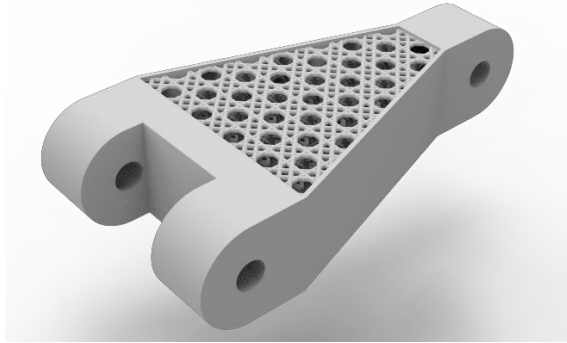
4.5. Optimize Edilmiş Tork Bağlantısının Statik Analizi

Rhinoceros yazılımında modellenen orijinal tork bağlantısı Static Structural>Model kısmına. step uzantısı ile aktarılmıştır. ANSYS yazılımına aktarılan model Resim 4.19’da verilmiştir. Parçanın hacmi 116,27 cm³ ($1,1629 \times 10^5$ mm³), kütlesi ise 0,53726 kg olarak belirlenmiştir.

Model aktarıldıktan sonra analizi yapılacak modelin malzemesi tanımlanmalıdır. Sonrasında da mesh uygulanması ve sınır şartlarının belirlenmesi ile devam edilmiştir. Bir önceki analizde olduğu gibi malzeme olarak titanyum alaşımı (Ti6Al4V) eklenmiştir.

Malzeme özellikleri Static Structural>Engineering Data kısmından seçilmiştir. Daha sonrasında Model kısmından katı modele malzeme ataması gerçekleştirilmiştir. Ardından

Mesh Generation ile çözüm ağı oluşturulmuştur (Resim 4.19). Modele ait node ve eleman sayısı bilgileri Çizelge 4.6’te verilmiştir.



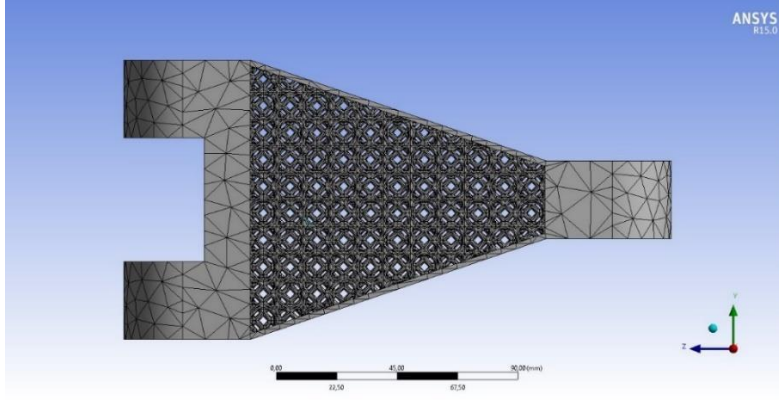
Resim 4.19. Analiz yapılacak olan optimize edilmiş tork bağlantısı

Model aktarıldıktan sonra analizi yapılacak modelin malzemesi tanımlanmalıdır. Sonrasında da mesh uygulanması ve sınır şartlarının belirlenmesi ile devam edilmiştir. Bir önceki analizde olduğu gibi malzeme olarak titanyum alaşımı (Ti6Al4V) eklenmiştir.

Malzeme özellikleri Static Structural>Engineering Data kısmından seçilmiştir. Daha sonrasında Model kısmından katı modele malzeme ataması gerçekleştirilmiştir. Ardından Mesh Generation ile çözüm ağı oluşturulmuştur (Şekil 4.19). Modele ait node ve eleman sayısı bilgileri Çizelge 4.6’te verilmiştir. Optimize edilmiş tork bağlantısının analiz sonuçları ile orijinal tork bağlantısının analiz sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla bu analizde de 100 N kuvvet uygulanmıştır.

Çizelge 4.8. Optimize edilmiş tork bağlantısı modeli için eleman sayısı

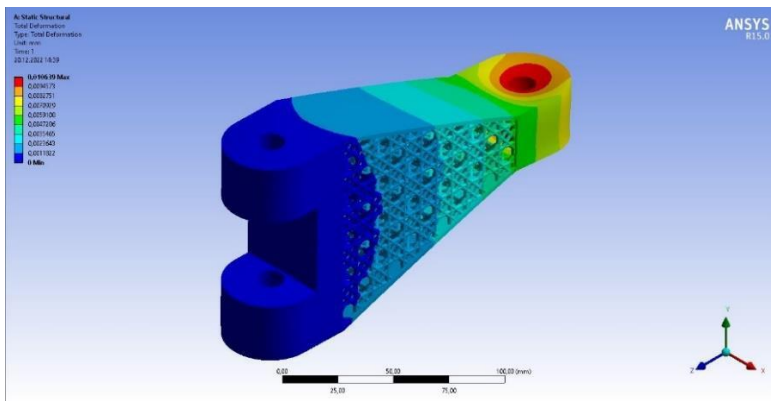
Geometri	Node Sayısı	Eleman Sayısı
Optimize edilmiş tork bağlantısı	473 943	270 280



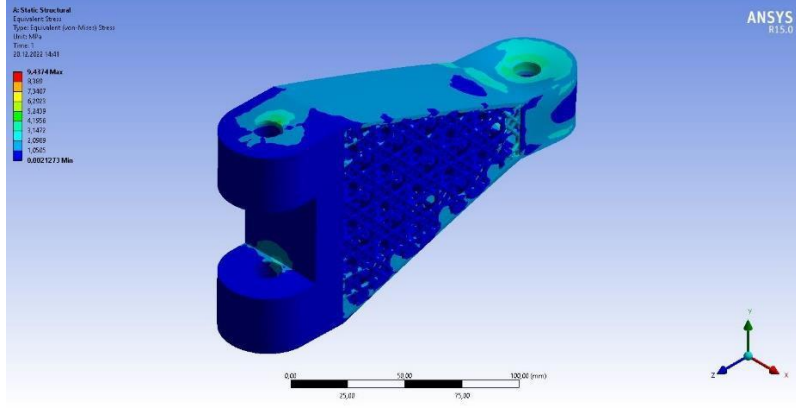
Resim 4.20. Optimize edilmiş tork bağlantısının mesh görüntüsü

ANSYS analiz programında analiz işlemi gerçekleştirilmeden önce kuvvetin şiddeti ve yönünün tanımlanması, gerilme ve deformasyon işlemlerinin parçanın hareket kabiliyeti sınırlandırılması gibi işlemler uygulanmalıdır. Bu parçada orijinal tork bağlantısı ile aynı pozisyona getirilmiş ve gerekli hareket sınırlandırmaları ve kuvvet uygulaması gerçekleştirilmiştir.

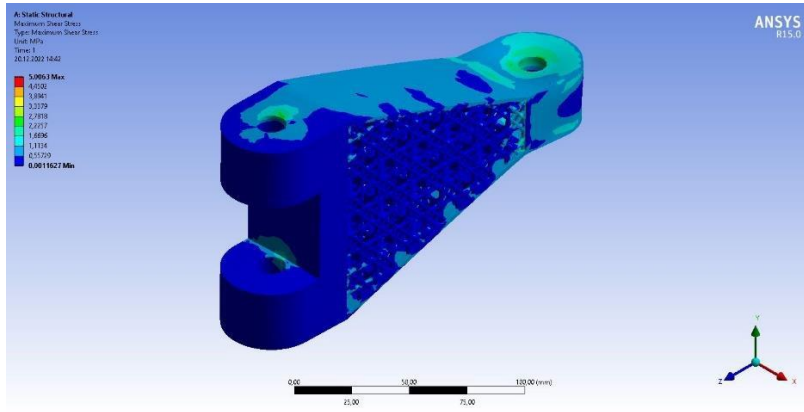
Bu analiz için total deformasyon (Resim 4.21), Von misess gerilim dağılımı (Resim 4.22), maksimum kesme gerilim dağılımı (Resim 4.23), eşdeğer elastik gerinim dağılımı (Resim 4.24), maksimum kesme elastik gerinim dağılımı (Resim 4.25) seçilmiştir. Sonrasında analiz başlatılmıştır.



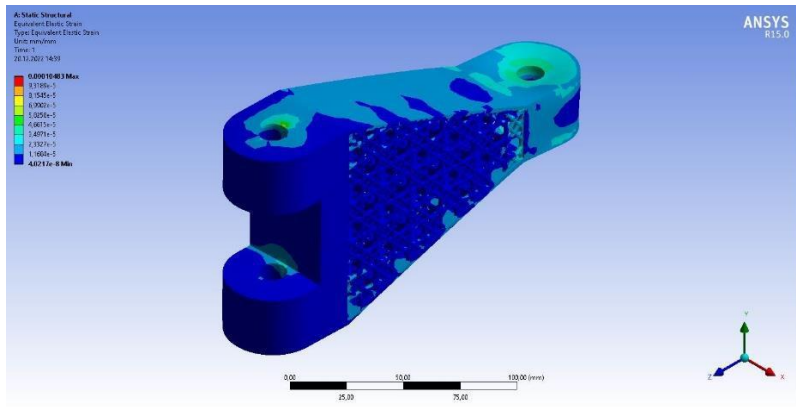
Resim 4.21. Optimize edilmiş tork bağlantısının total deformasyon dağılımı



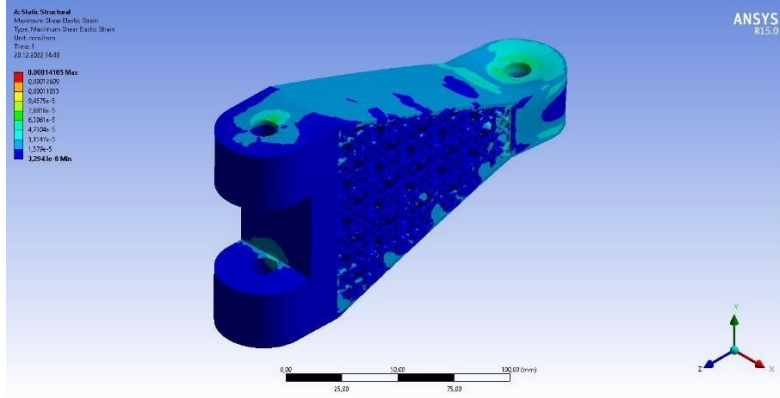
Resim 4.22. Optimize edilmiş tork bağlantısının von Misess gerilim dağılımı



Resim 4.23. Optimize edilmiş tork bağlantısının maksimum kesme gerilimi dağılımı



Resim 4.24 Optimize edilmiş tork bağlantısının eşdeğer elastik gerinim dağılımı



Resim 4.25. Optimize edilmiş tork bağlantısının maksimum kesme elastik gerinim dağılımı

Çizelge 4.9. Optimize edilmiş tork bağlantısı modelinin analiz sonuçları

Analiz Türü	Sonuçlar
Total Deformasyon (Total Deformation)	0,010639 mm
Maksimum Kesme Gerilmesi (Maximum Shear Stress)	5,0063 MPa
Maksimum Kesme Elastik Gerinim (Maximum Shear Elastic Strain)	0,00014185 mm/mm
Eşdeğer Elastik Gerinim (Equivalent Elastic Strain)	0,00010483 mm/mm
Eşdeğer (von-Mises) Gerilme (Equivalent (von-Mises) Stress)	9,4374 MPa

Çizelge 4.10. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Analiz Türü	Orijinal tork bağlantısı modelinin analiz sonuçları	Optimize edilmiş tork bağlantısı modelinin analiz sonuçları
Total Deformasyon (Total Deformation)	0,095313 mm	0,010639 mm
Maksimum Kesme Gerilmesi (Maximum Shear Stress)	0,62558 MPa	5,0063 MPa
Maksimum Kesme Elastik Gerinim (Maximum Shear Elastic Strain)	$1,749 \times 10^{-5}$ mm/mm	0,00014185 mm/mm
Eşdeğer Elastik Gerinim (Equivalent Elastic Strain)	$1,5398 \times 10^{-5}$ mm/mm	0,00010483 mm/mm
Eşdeğer (von-Mises) Gerilme Equivalent (von-Mises) Stress)	1,2198 MPa	9,4374 MPa

Çizelge 4.8’de görüldüğü üzere optimize edilen tork parçasının dayanımında düşüş meydana gelmektedir. Ancak bu düşüş kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmaktadır.

Topoloji optimizasyonunda amaç parçanın hacminin azaltılmasıdır. Bu çalışmada biyomimeitik tabanlı kafes yapısı topoloji optimizasyonunda kullanılarak mevcut parçanın hacmi yaklaşık %72,72 oranında azaltılmıştır.

Çizelge 4.11. Modellerin hacimlerinin karşılaştırılması

Model	Hacim	Kütle
Orijinal tork bağlantısı	426,27 cm ³	1,8884 kg
Optimize edilmiş tork bağlantısı	116,27 cm ³	0,53726 kg

5. MALZEME VE YÖNTEM

Havacılık sektöründe metal eklemeli imalat teknolojileri kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada oluşturulan prototipler malzeme ekstrüzyon 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır. Bu çalışmada Gazi Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği bölümündeki Tersine Mühendislik ve Eklemeli İmalat Laboratuvarında bulunan ekstrüzyon tabanlı uPrint® SE cihazı kullanılmıştır (Resim 5.1).

5.2. uPrint® SE 3B Yazıcı

Bu çalışma kapsamında malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile çalışan uPrint® SE cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, 635 mm x 660 mm x 787 mm boyutlarındadır ve 76 kg ağırlığında olduğu için masaüstü kullanılabilecek bir cihazdır. Baskı odası tamamen kapalı olmakla birlikte baskı alma sırasında bir ışık etkinleşir. Şeffaf bir pencereye sahip kapı baskı sırasında güvenlik için kilitlenmektedir. Cihazın alt kısmında iki adet geri çekilebilir malzeme yuvası bulunmaktadır. Bu yuvalarda hem malzeme hem de destek malzemesi depolanmaktadır. Malzeme yuvasında M sembolü, destek malzemesi yuvasında S sembolü bulunmaktadır. Yazıcı kapasitesi artırılmak istendiğinde ek malzeme bölmeleri alınabilmektedir.



Resim 5.1. Stratasys uPrint® SE cihazı

uPrint SE cihazının çalışma prensibine göre iki doğrudan tahrikli nozzle bulunmaktadır. Bu nozzlelerden biri ABSplus malzemesini biriktirirken diğeri destek malzemesini biriktirir. Hassas yüzeye sahip baskılar oluşturmak için katman kalınlığı 0,254 mm, minimum duvar kalınlığı ise 914 mm'dir. Baskı sırasında nozzlelerin ucunda biriken filamentleri temizlemek için nozzle temizleme tertibata bulunmaktadır. Aynı zamanda filament tortuları için tasfiye kovası da mevcuttur.

Baskı sırasında ABSplus malzeme katman katman yazdırma tablasına biriktirilir. Modelin üretiminde oluşturulan destek yapıları işlem bitiminde kimyasal su karışımında bekletilerek temizlenir. uPrint® SE cihazının teknik özellikleri Çizelge 5.1' de verilmiştir.

Çizelge 5.1. uPrint® SE cihazı özellikleri

Malzeme Seçenekleri	ABSplus
Destek Malzemesi	SR-30 çözünebilir destek
Malzeme Renkleri	Fildişi, beyaz, mavi, florasan sarısı, siyah, kırmızı, şeftali, zeytin yeşili ve gri
Baskı Boyutları	203 x 203 x 152 mm
Katman Kalınlığı	0,254 mm
Yazıcı Boyutları	1 malzeme gözlü: 635 x 660 x 787 mm 2 malzeme gözlü: 635 x 660 x 940 mm
Ağırlık	1 malzeme gözlü: 76 kg 2 malzeme gözlü: 94 kg
Yazılım	CatalystEX
İşletim Sistemi Uygunluğu	Windows 8, Win 7, XP, Vista
Ağ Bağlantısı	Ethernet TCP/IP 10/100 base T
Güç Gereksinimi	100-127 VAC, 50/60 Hz, minimum 15A ya da 220-240 VAC, 50/60 Hz, minimum 7A
Uyumlu Yönetmelikler	CE/ETL/RoHS/WEEE
Özel Koşul Gereksinimi	Yok

uPrint SE cihazının oluşturabileceği parça boyutu 203 x 152 x 152 mm'dir. uPrint SE Plus cihazında, uPrint SE cihazından farklı olarak katman kalınlığı seçilebilmektedir. Katman kalınlığı yüzey kalitesini ve süreyi etkilemektedir. Bu çalışmada uPrint SE cihazı kullanıldığı için katman kalınlığı 0,254 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan uPrint SE cihazının katman kalınlığı 0,254 mm'dir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. uPrint SE ve uPrint SE Plus cihazlarının katman kalınlıkları

Yazıcı tipi	Mevcut katman çözünürlükleri	Minimum duvar kalınlığı
uPrint SE	0,254 mm (0,010 inch)	0,914 mm (0,036 inch)
uPrint SE Plus	0,254 mm (0,010 inch) 0,3302 mm (0,013 inch)	0,914 mm (0,036 inch) 1,194 mm (0,047 inch)

Yazıcının sol üstünde dört satırlı bir ekran ve baskı sürecini yöneten menülerde gezmek için kullanılmak üzere tuş takımı bulunmaktadır. Bu işlemler, malzeme yükleme/boşaltma, malzeme seviyeleri, baskı durumu, kurulum ve bakım seçenekleri şeklinde sıralanabilir.

uPrint SE cihazı, STL formatında yüklenen CAD dosyalarını modele dönüştürmek için CatalystEX yazılımını kullanır. CatalystEX yazılımı yalnızca Windows ile uyumludur.

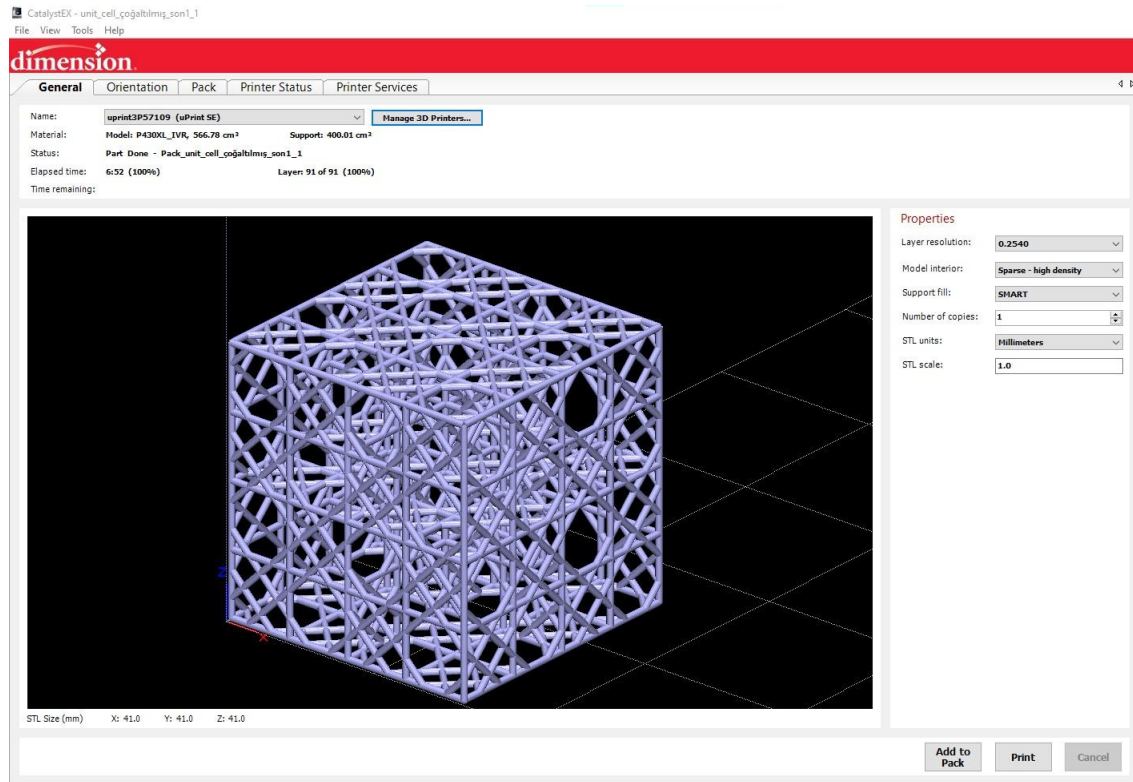
6. TORK BAĞLANTISININ PROTOTİP ÜRETİM SÜRECİ

6.1. Biyomimetik Tabanlı Kafes Yapısının Prototip Üretim Süreci

Daha önceki bölümlerde tasarlama süreci anlatılan kafes yapısının malzeme ekstrüzyon sistemi ile çalışan uPrint® SE cihazı ile baskısı alınmıştır. Optimize edilen tork bağlantısının malzemesi Ti6Al4V'dur. Ancak tasarımların prototipleri uPrint® SE cihazı ile ABS malzeme ile baskı alınmıştır.

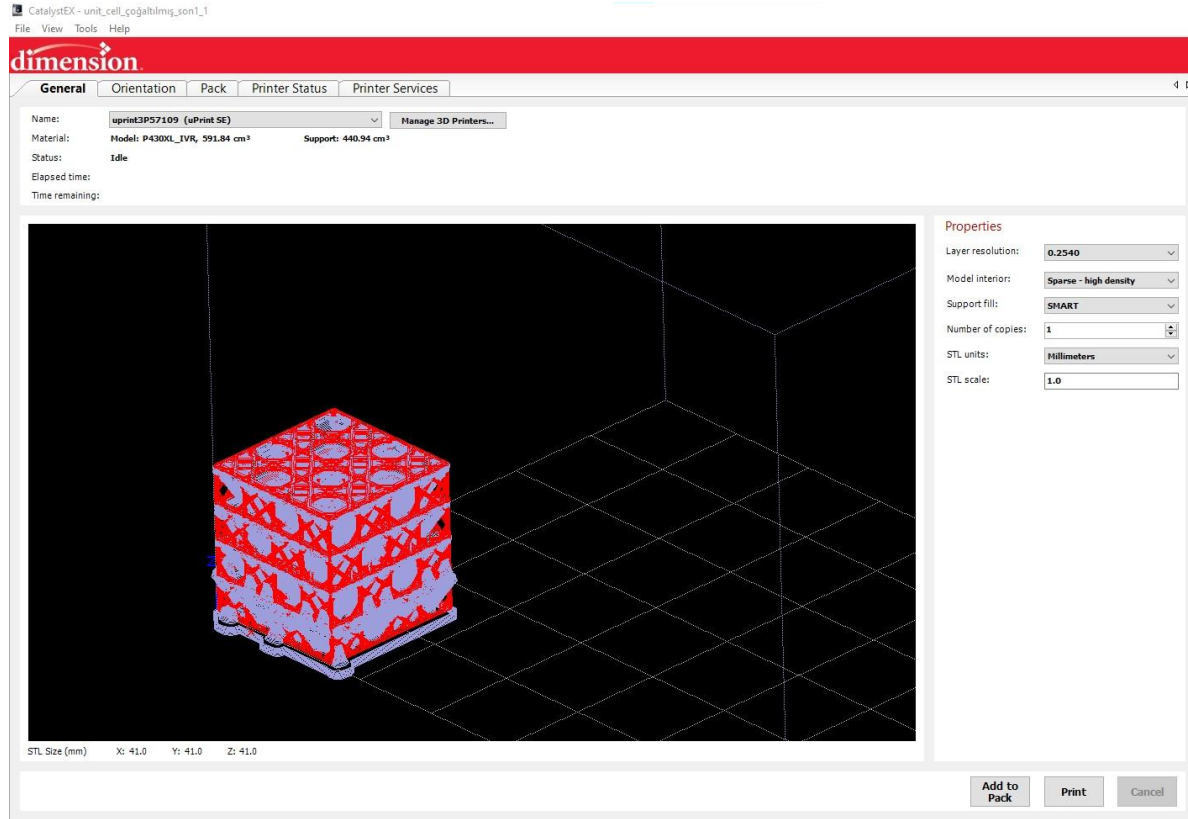
6.1.1. uPrint® SE cihazı ile üretim

Baskı alma sürecini başlatmak için öncelikle CAD yazılımında modellenen tasarımın stl uzantısı olarak kaydedilmesi gerekmektedir. Daha sonra STL uzantılı uPrint® SE cihazından baskı alma sürecinde gerekli düzenlemeleri yapmakta kullanılan CatalystEX yazılımına aktarılmıştır. Baskısı alınacak model yazılıma aktarıldığında model hacmi 566,78 cm³, çözünebilir destek malzemesi hacmi 400,01 cm³ ve katman kalınlığı 0,254 mm olarak belirlenmiştir (Resim 6.1).

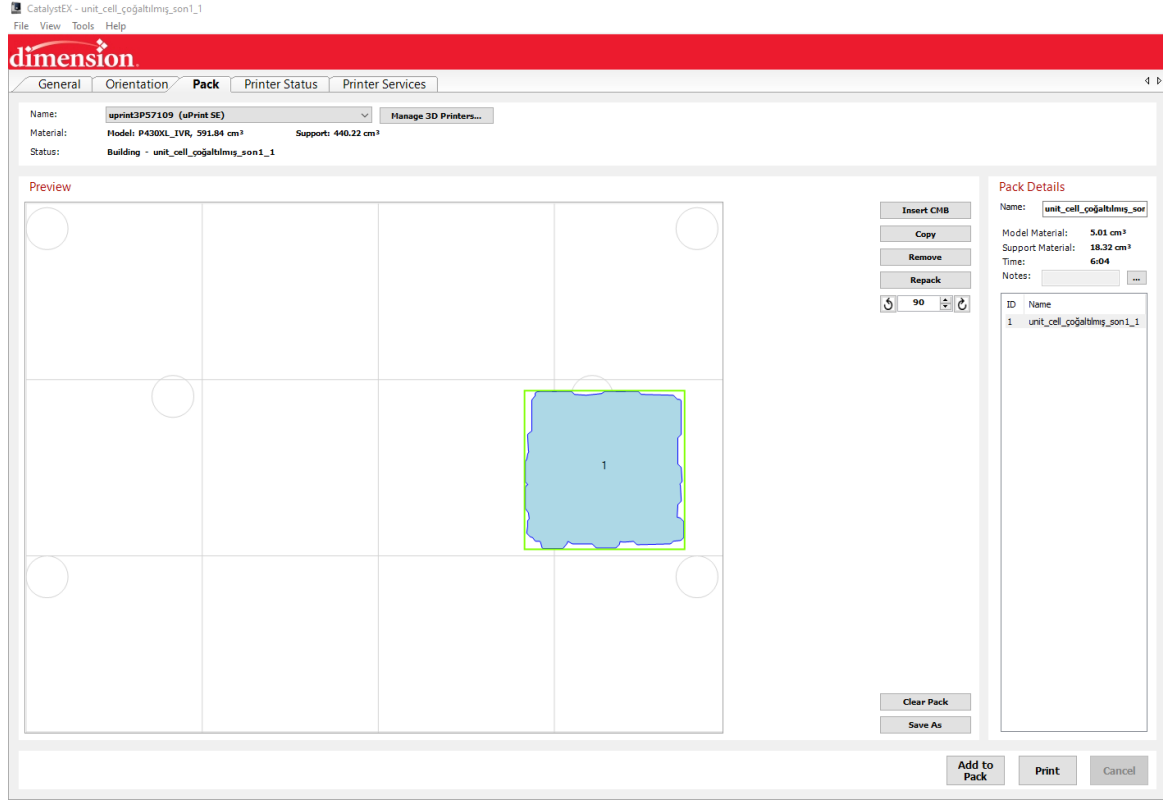


Resim 6.1. Baskısı alınacak modelin genel özellikleri

Katman kalınlığı, model hacmi ve destek hacmi, baskı ölçeği belirlenen modelin, x-y-z düzlemindeki konumu ve tablanın üzerindeki konumu belirlenmiştir. Tahmini baskı sürecinin 6 saat 4 dakika olduğu belirlenmiştir. Daha sonra “print” komutu ile baskı işlemi başlatılmıştır.



Resim 6.2. Oluşturulan destek malzemesinin ve modelin görüntüsü

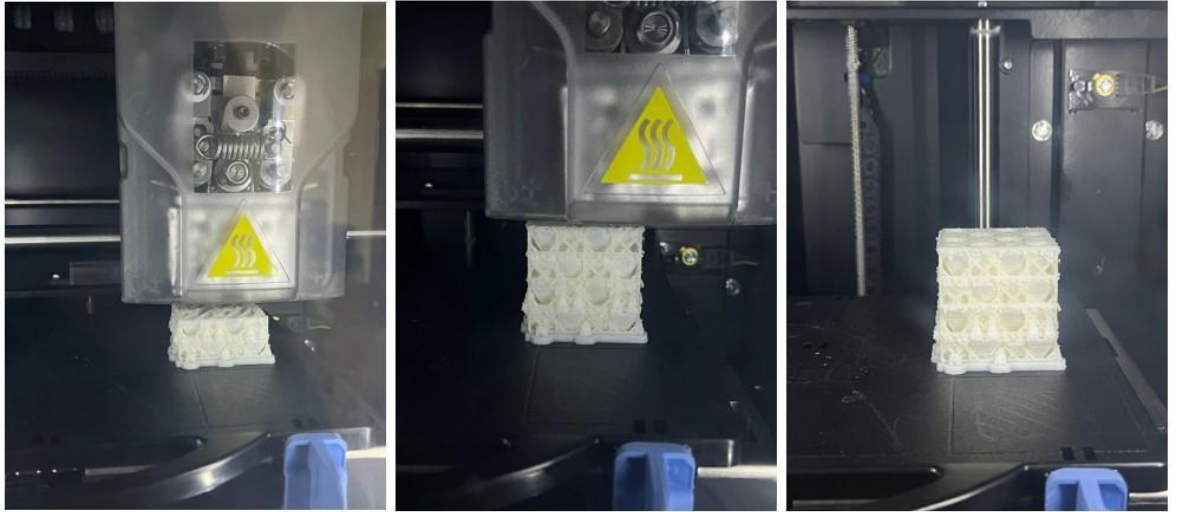


Resim 6.3. Baskısı alınacak modelin tabladaki konumu

Model, Catalyst yazılımı aracılığıyla cihaza gönderildikten sonra nozullar ısıtılmış, kalibrasyon ayarları otomatik olarak yapılmış ve baskı işlemi başlanmıştır. Baskı işlemine öncelikle destek malzeme ile başlanmıştır (Resim 6.4). Malzeme olarak ABSplus malzeme kullanılmıştır. Ardından model yazdırılmaya başlanmış, işlem bitiminde parça tabladan alınmıştır (Resim 6.5). Biyomimetik tabanlı kafes yapısının üretimi yaklaşık 6 saat sürmüştür.



Resim 6.4. Baskı sürecinin başlangıcı



Resim 6.5. Baskı süreci

Baskısı tamamlanan model yazdırma tablasından alındıktan sonra destek malzemeyi temizlemek amacıyla 70 °C sıcaklığında bir kimyasal çözücü içerisinde yaklaşık olarak 7 saat bekletilmiştir. Model, çözücü kimyasala metal bir kafes içerisine yerleştirilerek bekletilmiştir (Resim 6.6). Destek malzeme temizlendikten sonra parça su ile yıkanmıştır. Destek malzemesi temizlenmiş kübik kafes model Resim 6.6 ‘da gösterilmiştir.



Resim 6.6. Baskısı biten modelin çözücü kimyasala hazırlanması

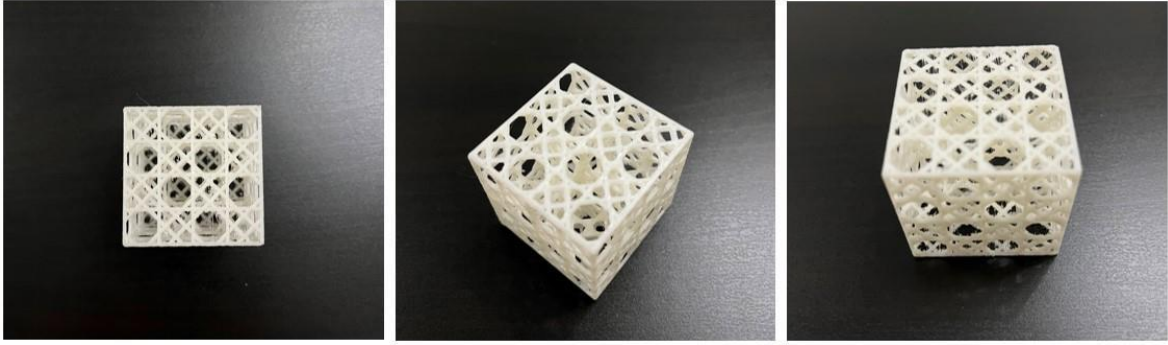


Resim 6.7. Modelin çözücü kimyasal içerisine konulması

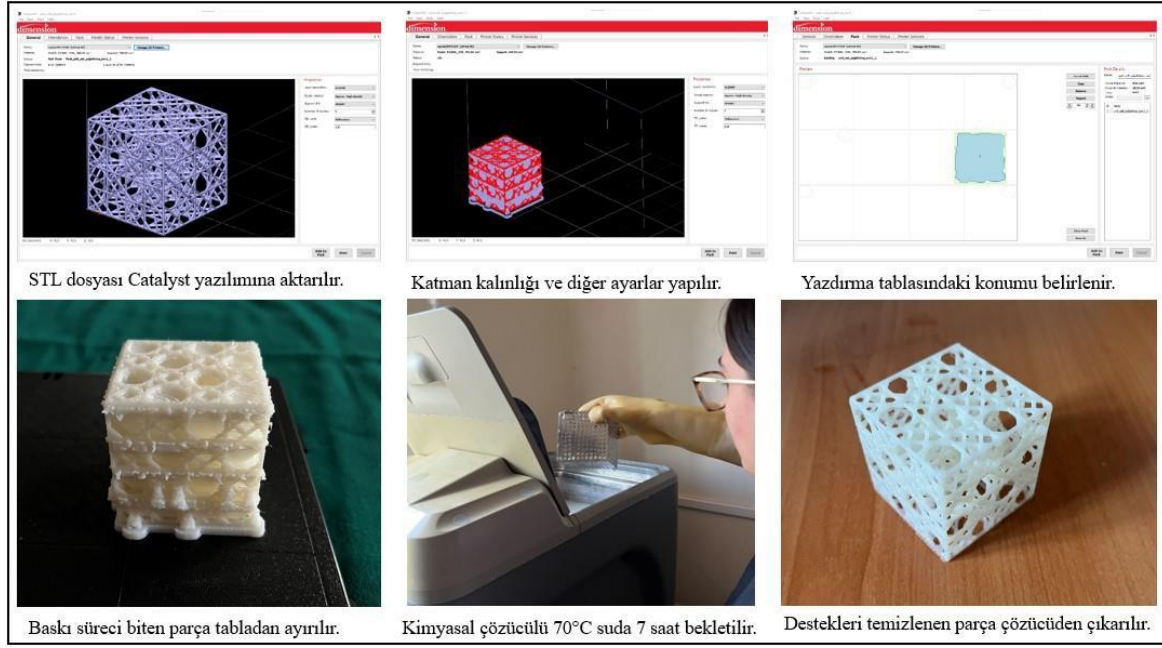


Resim 6.8. Çözücü kimyasalın ayarlarının yapılması

Çözücü kimyasal içerisinde çıkarılan destek malzemesi temizlenmiş model Resim 6.9’da verilmiştir. Baskı alma ve desteklerin temizlenme sürecinin özeti 6.10’da verilmiştir.

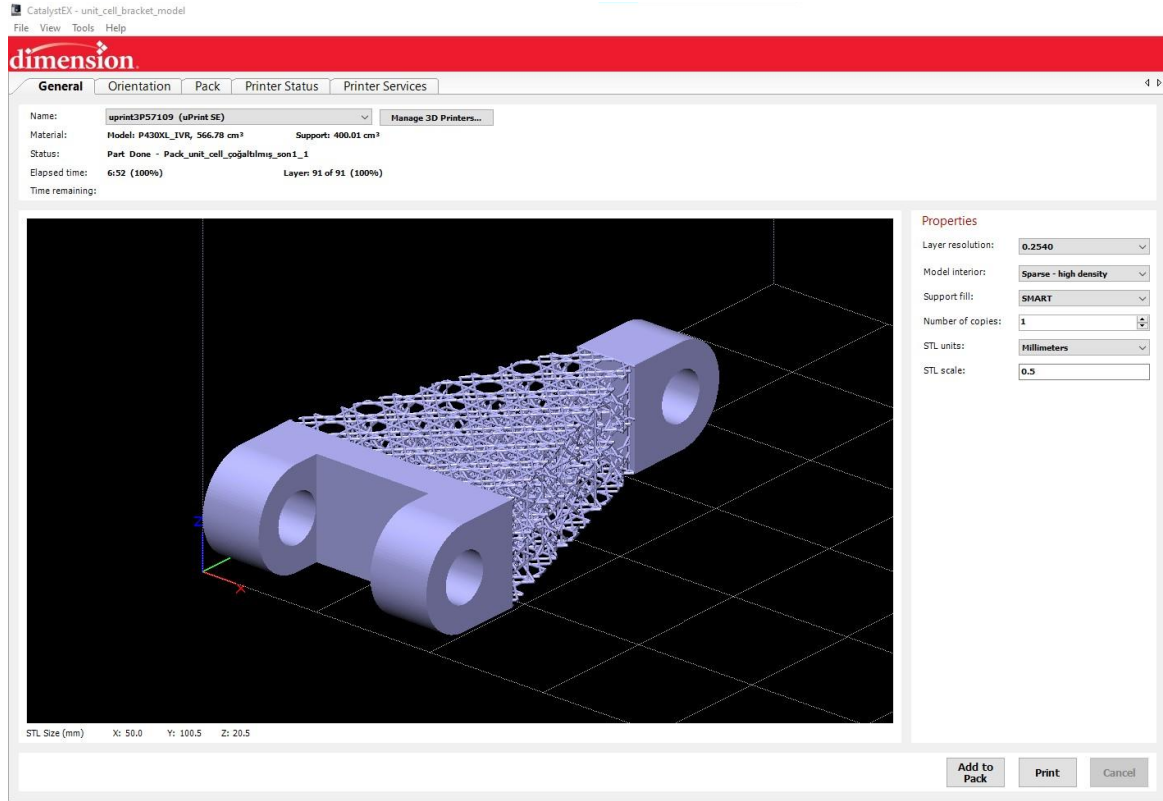


Resim 6.9. Biyomimetik tabanlı kübik kafes yapısı modeli

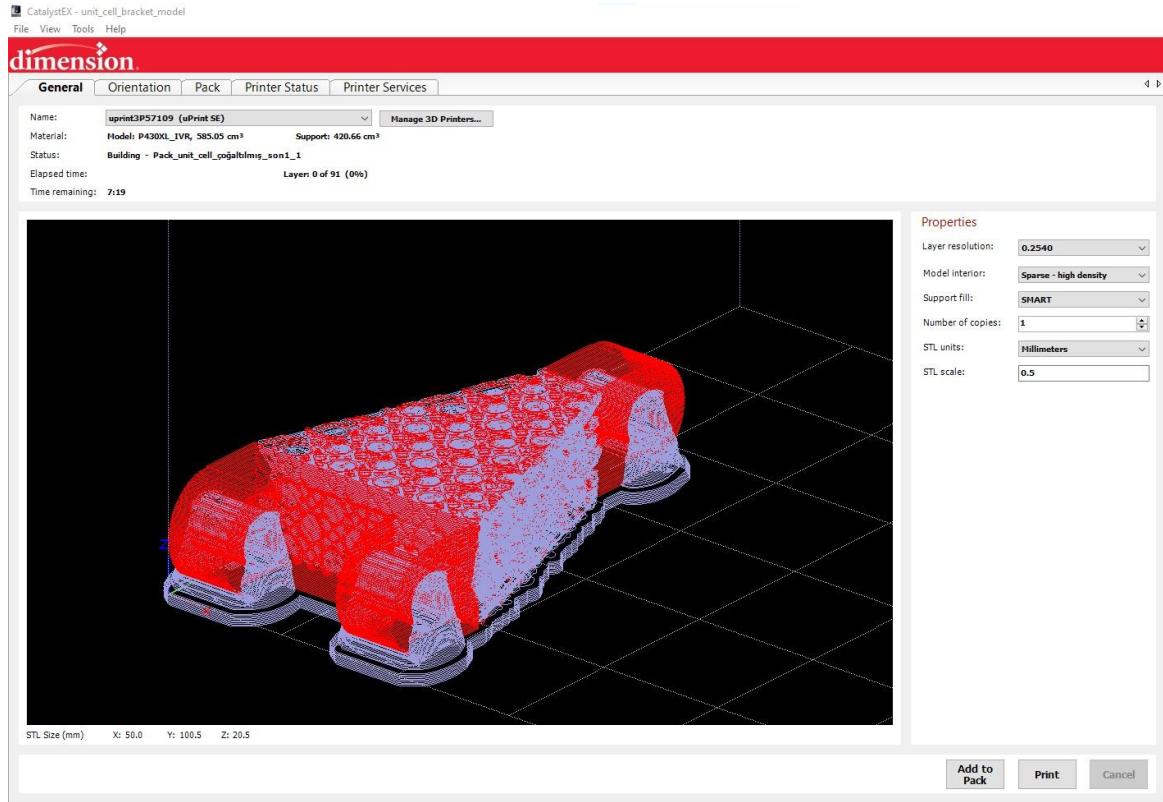


Resim 6.10. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının baskı alma süreci

Resim 6.10’da özetlenen biyomimetik tabanlı kafes yapısının baskı alma sürecinin aynısı tork bağlantısı modeli için de gerçekleştirilmiştir. Tork bağlantısının ölçüsü tablaya sığmayacağı için 0,5 ölçekte baskıya hazırlanmıştır (Resim 6.11) . Modelin hacmi $585,05 \text{ cm}^3$, destek hacmi ise $420,66 \text{ cm}^3$ olarak belirlenmiştir.

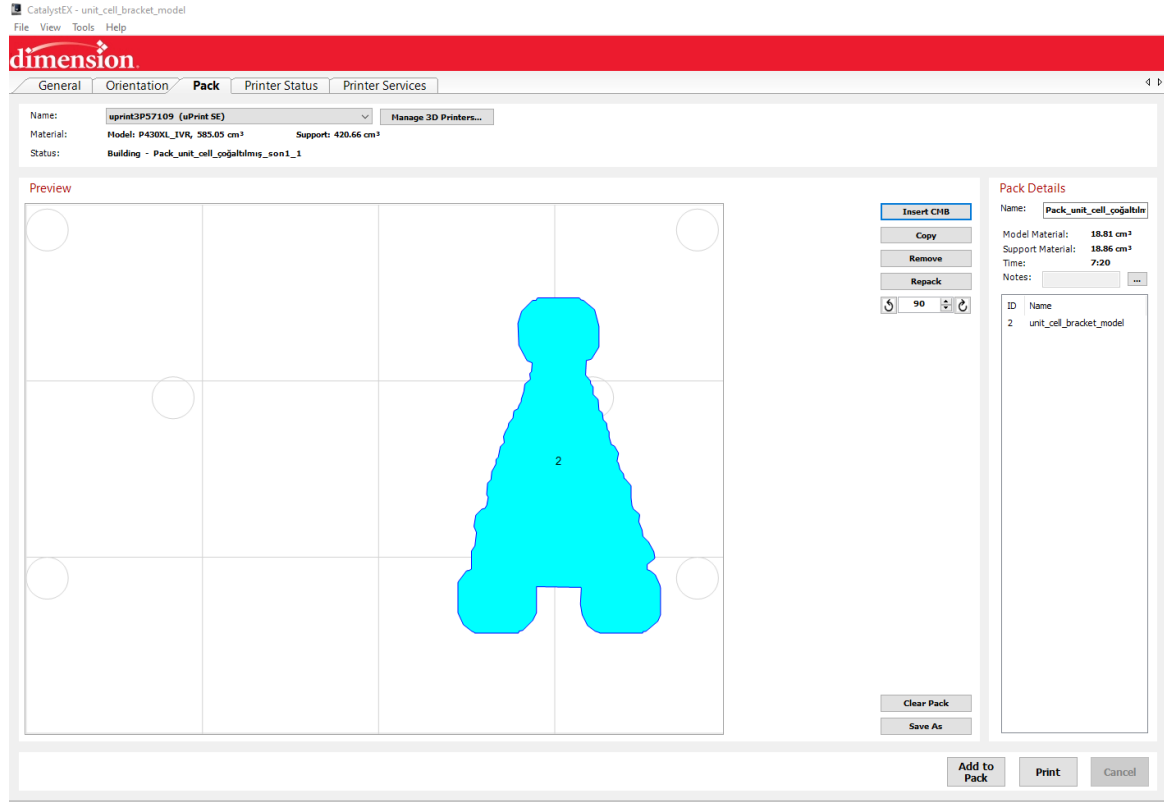


Resim 6.11. Baskısı alınacak modelin genel özellikleri



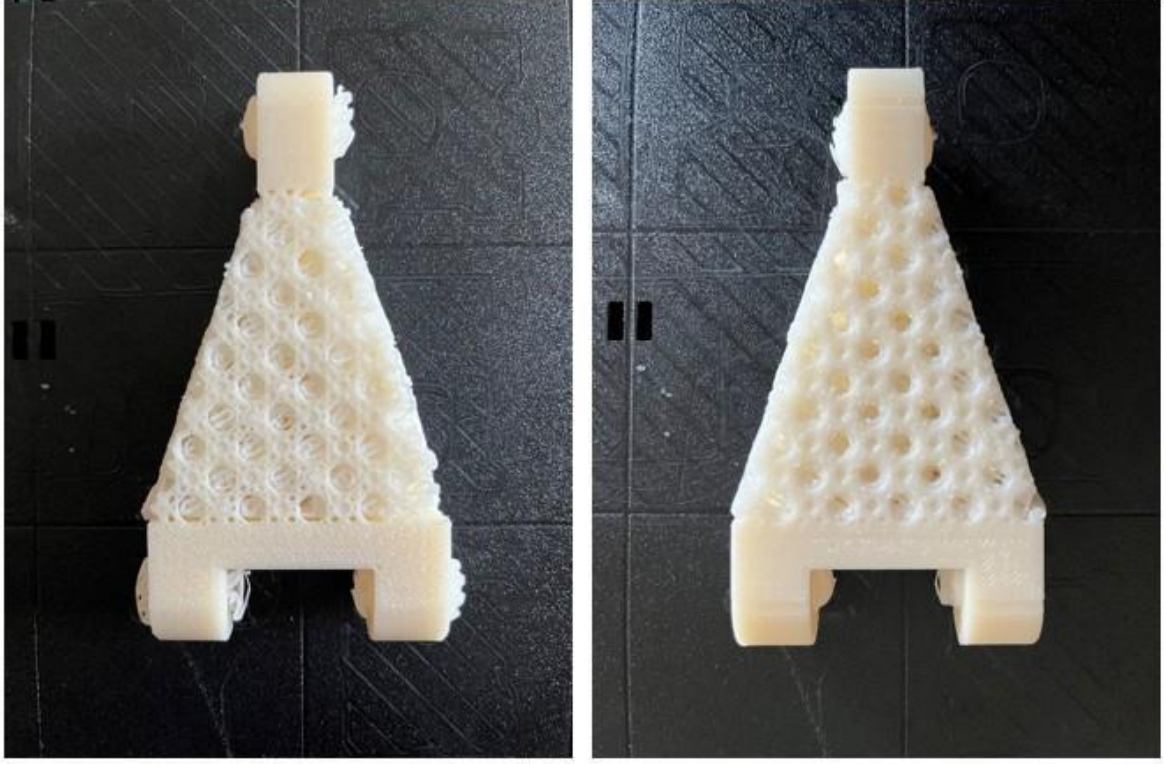
Resim 6.12. Oluşturulan destek malzemesinin ve modelin görüntüsü

Katman kalınlığı, model hacmi ve destek hacmi, baskı ölçeği belirlenen modelin, x-y-z düzlemindeki konumu ve tablanın üzerindeki konumu belirlenmiştir (Resim 6.12 ve Resim 6.13). Tahmini baskı sürecinin 7 saat 20 dakika olduğu belirlenmiştir. Daha sonra “print” komutu ile baskı işlemi başlatılmıştır.

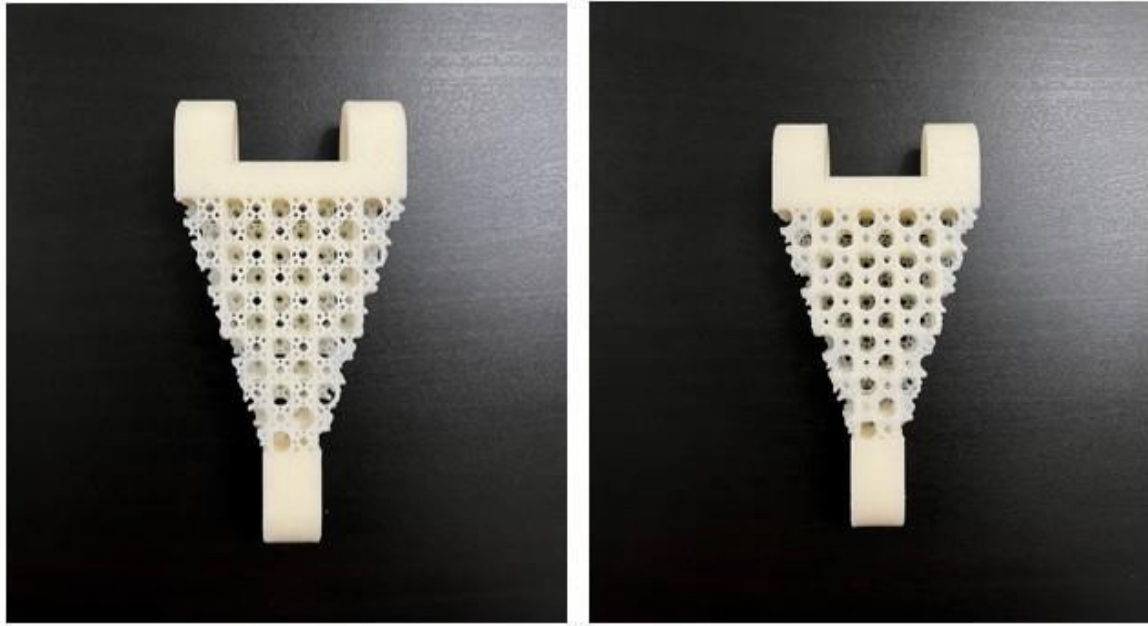


Resim 6.13. Baskısı alınacak modelin tabladaki konumu

Baskı süreci tamamlanan tork bağlantısı modeli Resim 6.14’de verilmiştir. Diğer modelde olduğu gibi destek malzemenin çözülmesi için kimyasal çözücü içerisinde yaklaşık 7 saat bekletilmiştir. Daha sonra destek malzemesi temizlenen model su ile temizlenmiştir. Çözücü kimyasalda destek malzemesi temizlenen tork bağlantısı Resim 6.14’te verilmiştir.



Resim 6.14. Baskısı tamamlanan tork bağlantısı



Resim 6.15. Destekleri temizlenmiş tork bağlantısı

uPrint® SE cihazı ile baskısı alınan modellerin genel özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. uPrint SE cihazı ile üretilen modellerin özellikleri

Model	Üretim süresi	Malzeme hacmi	Destek hacmi
Biyomimetik tabanlı kafes yapısı	6 saat 4 dakika	566,78 cm ³	400,01 cm ³
Optimize edilmiş tork bağlantısı	7 saat 20 dakika	585,05 cm ³	420,66 cm ³

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada mühendisliğin birçok alanında kullanılan topoloji optimizasyonu kafes yapısı ile sağlanmıştır. Optimizasyonda CAD programlarında bulunan kafes yapıları kullanılmak yerine biyomimetik tabanlı kafes yapısı oluşturulmuştur. Eklemeli imalatın sağlamış olduğu tasarım özgürlüğü sayesinde doğada bulunan karmaşık yapıların tasarımlarda kullanılmasının önü açılmıştır. Bu çalışmada da *Eucpletella aspergillum* diğer adıyla Venüs'ün çiçek sepeti kafes tasarımında esin kaynağı olarak kullanılmıştır.

Öncelikle ilham alınan cam süngerin hiyerarşik yapısı detaylıca incelenmiş ve daha sonrasında incelenen yapının 2B temel görüntüsü oluşturulmuştur. Bu temel görüntü Rhinoceros programında öncelikle tel kafes olarak oluşturulmuştur. Sonrasında 3B katı model haline getirilmiştir. Böylelikle birim hücre oluşturulmuş olmuştur. Oluşturulan birim hücre periyodik bir şekilde çoğaltılarak kübik kafes yapıları elde edilmiştir. Daha sonra bu çalışma kapsamında oluşturulan kafes yapısı uçaklarda iniş ekipmanında bulunan tork bağlantısı mekanizmasının üst tork bağlantısı parçasına uygulanmıştır.

Oluşturulan biyomimetik tabanlı kafes yapısı literatürde daha önce üst tork bağlantısına uygulanmamıştır. Bu bağlamda üst tork bağlantısının hafifliği sağlanırken dayanımının da korunması amaçlanmaktadır. Bu nedenle Rhinoceros yazılımında 3B modellenen kafes yapısı oluşturulan bu kafes yapısı ANSYS yazılımında statik ve dinamik analiz yöntemi ile analiz edilmiştir.

Kafes yapısının uygulandığı parça olan üst tork bağlantısının dayanımını anlamak açısından piyasada bulunan bir tork bağlantısına ve kafes yapısı uygulanarak optimize edilen tork bağlantısına yapısal analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında mevcut üst tork bağlantısının hacminin %72,72 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Parçanın ağırlığı hafifletilirken dayanımda gerçekleşen düşüş kabul edilir sınırlar içerisinde kalmıştır.

Literatürde üst tork bağlantısı ile ilgili yapılan çalışmalarda daha çok malzeme değişikliği yapılarak optimizasyon yapıldığı görülmüştür. Kafes yapılarının kullanılarak topoloji optimizasyonu yapılan bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yenilikçi olarak literatüre katkı sağlanmıştır.

Literatürde biyomimetik tabanlı kafes yapıları ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Ancak çalışmaların çoğunluğunda kafes yapıları kendi içinde incelenmiştir. Biyomimetik tabanlı kafes yapısının ilham alınan canlının kuvvetlere verdiği tepkiye dayanarak veya çevre koşulları dikkate alınarak bu şartlara uygun olan bir parçaya uygulandığı çalışma sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada ilham alınan canlı basınç ve burulmaya karşı dayandığı için buna uygun bir parça olan üst tork bağlantısı seçilerek uygulama yapılmıştır.

Piyasada mevcut olan tork bağlantıları geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmektedir. Bu nedenle üretimi zahmetli ve kısıtlayıcıdır. Bu çalışmada önerilen eklemeli imalat teknolojisi ile parçanın hem üretimi kolay hal gelecek hem de karmaşık geometriye sahip yapı üretimi mümkün olacaktır.

Yapısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

ANSYS yazılımında gerçekleştirilen analiz sonuçları von Mises gerilme, total deformasyon maksimum kesme elastik gerinim, eşdeğer elastik gerinim ve maksimum kesme gerilmesi değerleri üzerinde incelenmiştir. 3B katı model ANSYS analiz programında statik analiz yapılması için gereken belirli sınır şartları daha önce girilmiştir. Belirlenen sınır şartlarına bağlı olarak yapılan von Mises gerilme, total deformasyon ve maksimum kalıcı gerilme sonuçları alınmıştır. Kafes modeline 10 N kuvvet uygulanmıştır. Biyomimetik tabanlı kafes yapısına yapılan statik analiz sonucunda eformasyon miktarı 0,0028555 mm olarak gözlemlenmiştir. Von Mises gerilme değeri 1,4183 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı kuvvet altında maksimum kesme gerilme miktarı ise 0,73467 MPa olduğu görülmüştür.

Kafes yapısı aynı zamanda dinamik analiz de uygulanmıştır. ANSYS yazılımında explicit dynamics analizi için gereken belirli sınır şartları daha önce girilmiştir. Belirlenen sınır şartlarına bağlı olarak sonuçlar alınmıştır.

Bu çalışmada havacılıkta kullanılan tork bağlantısı parçasının topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Bu nedenle biyomimetik tabanlı kafes yapısı mevcut tork bağlantısına uygulanmış ve her iki parçanın da statik analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde mevcut tork bağlantısının hacminin %72,72 oranında hafifletildiği belirlenmiştir.

Orijinal tork bağlantısı ve optimize edilmiş tork bağlantısının statik analiz sonuçları karşılaştırıldığında ise optimize edilmiş tork bağlantısının dayanımının düştüğü görülmüştür. Bu düşüş kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

Biyomimetik tabanlı tasarımı ve analizinin ele alındığı bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla ilgili bilgiler aşağıda özetlenmiştir;

- Biyomimetik yaklaşımı kullanılarak cam süngerin hiyerarşik yapısından yola çıkılarak birim hücre oluşturuluş ve periyodik olarak çoğaltılarak biyomimetik tabanlı kafes yapısı oluşturulmuştur.
- Çalışma kapsamında kafes yapıları kullanılarak topoloji optimizasyonu uygulanmıştır.
- Çalışma kapsamında geliştirilen biyomimetik tabanlı birim hücre ilk defa üst tork bağlantısına uygulanmıştır.
- Tasarlanan biyomimetik tabanlı kafes yapısının birim hücresi oluşturulurken *E. Aspergillum* diğer adıyla Venüs'ün çiçek sepeti canlısının SEM görüntüleri incelenerek oluşturulmuştur.
- Birim hücre periyodik olarak çoğaltıldıktan sonra Rhinoceros programında boolean komutu ile nihai halini almıştır.
- Birim hücre üst tork bağlantısına boolean komutu ile çıkartılması ile optimize edilmiş tasarım elde edilmiştir.
- Biyomimetik tabanlı kafes modeli 1 mm kalınlığında iki plakanın arasına yerleştirildikten sonra ANSYS yazılımında statik analizi gerçekleştirilmiştir.
- Statik analiz sonucu elde edilen veriler değerlendirilmiştir.
- Mevcut tork bağlantısı piyasada bulunan bir tork bağlantısından referans alınarak modellenmiştir.
- Modellenen tork bağlantısına statik analiz uygulanmıştır.
- Tasarlanan biyomimetik tabanlı kafes yapısı mevcut tork bağlantısına uygulanarak tork bağlantısının ağırlığının hafifletilmesi amaçlanmıştır.
- Optimizasyonu sağlanan tork bağlantısının dayanım değerleri ve hacmi mevcut parça ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması göz önüne alındığında yapılacak çalışmalar aşağıdaki hususlar dikkate alınarak gerçekleştirilebilir;

- Literatürde biyomimetik tabanlı kafes tasarımlarına yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ilk defa biyomimetik tabanlı kafes yapısı üst tork bağlantısına uygulanmasında kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda bu uygulamanın kapsamı genişletilerek farklı parçalara da uygulanabilir.
- Biyomimetik yaklaşımla geliştirilen kafes yapıları ve uygulamaları literatüre katkıda bulunacaktır.
- Tez çalışmasında maddi yetersizlikler nedeniyle üretimi gerçekleştirilemeyen metal eklemeli imalat yöntemi gerçekleştirilerek ve üretimi sağlanan modellere basma testi uygulanarak analiz verileri ile basma testi verileri karşılaştırılabilir.
- Mevcut tork bağlantısı ve optimize edilmiş tork bağlantısının hacmi incelendiğinde azalması sağlanmasına karşın parçanın dayanımında düşüş olmuştur. Bu nedenle biyomimetik tabanlı kafes yapısının parçaya uygulanmasında parçada maksimum gerilmelerin olduğu yerlere göre kademeli kafes yapıları diğer bir adı ile derecelendirilmiş kafes yapıları olarak uygulanarak parçanın zorlandığı yerlerdeki dayanım düşüşü minize edilebilir.
- Kafes yapısının dayanımını artırmak amacıyla payanda çapında değişikliğe gidilebilir.
- Bu çalışmada birim hücre için gerçekleştirilen analiz verileri kullanılarak başka çalışmalarda kullanılabilir.
- Bu çalışmada bilham alınan deniz süngerinin 2B temel görüntüsü referans alınarak kafes yapısı oluşturulmuştur. Farklı kafes yapıları oluşturularak optimizasyon uygulamalarında kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Aircraft Landing Gear Systems. (2014). F. A. Authority içinde, *Aviation Maintenance Technical Handbook* (s. 20-22).
- Alammar, A., Kois, J. C., Revilla-León, M., & Att, W. (2022). Additive Manufacturing Technologies: Current Status and Future Perspectives. *Journal of prosthodontics : official journal of the American College of Prosthodontists*, 31(S1), 4-12.
- Alammar, A., Kois, J., Revilla-León, M., & Att, W. (2022). Additive Manufacturing Technologies: Current Status and Future Perspectives. *Journal of Prosthodontics*, 31(1), 4-12.
- Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Al-Rub, R. A. (2018). Topology Mechanical Property Relationship Of 3D Printed Strut, Skeletal And Sheet Based Periodic Metallic Cellular Materials. *Additive Manufacturing*, 19, 167-183.
- Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Al-Rub, R. K. (2018). Topology-mechanical Property Relationship of 3D Printed Strut, Skeletal, and Sheet Based Periodic Metallic Cellular Materials. *Additive Manufacturing*, 19, 167-183.
- Alomar, Z., & Concli, F. (2020). A Review of the Selective Laser Melting Lattice Structures And Their Numerical Models. *Advanced Engineering Materials*, 22(12), 2000611.
- An, X., & Fan, H. (2016). Hybrid Design And Energy Absorption of Luffa-sponge-like hierarchical Cellular Structures. *Materials & Design*, 106, 247-257.
- Arasuna, A., Kigawa, M., Fujii, S., Endo, T., Takahashi, K., & Okuno, M. (2018). Structural Characterization Of The Body Frame And Spicules Of A Glass Sponge. *Minerals*, 8(3).
- Arravind, R., Saravanan, M. K., & Rijuvan, M. (2013). FEA Based Analysis Of Composite Torque Link For A Passenger Aircraft Landing Gear. *International Conference on Advance Engineering & Technology*, 1.
- Azman, A. H., & Nasir, A. R. (2019). Lattice Structure Design Optimisation For Additive Manufacturing Using Finite Element Analysis. *Perintis eJournal*, 9(2), 37-47.
- Berrocal, L., Fernández, R., González, S., Periñán, A., Tudela, S., Vilanova, J., . . . Lasagni, F. (2019). Topology Optimization And additive Manufacturing for Aerospace. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(2), 83-95.
- Bhate, D., Penick, C. A., Ferry, L. A., & Lee, C. (2019). Classification And Selection Of Cellular Materials in Mechanical Design: Engineering and Biomimetic Approaches. *Designs*, 2(19), 2-31.
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive Manufacturing Methods And Modelling Approaches: A Critical Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 389-405.
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., . . . du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, 110008.

- Briguiet, G., & Egan, P. (2020). Structure, Process, And Material Influences For 3D Printed Lattices Designed With Mixed Unit Cells. *ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences And Computers And Information in Engineering Conference*, 11A.
- Cengiz Bulut, N., & Özdemir, V. (2022). Design For Additive Manufacturing With Biomimetic Approaches. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 21(2), 86-96.
- Cengiz, N. Z., Biçer, D., & Başak, H. (2021). *Design For Additive Manufacturing For Motorcycle Knee Pad*. Innovative Approaches in Additive Manufacturing Congress (IA4AM), (s. 31-43). Ankara, Turkey.
- Chen, Z., Xie, Y. M., Wu, X., Wang, Z., Li, Q., & Zhou, S. (2019). On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces. *Materials & design*, 183, 108109.
- Cheng, L., Bai, J., & To, A. C. (2019). Functionally Graded Lattice Structure Topology Optimization For the Design Of Additive Manufactured Components With Stress Constraints. *Computer Methods in Applied Mechanics And Engineering*, 334-359.
- Datta, P., Vyas, V., Dhara, S., Chowdhury, A. R., & Barui, A. (2019). Anisotropy Properties of Tissues: A Basis for Fabricaton of Biomimetic Anisotropic Scaffolds for Tissue Engineering. *Journal of Bionic Engineering*, 16(5), 842-868.
- Deokar, A. Y., & Kale, S. (2012). Theoretical Review on Components And Functioning Of Hydraulically Operated Retractable Aircraft Landing Gear. *INSARM ARMS 2012*.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June, 11*, s. 545-554. Modena.
- du Plessis, A., Babafemi, A. J., Paul, S. C., Panda, B., Tran, J. P., & Broeckhoven, C. (2021). Biomimicry For 3D Concrete Prinring: A Review And Perspective. *Additive Manufacturing*, 38, 101823.
- du Plessis, A., & Broeckhoven, C. (2019). Looking Deep Into Nature: A Review Of Micro-computed Tomography in Biomimicry. *Acto Biomaterialia*, 85, 27-40.
- du Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., Hands, C. H., Kunju, R., & Bhate, D. (2019). Beautiful And Functional: A Review Of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 408-427.
- du Plessis, A., Yadroitsava, I., & Yadroitsev, I. (2018). Ti6Al4V Lightweight Lattice Structures Manufactured by Laser Powder Bed Fusion For Load-bearing Applications. *Optics and Laser Technology*, 108, 521-528.
- Egan, P. F., & Briguiet, G. (16-20 August). Structure, Process, and Material Influences for 3D Printed Lattices Designed With Mixed Unit Cells. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 84003, s. V11AT11A033. St. Louis, USA.

- Fei, C., Liu, H., Zhu, Z., An, L., Li, S., & Lu, C. (2021). Whole-process design and experimental validation of landing gear lower drag stay with global/local linked driven optimization strategy. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(2), 318-328.
- Feng, J., Liu, B., Lin, Z., & Fu, J. (2021). Isotropic Octet-truss Lattice Structure Design And Anisotropy Control Strategies For Implant Application. *Materials & Design*, 203.
- Fernandes, M. C., Aizenberg, J., Weaver, J. C., & Bertoldi, K. (2021). Mechanically Robust Lattices Inspired By Deep-sea Glass Sponges. *Nature Materials*, 20, 237-241.
- Fernandes, M. C., Sadaat, M., Dubois, P. C., Inamura, C., Sirota, T., Milliron, G., . . . Weaver, J. C. (2021). Mechanical And Hydrodynamic Analysis Of Helical Strake-like Ridges in A Glass Sponge. *Journal Of The Royal Society Interface*, 18(182), 20210559.
- Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., . . . Zhang, S. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- Gardan, J. (2016). Additive Manufacturing Technologies: State of The Art And Trends. *International Journal of Production Research*, 54(10), 3118-3132.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies* (Cilt 17). Cham, Switzerland.
- Guariento, L., Buonamici, F., Marzola, A., Volpe, Y., & Governi, L. (2020). Graded Gyroid Structures For Load Bearing Orthopedic Implant. *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, (s. 02SAMA20-1-02SAMA20-5).
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive Manufacturing: Technology, Applications And Research Needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215-243.
- Ha, N. S., & Lu, G. (2020). A Review Of Recent Research on Bio-inspired Structures And Materials For Energy Absorption Applications. *Composites Part B: Engineering*, 181.
- Ha, N. S., & Lu, G. (2020). A Review Of Recent Research On Bio-inspired Structures And Materials For Energy Absorption Applications. *Composites Part B: Engineering*, 181.
- Ha, N. S., Lu, G., & Xiang, X. (2019). Energy Absorption Of A Bio-inspired Honeycomb Sandwich Panel. *Journal Of Material Science*, 54, 6286-6300.
- Han, J., Hui, Z., Tian, F., & Chen, G. (2021). Review on Bio-inspired Flight Systems And Bionic Aerodynamics. *Chinese Journal Of Aeronautics*, 34(7), 170-186.
- Han, Y., & Lu, W. F. (2018). A Novel Design Method for Nonuniform Lattice Structures Based on Topology Optimization. *Journal of Mechanical Design*, 140(9), 091403.

- Hanks, B., Dinda, S., & Joshi, S. (26-29 August 2018). Redesign of the femoral stem for a total hip arthroplasty for additive manufacturing. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 51753, p. V02AT03A037), 51753, s. V02AT03A037. Quebec, Canada.
- Helguero, C. G., Amaya, J. L., Komatsu, D. E., Pentyala, S., Mustahsan, V., Ramirez, E. A., & Kao, I. (2017). Trabecular Scaffolds' Mechanical Properties Of Bone Reconstruction Using Biomimetic Implants. *Procedia CIRP*, 65, 121-126.
- Helou, M., & Kara, S. (2018). Design, Analysis And Manufacturing Of Lattice Structures: An Overview. *International Journal Of Computer Integrated Manufacturing*, 31(3), 243-261.
- Hoang, V.-N., Tran, J., Vu, V.-T., & Xuan, H. N. (2020). Design Of Lattice Structures With Direct Multiscale Topology Optimization. *Composite Structures*, 252, 1-13.
- Islam, M. K., Hazell, P. J., Escobedo, J. P., & Wang, H. (2021). Biomimetic Armour Design Strategies For Additive Manufacturing: A review. *Materials & Design*, 205, 109730.
- Internet: uPrint SE. Genel Bakış. URL: <https://versus.com/tr/stratasys-uprint-se>, Son Erişim Tarihi: 28.12.2022
- Jamshidinia, M., Kong, F., & Kovacevic, R. (2013). The Numerical Modeling of Fatigue Properties of A Bio-compatible Dental Implant Produced by Electron Beam Melting®(EBM). In *2013 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- Jin, N., Wang, F., Wang, Y., Zhang, B., Cheng, H., & Zhang, H. (2019). Failure and Energy Absorption Characteristics of Four Lattice Structures Under Dynamic Loading. *Materials and Design*, 107655.
- Khosroshahi, S. F., Duckworth, H., Galvanetto, U., & Ghajari, M. (2019). The Effect Of Topology And Relative Density Of Lattice Liners on Traumatic Brain Injury Mitigation. *Journal of Biomechanics*.
- Khosroshahi, S. F., Duckworth, H., Galvanetto, U., & Ghajari, M. (2019). The Effects of Topology and Relative Density of Lattice Liners on Traumatic Brain Injury Mitigation. *Journal of Biomechanics*, 97, 109376.
- Kim, J., & Yoo, D. J. (2020). 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(4), 527-550.
- Kim, J., & Yoo, D.-J. (2020). 3D Printed Compact Heat Exchangers With Mathematically Defined Core Structures. *Journal Of Computational Design And Engineering*, 7(4), 527-550.
- Kladovasilakis, N., Tsongas, K., & Tzetzis, D. (2020). Finite Element Analysis Of Orthopedic Hip Implant With Functionally Graded Bioinspired Lattice Structures. *Biomimetics*, 5(3), 44.
- Krishnan, A., Thejus, V., & Arjun, B. (2017). Numerical Investigation Of Structural Design Of Torsion Links in A Landing Gear Retraction Mechanism. *2017 2nd International Conference For Convergence in Technology (12CT)*, (s. 382-388).

- Leary, M., Mazur, M., Williams, H., Yang, E., Alghamdi, A., Lozanovski, B., . . . Brandt, M. (2018). Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials and Design*, 157, 179-199.
- Lei, H.-Y., Li, J.-R., & Wang, Q.-H. (2020). Parametric Design Of Voronoi-based Lattice Porous Structures. *Materials & Design*, 191.
- Li, D., Dai, N., Tang, Y., Dong, G., & Zhao, Y. F. (2019). Design and Optimization of Graded Cellular Structures with Triply Periodic Level Surface-based Topological Shapes. *Journal of Mechanical Design*, 141(7).
- Li, D., Liao, W., Dai, N., & Xie, Y. M. (2020). Anisotropic Design and Optimization of Conformal Gradient Lattice. *Computer-Aided Design*, 119, 102787.
- Li, D., Liao, W., Dai, N., & Xie, Y. M. (2020). Anisotropic Design And Optimization Of Conformal Gradient Lattice Structures. *Computer-Aided Design*, 119, 102787.
- Libonati, F., Graziosi, S., Ballo, F., Mognato, M., & Giacomo, S. (2021). 3D-Printed Architected Materials Inspired By Cubic Bravais Lattices. *ACS Biomaterials Science & Engineering*.
- Liu, K., & Jiang, L. (2011). Bio-inspired design of multiscale structures for. *Nano Today*, 6(2), 155-175.
- Liu, Z., Lyu, T., & Zou, Y. (2021). A review on additive manufacturing of titanium alloys for aerospace applications: directed energy deposition and beyond Ti-6Al-4V. *Jom*, 73(6), 1804-1818.
- Mahatme, C., Giri, J., Chadge, R., & Sonwane, S. (2021). Compression Deformation Analysis Of Cellular Lattice Structure For Structural Optimization in Additive Manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 47(14), 4214-4220.
- Mahatme, C., Giri, J., Chadge, R., & Sonwane, S. (2021). Compression Deformation Analysis of Cellular Lattice Structure for Structural Optimization in Additive Manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4214-4220.
- Maskery, I., Aremu, A. O., Parry, L., Wildman, R. D., Tuck, C. J., & Ashcroft, I. A. (2018). Effective Design and Simulation of Surface-based Lattice Structures Featuring Volume Fraction And Cell Type Grading. *Materials and Design*, 155, 220-232.
- Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A., Panesar, A., Williams, C., Tuck, C., . . . Hague, R. (2018). Insights Into The Mechanical Properties Of Several Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structures Made By Polymer Additive Manufacturing. *Polymer*, 152, 62-71.
- Mechanical Behaviour of Additively-manufactured Polymeric Octet-truss Lattice Structures Under Quasi-static and Dynamic Compressive Loading. (106-118). *Materials & Design*, 162, 2019.
- Melchels, F. P., Domingos, M. A., Klein, T. J., Malda, J., Bartolo, P. J., & Huttmacher, D. W. (2012). Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, 37, 1079-1104.

- Nagesha, B. K., Dhinakaran, V., Varsha Shree, M., Manoj Kumar, K. P., Chalawadi, D., & Sathish, T. (2020). Review on characterization and impacts of the lattice structure in. *Materials Today: Proceedings*, 21, 916-919.
- Nagesha, B., Dhinakaran, V., Varsha Shree, M., Manoj Kumar, K., Chalawadi, D., & Sathish, T. (2020). Review on Characterization And Impact Of The Lattice Structure in Additive Manufacturing. *Materials Today: Proceedins*, 21(1), 916-919.
- Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., & Jeng, J. Y. (2019). A State-of-the-art Review on Types, Design, Optimization, and Additive Manufacturing of Cellular Structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9), 3489-3510.
- Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., & Jeng, J.-Y. (2019). A State Of The Art Review on Types, Design, Optimization, And Additive Manufacturing Of Cellular Structures. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 104((9-12)), 3489-3510.
- Nguyen, C. P., Kim, Y., & Choi, Y. (2019). Design For Additive Manufacturing Of Functionally Graded Lattice Structures: A Design Method With Process Induced Anisotropy Consideration. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology*, 8, 29-45.
- Nguyen, D. S. (2019). Design Of Lattice Structure For Additive Manufacturing in CAD Environment. *Journal Of Advanced Mechanical Design, Systems, And Manufacturing*, 13(3), JAMDSM0057.
- Nikham, H., & Akbarzadeh, A. (2020). Graded Lattice Structures: Simultaneous Enhancement in Stiffness And Energy Absorption. *Materials & Design*, 196.
- Niu, J., Choo, H. L., Sun, W., & Mok, S. H. (2018). Numerical Study On Load-Bearing Capabilities Of Beam-Like Lattice Structures With Three Different Unit Cells. *International Journal of Mechanics And Materials in Design*, 14(3), 443-460.
- Patil, A. V., Kumar, R. C., & Patel, R. (2019). Topology Optimization Of A Lower Barrel in Nose Landing Gear.
- Pereira, A., Ferreira, A. F., Rodrigues, A. E., Ribeiro, A. M., & Regufe, M. J. (2022). Additive Manufacturing for Adsorption-Related Applications—A review. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 4(1), e10108.
- Plocher, J., & Panesar, A. (2019). Review on design and structural optimisattion in additive manufacturing: Towards next-generation lightweiht structures. *Materials & Design*, 183.
- Prasad, V. J. (2020). Design And Structural Analysis Of Aircraft Landing Gear Using Different Alloys. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 11(7), 7-14.
- Radman, A., Huang, X., & Xie, Y. M. (2012). Topological Optimization For The Design of Microstructures of Isotropic Cellular Materials. *Engineering Optimization*, 45(11), 1331-1348.

- Rahmani, M., & Behdinan, K. (2019). Parametric study of a novel nose landing gear shimmy. *Journal of Sound and Vibration*, 457, 299-313.
- Rahmani, M., & Behdinan, K. (2020). Structural design and optimization of a novel shimmy damper for nose landing gears. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62, 2783-2803.
- Rawal, S., Brantley, J., & Karabudak, N. (2013). Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy Components for Spacecraft Applications. In *2013 6th international conference on recent advances in space technologies (RAST)*, (s. 5-11).
- Schiller, G. J. (2015). Additive Manufacturing for Aerospace. In *2015 IEEE Aerospace Conference*, (s. 1-8).
- Seharing, A., Azman, A. H., & Abdullah, S. (2020). A review on Integration Of Lightweight Gradient Lattice Structures in Additive Manufacturing Parts. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6), 1-21.
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, And Applications. *2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing (SMPM 20019)*, 35, s. 1286-1296.
- Sharma, D., & Hiremath, S. S. (2022). Bio-inspired Repestable Lattice Structures For Energy Absorption: Experimental And Finite Element Study. *Composites Structures*, 283, 115102.
- Shi, G., Guan, C., Quan, D., Wu, D., Tang, L., & Gao, T. (2020). An Aerospace Bracket Designed By Thermo-elastic Topology Optimization And Manufactured By Additive Manufacturing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(4), 1252-1259.
- Siddique, S. H., Hazell, P. J., Wang, H., Escobedo, J. P., & Ameri, A. A. (2022). Lessons from Nature: 3D Printed Bio-inspired Porous Structures for Impact Energy Absorption – A Review. *Additive Manufacturing*, 58, 103051.
- Şimşek, U., Gayir, C. E., Kiziltaş, G., & Şendur, P. (2020). An integrated homogenization-based topology optimization via RBF mapping strategies for additively manufactured FGLS and its application to bandgap structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 1361-1, 111(5), 1361-1374.
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185-200.
- Smith, M., Guan, Z., & Cantwell, W. J. (2013). Finite Element Modelling of the Compressive Response of Lattice Structures Manufactured Using the Selective Laser Melting Technique. *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 28-41.
- Soro, N., Brodie, E. G., Abdal-hay, A., Alali, A. Q., Kent, D., & Dargusch, M. S. (2022). Additive manufacturing of biomimetic Titanium-Tantalum lattices for biomedical implant applications. *Materials & Design*, 218, 110688.
- Sun, O., Aguila, B., Perman, J., Ivanov, A. S., Bryantsev, V. S., Earl, L. D., . . . Ma, S. (2018). Bio-inspired Nano-traps For Uranium Extaction From Seawater And Recovery From Nuclear Waste. *Nature Communications*, 9, 1644.

- Sundar, V. C., Yablon, A. D., Grazul, J. L., Ilan, M., & Aizenberg, J. (2003). Fibre-optical Features Of A Glass Sponge. *Nature*, 424, 899-900.
- Tang, Y., Dong, G., Zhou, Q., & Zhao, Y. F. (2018). Lattice Structure Design And Optimization With Additive Manufacturing Constraints. *IEEE Transactions on Automation Science And Engineering*, 15(4), 1546-1562.
- Tang, Y., Kurtz, A., & Zhao, Y. F. (2015). Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) Based Design Method for Lattice Structure To Be Fabricated by Additive Manufacturing. *Computer-Aided Design*, 69, 91-101.
- Tang, Y., Kurtz, A., & Zhao, Y. F. (2015). Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, 69, 91-101.
- Tao, W., & Leu, M. (2016). Design of lattice structure for additive manufacturing. *International Symposium on Flexible Automation (ISFA)*, (s. 325-332).
- Tavangarian, F., Sadeghzad, S., & Davami, K. (2021). A Novel Biomimetic Design Inspired By Nested Cylindrical Structures Of Spicules. *Journal of Alloys and Compounds*, 864, 158197.
- Thota, P., Krauskopt, B., & Lowenberg, M. (2008). *Interaction Of Torsion And Lateral Bending in Aircraft Nose Landing Gear Shimmy*.
- Thuis, H. (2004). *The Development Of Composite Landing Gear Components For Aerospace Applications*.
- Tkac, J., Samborski, S., Monkova, K., & Debski, H. (2020). Analysis Of Mechanical Properties Of A Lattice Structure Produced With The Additive Technology. *Composite Structures*, 242.
- Top, N., Şahin, İ., & Gökçe, H. (2019). Doku Mühendisliğinde Yapay İskele Tasarımı. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 18(3), 209-228.
- Top, N., Şahin, İ., Gökçe, H., & Gökçe, H. (2021). Computer-Aided Design And Additives Manufacturing Of Bone Scaffolds For Tissue Engineering: State Of The Art. *Journal Of Materials Research*, 36, 3725-3745.
- Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Designing for Additive Manufacturing. *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012*, 3, s. 632-637.
- Voucu Andrei, D., Hadar, A., & Vlascenau, D. (2021). Benefits Of 3D Printing Technologies For Aerospace Lattice Structures. *Scientific Bulletin Of Naval Academy*, 24(1), 8-16.
- Wang, C., Zhu, J. H., Zhang, W. H., Li, S. Y., & Kong, J. (2018). Concurrent topology Optimization Design of Structures and Non-uniform Parameterized Lattice Microstructures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(1), 35-50.
- Wang, D., Chen, D., & Chen, Z. (2020). Recent Progress in 3D Printing Of Bioinspired Structures. *Frontiers in Materials*, 7.

- Weaver, J., Kazancı, M., Dauphin, Y., & Morse, D. (2006). Micromechanical Properties Of Biological Silica in Skeletons Of Deep-Sea Sponges. *Journal of Materials Research*, 21(8).
- Woesz, A., Weaver, J. C., Kazancı, M., Dauphin, Y., Aizenberg, J., Morse, D. E., & Fratzl, P. (2006). Micromechanical Properties Of Biological Silica in Skeletons Of Deep-sea Sponges. *Journal Of Materials Research*, 21, 2068-2078.
- Wong, J., Ryan, L., & Kim, I. Y. (2018). Design optimization of aircraft landing gear assembly under dynamic loading. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(3), 1357-1375.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- Wu, Z., Xia, L., Wang, S., & Shi, T. (2019). Topology optimization of hierarchical lattice structures with. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 345, 602-617.
- Xiao, Z., Yang, Y., Bai, Y., Song, C., & Wang, D. (2018). Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via. *Materials and Design*, 143, 27-37.
- Xu, S., Shen, J., Zhou, S., Huang, X., & Xie, Y. M. (2016). Design Of Lattice Structures With Controlled Anisotropy. *Materials & Design*, 93, 443-447.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A., & Raymont, D. (2012). Evaluations of Cellular Lattice Structures Manufacture Using Selective Laser Melting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 62, 32-38.
- Yang, S., Yang, H., Chi, X., Evans, J. R., Thompson, I., Cook, R. J., & Robinson, P. (2008). Rapid Prototyping of Ceramic Lattices for Hard Tissue Scaffolds. *Materials and Design*, 29(9), 1802-1809.
- Yang, Y., Song, X., Li, X., Chen, Z., Zhou, C., Zhou, Q., & Chen, Y. (2018). Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: From Materials To Functional Structures. *Advanced Materials*, 30(36).
- Yang, Y., Song, X., Li, X., Chen, Z., Zhou, C., Zhou, Q., & Chen, Y. (2018). Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: From Materials To Functional Structures. *Advanced Materials*, 30(36), 1706539.
- Yusuf, S. M., Cutler, S., & Gao, N. (2019). Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. *Metals*, 9(12), 1286.
- Zadpoor, A. A. (2019). Mechanical performance of additively manufactured meta-biomater. *Acta Biomaterialia*, 85, 41-59.
- Zhang, C., Liu, J., Yuan, Z., Xu, S., Zou, B., Li, L., & Ma, Y. (2021). A Novel Lattice Structure Topology Optimization Method with Extreme Anisotropic Lattice Properties. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(5), 1367-1390.
- Zhang, M., Shang, J., Guo, S., Hur, B., & Yue, X. (2020). Numerical Investigation of Effective Thermal Conductivity of Strut-Based Cellular Structures Designed by Spatial Voronoi Tessellation. *Materials*, 14(1), 138.

- Zhang, T., & Liu, C.-T. (2022). Design of Titanium Alloys by Additive Manufacturing: A Critical Review. *Advanced Powder Materials*, 1.
- Zhao, M., Fu, G., Zhang, D. Z., Zhang, T., & Zhou, H. (2018). Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM. *Materials*, 11(12), 2411.
- Zhong, T., He, K., Li, H., & Yang, L. (2019). Mechanical properties of Lightweight 316L Stainless Steel Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting. *Materials & Design*, 181, 108076.
- Zhou, M., Hou, J., Zhang, G., Luo, C., Zeng, Y., Mou, S., . . . Sun, J. (2019). Tuning The Mechanics of 3D-Printed Scaffolds by Crystal Lattice-like Structural Design for Breast Tissue Engineering. *Biofabrication*, 12(1), 015023.
- Zhu, Y., Joralmon, D., Shan, W., Chen, Y., Rong, J., Zhao, H., . . . Li, X. (2021). 3D Printing Biomimetic Materials And Structures For Biomedical Applicaitons. *Bio-Design And Manufacturing*, 4, 405-428.



Gazili olmak ayrıcalıktır