



İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ OMURGA İMPLANT TASARIMI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

DOCTORAL DISSERTATION

Mehmet Akif OYMAK



İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ OMURGA İMPLANT TASARIMI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Akif OYMAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Erkan BAHÇE

MALATYA
2026

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERE ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE
ETİK ve YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

18/05/2026

İnönü Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak, **Doç. Dr. Erkan BAHÇE** danışmanlığında hazırlayıp sunduğum “Eklemeli İmalat ile Üretilen Gözenekli Omurga İmplant Tasarımı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı Doktora tezimde:

1. ETİK ve BİLİMSEL SORUMLULUKLARIM:

Tezimde yer alan verileri, bilgileri ve belgeleri akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

Çalışmada yararlandığım tüm kaynaklara bilimsel kurallara uygun şekilde atıfta bulunduğumu ve kaynakça gösterimde APA 7. baskı kurallarına uyduğumu,

Tezimin özgün olduğunu, çalışma ve yazım sürecinde patent ve telif haklarını ihlal edici hiçbir davranışta bulunmadığımı,

Aksi bir durumda doğabilecek tüm hukuki ve akademik sonuçları kabul ettiğimi,

2. YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN BEYANIM:

(X) Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan faydalanmadım.

() Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan faydalandım.

Bu durumda:

Yapay zekâ araçlarını yalnızca bilimsel üretim sürecini desteklemek amacıyla kullandığımı,

Kullanımımın hipotez geliştirme, teorik tartışma ve yorumlama gibi üst düzey akademik becerileri içermediğini,

Kullanımımın tezin özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmadığını,

Usulsüz kullanımlara (kaynak göstermeksizin metin üretimi, yanıltıcı kaynak gösterimi, otomatik içeriklerin özgün eser gibi sunulması vb.) kesinlikle başvurmadığımı,

Kullanılan yapay zekâ araçlarının ve işlevlerinin, danışmanımın bilgisi dâhilinde, ekte verilen tabloda şeffaf biçimde belirtildiğini,

Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üreten Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber’de belirtilen ilkelere riayet ettiğimi,

Kabul ve taahhüt ederim.

Mehmet Akif OYMAK

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	iv
TEŞEKKÜR	vi
ÖZET	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR.....	7
2.1. İmplant Malzemeleri.....	7
2.2. 3B ile Yazdırılmış Omurga İmplantı.....	7
2.3. Biyomimikri Tasarım	9
2.4. Biyobozunur Omurga İmplantları	10
2.5. Optimize Edilmiş Omurga İmplant Tasarımı	13
2.6. SLA (Stereolithography) ile İmplant Üretimi.....	14
2.7. Amaç ve Hedefler	15
2.7.1. Amaçlar.....	15
2.7.2. Hedefler	16
2.7.3. Hipotez.....	16
3. GENEL BİLGİLER	18
3.1. Biyobozunur Polimerler	18
3.2. Latis (Kafes) İmplant Tasarımı.....	20
3.3. Biyomimikri Tasarım	22
3.4. Genetik Algoritmalarla Parametrik Tasarım	25
3.5. Eriyik Filamentli Üretim (EFÜ).....	29
3.6. Stereolitografi Yöntemi	30
3.7. SEM-EDX Analizi.....	31
3.8. FTIR Analizi.....	32
4. MATERYAL VE METOT.....	34
4.1. Materyal	34
4.2. Metot.....	34
4.2.1 Gözenekli modeller.....	35
4.2.2. Gözenekli vücut içi lomber kafesinin tasarımı.....	35
4.2.3. Gözenek yapıları ile tasarlanan implantların L3-L4 omurga kemiklerine montajı.....	37
4.2.4. Gözenekli yapıların sonlu elemanlar modeli mesh ve sınır durumu	37

4.2.5. Çok amaçlı genetik algoritma ile silindirik polar YMK latis yapı tasarımı	39
4.2.6. Biyomimikri polar YMK parametrik tasarımlar	41
4.2.7. Polar YMK latis silindir yapıların üretimi.....	45
4.2.8. Polar YMK latis yapılarda modelleme, ağ oluşturma ve temas ayarları.....	46
4.2.9. Polar YMK latis yapılarda teorik ve deneysel doğrulama	49
4.2.10. SLA ile üretim metodu	50
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	56
5.1. Sonlu Elemanlar ile L3-L4 Omurga İmplatı Analizi	56
5.1.1. Sonlu elemanlar ile lomber omurga implantının sonuç ve tartışması.....	60
5.2. Polar YMK Latis Parametrik Dizaynların Sonuç ve Tartışması.....	61
5.2.1. Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapıların klinik faydaları ve yenilikleri.....	70
5.2.2. Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapıların sonuçları	72
5.3. HAp katkılı SLA ile Üretilen Genetik Algoritmalarla Parametrik Modellemeli Polar YMK Latis Yapıların Bulguları	73
5.3.1. HAp katkılı SLA ile üretilen YMK latis yapının FTIR analizi	79
5.3.2. HAp katkılı SLA ile üretilen genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapıların sonuç ve tartışmaları.....	85
6. SONUÇ	87
6.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	87
6.2. Öneriler	88
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ.....	101

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Erkan BAHÇE'ye,

Tez çalışmasının bazı aşamalarında yardımlarını esirgemedi destek olan ikinci danışman hocam Doç. Dr. Gurminder Singh'e,

Kimyasal deneylerinin gerçekleştirilmesinde sağladıkları desteklerden dolayı hocam Prof. Dr. Süleyman KÖYTEPE'ye,

Tez çalışması esnasında 2214-A TÜBİTAK yurtdışı doktora sırası araştırma bursu ile vermiş oldukları destekten dolayı TÜBİTAK kurumuna,

Tezin uygulama aşamasında 4421 ID numaralı proje ile vermiş oldukları maddi destekten dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine,

Çalışmalarımda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

ÖZET

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ OMURGA İMPLANT TASARIMI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Amaç: Bu çalışmanın amacı, biyomimetik yaklaşım temel alınarak geliştirilen HMK, YMK ve elmas gözenek yapılı lomber interbody füzyon kafeslerinin mekanik ve biyomekanik performanslarını incelemek, parametrik ve genetik algoritma destekli polar latis tasarımlarının spinal implant uygulamalarındaki potansiyelini değerlendirmektir.

Materyal ve Metot: Kafes yapılar parametrik modelleme ve genetik algoritma optimizasyonu kullanılarak tasarlanmıştır. İlk aşamada yapılar Eriyik filametli üretim yöntemi ile üretilmiş ve basma testleriyle mekanik performansları değerlendirilmiştir. Daha sonra aynı yapılar Stereolitografi tabanlı Anycubic Photon Mono M7 Pro yazıcı kullanılarak hidroksiapatit (HAp) katkılı denture pembe reçine ile yeniden üretilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Mekanik davranışlar sonlu elemanlar analizi ve deneysel testler ile incelenmiştir. Ayrıca üretilen malzemenin FTIR ve termal analizleri yapılmıştır.

Bulgular: Deneysel sonuçlar, gözenekli yapıların gerilme dağılımını düzenlediğini, stres koruma etkisini azalttığını ve biyomekanik uyumluluğu artırdığını göstermiştir. YMK yapılar düşük deformasyon ve kontrollü gerilme dağılımı ile en dengeli mekanik performansı sergilemiştir. YMK-Core yapısı 168,1 MPa elastik modül, 13,41 MPa plato gerilimi ve 14,96 MJ/m³ enerji absorpsiyonu ile en yüksek performansı göstermiştir. YMK-Petal darbe emici davranış sergilerken, YMK-Leaf yüksek sünekliği sayesinde yumuşak doku geçiş bölgeleri için avantaj sağlamıştır. Stereolitografi üretim yöntemi, Eriyik filametli üretime kıyasla daha hassas geometri ve daha kararlı mekanik davranış sağlamıştır. %0.5–1 HAp katkılı numunelerde mekanik performans artarken, %3 HAp oranında kırılma davranış gözlemlenmiştir. Malzemenin termal analizlerinde %0,5 ve %1 HAp katkılı numunelerde bozunma piki daha geniş bir karakter göstermekte, bu da termal ayrışmanın daha kontrollü gerçekleştiğini düşündürmektedir.

Sonuç: Parametrik genetik algoritma destekli polar YMK latis yapılarının hafiflik, yüksek enerji absorpsiyonu, optimize gerilme dağılımı ve biyomekanik uyumluluk özellikleri sayesinde hasta-özel spinal ve ortopedik implant uygulamaları için yüksek potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyomimetik tasarım, Sonlu Elemanlar Analizi, YMK, Lomber interbody füzyon kafesi, Genetik algoritma optimizasyonu

ABSTRACT

DESIGN AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF POROUS SPINE IMPLANTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Objective: The aim of this study is to investigate the mechanical and biomechanical performance of lumbar interbody fusion cages with BCC, FCC, and diamond pore structures developed based on a biomimetic approach, and to evaluate the potential of parametric and genetic algorithm-supported polar lattice designs in spinal implant applications.

Material and Methods: The cage structures were designed using parametric modeling and genetic algorithm optimization. In the first stage, the structures were produced by the melt filament fabrication method, and their mechanical performance was evaluated with compression tests. Then, the same structures were refabricated with hydroxyapatite (HAp) reinforced denture pink resin using a stereolithography-based Anycubic Photon Mono M7 Pro printer, and the results were compared. Mechanical behaviors were investigated with finite element analysis and experimental tests. In addition, FTIR and thermal analyses were performed on the produced material.

Findings: Experimental results showed that porous structures regulate stress distribution, reduce stress protection, and increase biomechanical compatibility. FCC structures exhibited the most stable mechanical performance with low deformation and controlled stress distribution. The FCC-Core structure demonstrated the highest performance with an elastic modulus of 168.1 MPa, a plateau stress of 13.41 MPa, and an energy absorption of 14.96 MJ/m³. The FCC-Petal exhibited shock-absorbing behavior, while the FCC-Leaf offered an advantage for soft tissue transition zones due to its high ductility. Stereolithography fabrication provided a more precise geometry and more stable mechanical behavior compared to melt filament fabrication. Mechanical performance improved in samples with 0.5-1% HAp additive, while brittle behavior was observed at 3% HAp. Thermal analysis of the material shows that the degradation peak is wider in samples with 0.5% and 1% HAp additives, suggesting that thermal decomposition occurs in a more controlled manner.

Conclusion: Parametric genetic algorithm-supported polar FCC lattice structures have been determined to have high potential for patient-specific spinal and orthopedic implant applications due to their lightness, high energy absorption, optimized stress distribution, and biomechanical compatibility.

Keywords: Biomimetic design, Finite Element Analysis, FCC, Lumbar interbody fusion cage, Genetic algorithm optimization

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

°C	: Santigrat
3B	: 3 Boyutlu
σ_A	: Akma gerilimi
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
Al	: Alüminyum
ALE	: Arbitaray Lagrange Euler
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
c	: Gözeneklilik katsayısı
CAD	: Computer aided design
cm	: Santimetre
cm³	: Santimetreküp
ÇAGA	: Çok amaçlı bir genetik algoritma
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DTGA	: Türev Termogravimetrik Analiz
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
E	: Elastikiyet modülü
EFÜ	: Eriyik filament üretimi
Eİ	: Eklemeli imalat
FD	: Fonksiyonel derecelendirme
FDA	: Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi
FDL	: Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş latis
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
g	: Gram
GA	: Genetik Algoritmalar
GPa	: Gigapascal
HAp	: Hidroksiapatit
HMK	: Hacim merkezli kübik
LCD	: Sıvı Kristal Ekran
mm	: Milimetre
mm²	: Milimetrekare
MPa	: Megapascal
OKG	: Otolog Kemik Greftleri

P	: Gözeneklilik
PCLMA	: Polikaprolakton metakrilat
PEEK	: Polyetheretherketone
PETG	: Polietilen Tereftalat Glikol
PGA	: Poliglikolik Asit
PLA	: Polilaktik Asit
PLGA	: Poli Laktik-ko-Glikolik Asit
PLIF	: Posterior Lomber İnterbody Füzyon
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SLA	: Stereolitografi
STL	: Standart üçgenleme dili
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TLIF	: Transforaminal Lomber İnterbody Füzyon
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UV	: Ultraviyole
ÜPMY	: Üçlü periyodik minimal yüzey
V	: Vanadyum
YOD	: Yapay omurga diski
W	: Birim hücre başına emilen enerji miktarı
w	: Watt
YMK	: Yüzey merkezli kübik
ϵ	: Gerinim
ϵ^*	: Eşdeğer plastik gerinim
ϵ_s	: Emilen enerjinin hesaplandığı gerinim
π	: Pi
$\mu\epsilon$	: Mikroepsilon

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No	Sayfa No
Şekil 1.1.	Lomber vücut içi füzyon için cerrahi yaklaşımlar ve ilgili vücut içi kafes tasarımları. 3
Şekil 2.1.	Biyobozunur eklemeli imalat ile üretilen omuga implantıyla ilgili yapılan çalışmaların anahtar kelimeleri..... 8
Şekil 3.1.	Hydrosorb kafesinin klinik uygulaması. 2 mm kalınlığında, 10 mm yükseklik x 13 mm çap ölçülerinde örnek bir Hydrosorb kafesi 18
Şekil 3.2.	Destek ve Yüzey tabanlı latis birim hücreler..... 21
Şekil 3.3.	Biyolojik olarak ilham alınarak yapılan dizaynların akış şeması..... 23
Şekil 3.4.	EFÜ sistem grafiği..... 30
Şekil 3.5.	SLA sistem şematiği 31
Şekil 4.1.	Çalışmanın akış şeması..... 35
Şekil 4.2.	Gözenek yapıları a) hacim merkezli kübik b) yüzey merkezli kübik c) elmas yapılar. 35
Şekil 4.3.	Böbrek şeklinde lomber vücut içi füzyon kafesi. a) Üstten görünüm b) Önden görünüm c) İzometrik görünüm, mm cinsinden boyutlar. 36
Şekil 4.4.	Tasarlanan lomber vücut içi kafesinin iç yapısına uygulanan gözenek yapılar 33
Şekil 4.5.	Gözenekli tasarlanan lomber vücut içi implantlar L3-L4 omurgalarının montajı. 37
Şekil 4.6.	Gözenekli tasarlanan lomber vücut içi implantlar ve L3-L4 omurga kemiklerine mesh uygulaması. 38
Şekil 4.7.	HMK vücut içi kafes üzerinde sonlu elemanlar, kuvvet, moment ve sabitleme modeli 400N eksenel kuvvetle birlikte a) 7,5 N.m yanal eğilme momenti b) 7,5 N.m burulma c) 7,5 N.m fleksiyon uygulaması. 38
Şekil 4.8.	Polar YMK kafes tasarımının şematik gösterimi, sayısal ve deneysel testleri..... 40
Şekil 4.9.	Biyomimikri polar YMK kafes tasarımları mercan, trabeküler kemik ile karşılaştırılması. 41
Şekil 4.10.	Bir hücrede 4 farklı açısız bölme n ₀ a) 3 b) 4 c)5 d)6. 43
Şekil 4.11.	Biyolojik olarak ilham alınan Polar YMK Silindirik Kafes Tasarımları (a-f) a) YMK-Ring b) YMK-Stack c) YMK-Petal d) YMK-Core e) YMK-Mesh f) YMK-Leaf. 44
Şekil 4.12.	Polar YMK kafesinin çok amaçlı genetik parametre tasarımı. 45
Şekil 4.13.	Polar YMK latis silindir yapılarının üretimi. a) 3 boyutlu yazıcının şeması b) 3B baskılı Polar YMK tasarımları. 46
Şekil 4.14.	Polar kafes yapılı silindir hacim ağırları: a) YMK-Ring, b) YMK-Stack, c) YMK-Petal, d) YMK-Core, e) YMK-Mesh, f) YMK-Leaf. 47
Şekil 4.15.	Mesh yakınsama çalışması Mesh-von Mises gerilim grafiği. 48

Şekil 4.16.	Deneysel ve sayısal değerlendirme: a) Şematik deneysel basma testi ve b) Basma testinin sonlu elemanlar modeli.	49
Şekil 4.17.	Manyetik karıştırıcı ile karıştırma işlemi	50
Şekil 4.18.	Dosya dilimleme yazılımı Anycubic Photon Workshop ile tasarlanan şekillerin dilimlenmesi.....	51
Şekil 4.19.	Anycubic Photon Mono M7 Pro SLA/MSLA yazıcı ve yazıcı ile üretilen ürünler.....	52
Şekil 4.20.	Üretilen numnelerin üst ve yan görünüşü.	52
Şekil 4.21.	Temizleme ünitesi.....	53
Şekil 4.22.	Kürleme cihazı.....	53
Şekil 4.23.	Basma deney cihazı.....	54
Şekil 4.24.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı.....	51
Şekil 4.25.	EUROMEX DC.5000-WiFi marka optik mikroskop	55
Şekil 5.1.	HMK vücut içi kafeste eksenel 400 N kuvvete sahip L3-L4 omurga kemiği ve gözenekli tasarımı vücut içi kafes a) Toplam deformasyon 7,5 N.m yanal bükülme, Eşdeğer elastik gerinim b) Moment 7,5 N.m yanal bükülme c) 7,5 N.m burulma d) 7,5 N.m bükülme....	53
Şekil 5.2.	L3-L4 omurları ve HMK, YMK ve elmas gözenek tasarımı vücut içi kafes maksimum gerilme ve gerinim.	57
Şekil 5.3.	Gözenekli lomber vücut içi kafes implantının von Mises gerilmeleri a) HMK b) YMK c) Elmas yapılı.	58
Şekil 5.4.	1000 N sıkıştırma kuvveti için gözeneklili lomber vücut içi kafes implantlarının toplam deformasyon miktarları a) HMK b) YMK c) Elmas yapılı.	58
Şekil 5.5.	Dolu omurga implant yapının a) von Mises gerilimi b) Toplam deformasyonu.	59
Şekil 5.6.	Toplam deformasyon miktarındaki yüzde değişimin deneysel ve SEA karşılaştırılması...	62
Şekil 5.7.	Altı farklı YMK tabanlı kafes tasarımı için deneysel ve SEA ile simüle edilmiş basma gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	64
Şekil 5.8.	YMK-tabanlı latis yapıların SEA ile plato gerilimi, a) YMK-Ring, b) YMK-Stack, c) YMK-Petal, d) YMK-Core, e) YMK-Mesh, f) YMK-Leaf.	65
Şekil 5.9.	Polar YMK kafes tasarımının energy absorbe etme özellikleri.	66
Şekil 5.10.	Polar YMK desteklerinin kuvvet yasası uyum grafikleri.	68
Şekil 5.11.	YMK-tabanlı latis yapıların SEA ile yorulma verileri a) YMK-Ring b) YMK-Stack c) YMK-Petal d) YMK-Core e) YMK-Mesh f) YMK-Leaf	
Şekil 5.12.	SLA ile üretilmiş YMK-Core'a basma testi sonuçları a) saf reçine b) 0,5 HAp katkılı c) %1 HAp katkılı d) %1,5 HAp katkılı e) %3 HAp katkılı	74

Şekil 5.13.	Saf reçine ve %0.5 HAp katkılı reçine ile üretilen ürünler basma sonucunda gözenek boyutları.....	75
Şekil 5.14.	%1 ve %1.5 HAp katkılı reçine ile üretilen ürünlerin basma testi sonucundaki gözenek boyutları.....	75
Şekil 5.15.	%3HAp katkılı reçine ile üretilen ürünün basma testi sonucunda gözenek boyutları	76
Şekil 5.16.	%3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin görüntü ve değerler grafiği.	76
Şekil 5.17.	Saf reçine ile elde edilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.	77
Şekil 5.18.	%0.5 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.....	78
Şekil 5.19.	%1 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.	78
Şekil 5.20.	%1.5 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.....	79
Şekil 5.21.	%3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.	79
Şekil 5.22.	FTIR spektrumunda a)saf reçine b)%0.5 c) %1 d) %1.5 e)%3 HAp katkılı	80
Şekil 5.23.	TGA eğrileri	81
Şekil 5.24.	DTGA eğrileri.....	82
Şekil 5.25.	DTA eğrileri	83
Şekil 5.26.	DSC eğrileri.....	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo No	Sayfa No
Tablo 4.1. Bütün parçaların malzeme özellikleri.....	34
Tablo 4.2. Lomber kafes boyutları	36
Tablo 4.3. Polar kafes silindir tasarım parametreleri.....	43
Tablo 5.1. Gibson Ashby sabit parametreleri.	64
Tablo 5.2. Polar YMK kafes silindir yapılarının elastik modülü ve plato gerilimi.	67
Tablo 5.3. %3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin iç yapısı.....	77



1. GİRİŞ

Omurga, vücudun önemli ana taşıyıcılarından biridir. İnsan omurgasında toplam 33 omur bulunmaktadır. Bu omurlardan herhangi biri veya birkaçında bir sorun olduğunda vücudun fonksiyonlarında bozulmalar ortaya çıkar. Bozulmalar neticesinde ortaya çıkan sorunlardan biri de bel ağrısıdır. Bel ağrısı, omurlar arası disklerin dejeneratif süreciyle ilişkilidir. İnsanlarda dejeneratif süreç 20 yaşından sonra yavaş yavaş başlar ve 40 yaşından sonra hızlanır. Dejeneratif disk hastalığında, omurlar arası diskin yüksekliği kademeli olarak azalır ve omurganın etkilenen bölümünde ağrıyla başlayıp nörolojik hasara kadar ilerleyen semptomlar ortaya çıkabilir (Ma ve ark., 2019). Uzun vadede, özellikle yaşlılarda ağrının ana nedeni, spinal stenoz nedeniyle sinir dokularının sıkışmasından kaynaklanır. Dejeneratif süreçler, omurlar arası disklerde yapısal hasara yol açar. Yaşlanma ve ilerleyen dejenerasyonla birlikte, öncelikle omurlar arası disklerin merkezinde bulunan nucleus pulposus etkilenir ve elastikiyeti azalır (Ohtori ve ark., 2015). Dejenerasyona uğramış omurlar arası diskler daha az sıvı içerdiğinden, mekanik basma ve yüklenme sonucu elastikiyetlerini kaybederler. Böylece yükseklik kaybı ve basma artışı nedeniyle fıtık oluşur. Organizmadaki proteoglikan kaybı, diğer moleküllerin disk matriksindeki hareket kabiliyetini kısıtlayabilir. Serum proteinleri ve sitokinler disk matriksine difüze olarak hücreleri etkiler ve dejenerasyon sürecini hızlandırır. Bu dejeneratif sürecin sonunda, omurgada segmental instabiliteye yol açan ilerleyici süreç başlar. Bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans (MR) gibi radyolojik cihazlar kullanılarak teşhis edilebilen dejeneratif disk hastalıklarının tedavisinde konservatif tedavi (medikal ve fizyoterapi) ve cerrahi tedavi uygulanır (Wang ve ark., 2016).

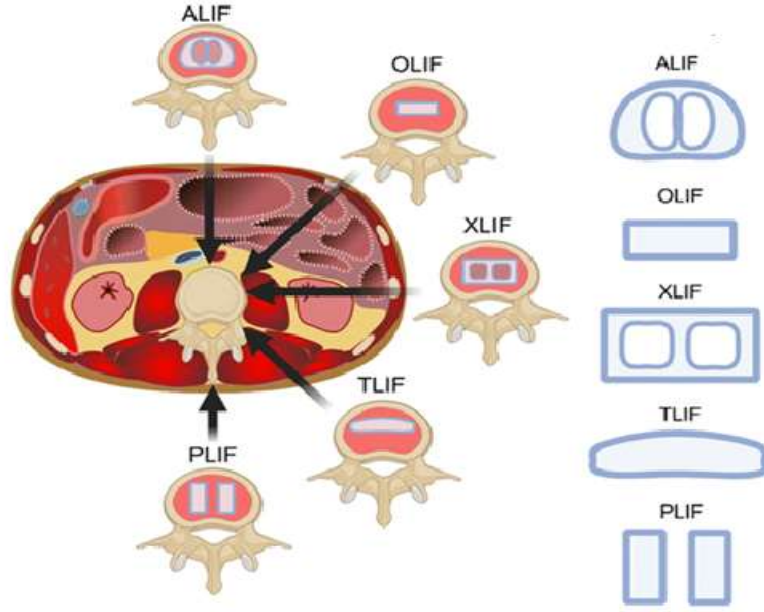
Cerrahi müdahale gerektirmeyen tedavi yöntemleri arasında anti inflamasyon ve kas gevşetici ilaçlar, BT veya floroskopi eşliğinde algolojik işlemler, elektroterapi, fizik tedavi ve korse kullanımı yer alır. Bu yöntemlerden istenen sonuçlar alınamadığı durumlarda, nörolojik defisit varlığında cerrahi tedavi yöntemleri uygulanır. Spinal kanaldaki sinir dokularının sıkışmasına bağlı olarak laminektomi, diskektomi, foraminotomi ve instabilite varlığında spinal füzyon gibi cerrahi işlemler gerçekleştirilebilir (Huang ve ark., 2021).

Konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde omurga füzyonu, konservatif tedavilerin başarısız olduğu çok çeşitli yayıflatıcı akut ve dejeneratif omurga rahatsızlıklarının tedavisinde, kritik bir cerrahi prosedür haline gelmiştir. Dejeneratif disk hastalığı ve spinal stenoz gibi kas-iskelet sistemi bozukluklarının yaygınlığı oldukça yüksektir ve tüm kas-iskelet sistemi hastalıklarının yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bu durum her yıl önemli sayıda lomber füzyon ameliyatının gerçekleştirilmesine yol açmış ve bu sayı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Dünyada yaşlanan nüfus ve artan obezite oranları gibi faktörler nedeniyle bu eğilimin devam etmesi ve omurga füzyonunun

modern ortopedi ve nöroşirürji uygulamalarının temel taşı olarak rolünü pekiştirmesi beklenmektedir (Millecamps ve ark., 2012).

Bu prosedürün evrimini, 19. yüzyılın sonlarında gümüş tel kullanarak ilk enstrümente edilmiş omurga füzyonunu gerçekleştiren Berthold Earnest Hadra'dır. Daha sonraki yıllarda füzyon için temel teknikler, posterolateral spondilodezisi tanıtan Albee ve Hibbs tarafından daha da geliştirilmiştir. 1940'lar ve 50'lerde Briggs ve Milligan tarafından posterior lomber interbody füzyon (PLIF) yönteminin geliştirilmesi ve daha sonra Ralph Cloward tarafından yapılan çalışmada büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. Bu teknik disk boşluğunu doğrudan ele alarak, hasarlı diski ve uç plakları çıkararak ve hastanın iliak çıkıntısından büyük, yapısal otolog kemik greftleri (OKG) yerleştirerek, kemik büyümesini teşvik edip vertebral segmenti stabilize ederek bir değişimi gerçekleştirmiştir (Laubach ve ark., 2022). Ancak yalnızca kemik greftlerine dayanan bu erken yaklaşımlar önemli zorluklar taşımıştır. Örnek vermemiz gerekirse, otogreft kullanımı önemli donör bölge morbiditesiyle ilişkilidi; yani kemiğin alındığı bölge hastada kalıcı ağrı ve komplikasyonlara neden olabiliyordu. Dahası, implante edilen kemik greftlerinin yapısal bütünlüğü genellikle yetersizdi ve bu da greft çökmesi ve psödoartroz olarak bilinen bir durum olan sağlam kemik füzyonunun sağlanamamasına yol açıyordu. Bu sınırlamalar uzun vadeli başarılı sonuçlar sağlamak için daha güvenilir ve stabil çözümlere olan ihtiyacı vurguluyordu (Dumic-Cule ve ark., 2015).

Bu komplikasyonların üstesinden gelmek için, alan mekanik stabilizasyonu biyolojik füzyonla entegre edilerek ilerlemiştir. 1980'lerde popüler hale gelen çubuklar veya plakalarla birbirine bağlı pedikül vida enstrümantasyonunun tanıtımı, spinal segmente kritik bir posterior stabilite sağlamıştır. Bu, Steffee tarafından önerildiği gibi yükü, anterior kolon boyunca paylaşmak için genellikle vücut içi füzyon teknikleriyle birleştirilmiştir. Doku travmasını en aza indirmek için cerrahi yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Transforaminal lomber interbody füzyon (TLIF), bilateral PLIF'e tek taraflı bir alternatif olarak geliştirilmiş ve kapsamlı sinir kökü retraksiyonun ihtiyacını ve ilişkili riskleri azaltmıştır (Cheers ve ark., 2024). Şekil 1.1'de Lomber vücut içi füzyon için cerrahi yaklaşımlar ile ilgili vücut içi kafes tasarımları ve vücut kesitinde farklı açılardan implant uygulamaları gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Lomber vücut içi füzyon için cerrahi yaklaşımlar ve ilgili vücut içi kafes tasarımları. (Cheers ve ark., 2024).

Spinal füzyonun tarihsel gelişimi, hasta morbiditesini en aza indirirken stabilite ve füzyon oranlarını iyileştirmeye yönelik sürekli bir çabayı ortaya koymaktadır. Basit telleme ve kemik grefti uygulamasından, sağlam posterior enstrümantasyonla birleştirilmiş vücut içi kafeslerin sofistike kullanımına uzanan yolculuk bu ilerlemeyi yansıtmaktadır. Bu evrimi anlamak, füzyon için biyolojik ortamın optimize edilmesine ve cerrahi tekniklerin daha az invaziv olacak şekilde iyileştirilmesine odaklanmaktadır (Verma ve ark., 2020). Tüm bu karmaşık prosedürlere yönelik artan klinik talebe yanıt olarak, ortaya çıkan vücut içi implant tasarımlarındaki zorlukları görmek çok önemlidir.

Modern bir spinal vücut içi kafesin temel amacı, disk yüksekliğini koruyup omurgayı stabilize ederken, implant ile canlı kemik arasında doğrudan yapısal ve işlevsel bir bağlantı olan osteointegrasyonu sağlamaktır. Bu süreç, kafesin içine yerleştirilen ve osteojenik potansiyelini artıran parçalanmış OKG ile desteklenir (Kim ve ark., 2020).

Osteointegrasyonun kendisi üç temel ilke tarafından yönlendirilen karmaşık bir biyolojik olgu olarak, osteokondüksiyon (implantın kemik büyümesi için iskele yapı oluşturmaya, osteoindüksiyon hücrelerin kemik oluşturan hücrelere dönüşmesi için uyarılması), osteogenez (hücreler tarafından yeni kemiğin oluşumu) ve başarılı entegrasyonun kritik bir yönü olarak, osteoblastların implant yüzeyine erken bağlanmasıdır. Bu, yalnızca kemik köprüsü oluşumunu başlatmakla kalmaz, aynı zamanda bakteriyel kolonizasyonu önlemede de hayati bir rol oynar (Verma ve ark., 2020; Shu ve ark., 2021).

Bu sürecin başarısı, omurga cerrahisinde implantla ilişkili enfeksiyonların önemli ve artan yükü nedeniyle ciddi şekilde tehdit altındadır. Ortopedik cerrahide genel enfeksiyon riskinin %2-5 olduğu bildirilirken, omurga kafesleri gibi donanımların varlığı, ameliyat sonrası enfeksiyon oranını %3,4 ile

%8,5 arasına çıkarmaktadır. Bu enfeksiyonlara sıklıkla *Staphylococcus aureus* ve *Staphylococcus epidermidis* gibi bakteriler neden olur ve ciddi sonuçlar doğurur. Omurlar arası disk ve bitişik omurların enfeksiyonu olan piyojenik spondilodiskit %22,3'e varan bir ölüm oranına sahiptir. Ayrıca enfeksiyona bağlı omurga cerrahisi revizyonları, sağlık sistemleri için büyük bir zorluk teşkil eder (Mener ve ark., 2020). Sorunun özü bakterilerin implant yüzeyinde biyofilm oluşturma özelliklerinden kaynaklanır. Ameliyat sırasında planktonik bakteriler implantı kirletebilir ve arayüzüne yapışabilir. Bu bakteriler daha sonra glikokaliks adı verilen koruyucu bir polisakkarit tabakası salgılar ve bu da güçlü bir biyofilm topluluğu oluşturur. Bu biyofilm, bakterileri sistemik antibiyotiklere 100 ila 1000 kat daha az duyarlı hale getiren ve vücudun bağışıklık hücrelerinin penetrasyonunu engelleyen bir kalkan görevi görür. Bu dayanıklılık, biyofilmle ilişkili enfeksiyonların geleneksel tedavilerle ortadan kaldırılmasını son derece zorlaştırır (Li ve ark., 2020).

Ameliyat sonrası enfeksiyonun varlığı, spinal füzyonun sonucu üzerinde yıkıcı bir etkiye sahiptir. Bu durumda Psödoartroz (başarısız kemik füzyonu) riskini önemli ölçüde artırır; enfekte olmayan vakalarda oranlar %11,5'ten, enfekte olanlarda %29,7'ye yükselmektedir. Biyofilmle ilişkili enfeksiyonun komşu dokuları tahrip etmesi, osteointegrasyon için gerekli kemiği oluşturan hücrelere düşman olan dengesiz bir biyolojik ortam yaratır. Bu durum, enfeksiyonun başarılı füzyonu engellediği ve dengesiz entegre olmayan implantın enfeksiyonu daha da karmaşık hale getirdiği bir kısır döngü yaratır. Bu nedenle hızlı osteointegrasyonu teşvik etme ve yıkıcı intraartiküler enfeksiyonu önleme gibi iki zorluk, modern spinal vücut içi kafeslerinin geliştirilmesi ve kullanımındaki en önemli engelleri oluşturmaktadır (Hollern ve ark., 2019).

Spinal implant enfeksiyonunun yıkıcı etkisi, iyileşmenin temel biyolojisine kadar uzanır ve sıklıkla füzyon başarısızlığına yol açar. Enfeksiyonun neden olduğu inflamasyon yanıt ve doku yıkımı, lokal damarlanmayı tehlikeye atarak kemiğin düzgün bir şekilde oluşamayacağı bir ortam yaratabilmektedir. Bu durum, implantın gevşemesine veya çıkmasına doğrudan etki eder. Bu gibi durumlarda cerrahlar zor bir seçimle karşı karşıya kalırlar. Omurga stabilitesini korumak için implantı tutmak mı yoksa enfeksiyonu ortadan kaldırmak için çıkarmak mı daha iyi tedavi yöntemi olduğu sorgulanmaktadır. Ancak enfeksiyonun varlığı, füzyon başarı oranlarını %62-73'e kadar önemli ölçüde azaltır. İmplant retansiyonu bazen düşünülse de, özellikle geç başlayan enfeksiyonlarda tercih edilen tedavi, yüksek cerrahi risklere rağmen genellikle donanımın tamamen çıkarılması veya değiştirilmesi yönündedir (Lazennec ve ark., 2011). Ancak enfekte bir implantın çıkarılması kararı yeni birçok klinik sorunu meydana getirir. Disk boşluğunu destekleyen kafesin çıkarılması kaçınılmaz olarak implantın çökmesine yol açmaktadır. Bu, restore edilmiş fizyolojik lordozun (omurganın doğal eğrisi) kaybına neden olur ve sinir yapılarının sıkışması nedeniyle potansiyel olarak yeni veya kötüleşen nörolojik semptomlara yol açabilmektedir. İmplantın tutulmasının kalıcı enfeksiyon riski taşıdığı ve çıkarılmasının mekanik arızaya yol açtığı bu kısır döngü, mevcut spinal füzyon bakımında kritik bir zayıflığı ortaya

koymaktadır. Bu durum sebebiyle enfeksiyona daha iyi direnç gösterebilen ve zorlu ortamlarda bile füzyonu destekleyebilen spinal kafes biyomalzemelerinde, hızlı teknolojik gelişmelere acil ihtiyaç olduğuna vurgu yapılmaktadır (Antoniac ve ark., 2025).

İnterbody kafesin geliştirilmesi, spinal füzyonun mekanik zorluklarının ele alınmasında önemli bir adım olmuştur. Veteriner hekimliğinde ilk olarak Bagby tarafından kullanılan bu konsept, Bagby ve Kuslich (BAK) kafesi insanlara da uyarlanmıştır. Başlangıçta paslanmaz çelikten üretilen bu “sepet” implant, kemik grefti ile doldurulup disk boşluğuna yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Birincil mekanik işlevi disk yüksekliğini ve nöroforaminal hacmini eski haline getirerek anında stabilite sağlamak ve yalnızca kemik grefti ile oluşan çökmeyi önlemektir. Bu yapısal desteğin başarılı füzyon için ortamı iyileştirdiği kanıtlanmıştır (Meena ve ark., 2021).

Kafes teknolojisinin gelişimi, biyolojik bileşenin mekanik cihazla uyum içinde çalışmasının kritik önemini de ortaya koymuştur. İlk BAK kafesleri, otogreft ile kullanıldığında, altı ayda yalnızca %20 füzyon oranı göstermiştir. Ancak kafese güçlü bir osteoindüktif büyüme faktörü olan rekombinant insan kemik morfogenetik protein-2 (rhBMP-2) eklendiğinde bu oran %100'e çıkmıştır. Bu çarpıcı tezat, bir kafesin başarısının yalnızca yapısal özelliklerine bağlı olmadığını, aynı zamanda kemik büyümesine elverişli bir biyolojik ortam yaratma yeteneğinden de derinden etkilendiğini; implant malzemeleri ve tasarımında sürekli inovasyonun önünü açtığını göstermektedir (Zhang ve ark., 2018).

Vücudun, vücut içi cihaza verdiği tepki, füzyon başarısının kritik bir belirleyicisidir ve implant aracılı bir bağışıklık reaksiyonu ile başlar; proteinler ve hücreler artıklar cihazı kaplayarak makrofajlar gibi doğuştan gelen bağışıklık hücrelerinin akışını tetikler. Bu inflamasyon, iki sonuçtan birine yol açabilir. Bunlar, konak dokuya yapıcı entegrasyon veya fibröz bir kapsül oluşumuyla karakterize zararlı bir yabancı cisim reaksiyonudur. Genellikle implant-kemik ara yüzündeki mikroskobik harekete bir yanıt olan bu fibröz kapsüllenme, klinik olarak gecikmiş veya başarısız füzyon olarak kendini göstermiştir. Bu, radyografik şeffaflık ile kanıtlanır ve histolojik olarak sağlam bir kemik köprüsü yerine, canlı kemik hücrelerini birbirine bağlayan kemiksiz fibrokartilaj “dikişlerinin” varlığıyla doğrulanır (Kos ve ark., 2019).

Çevresel 360 derece füzyonun benimsenmesi, klinik sonuçlarda önemli bir iyileşmeye işaret etmiş ve 1990'larda başta titanyum olmak üzere metal kafeslerin ticarileştirilmesine yol açmıştır. Bununla birlikte, titanyum kafesler, “stres kalkanı”na neden olan yüksek sertlik de dahil olmak üzere birkaç kritik sınırlamaya sahiptir. Bu durum, implantın yükün çoğunu taşıyarak çevresindeki kemiği büyüme ve yeniden şekillendirmesi için gereken mekanik uyarandan koruduğu ve genellikle kaynamama ve çökmeyle sonuçlanan “stres kalkanı” olarak da bilinir. Dahası, radyopaklıklar füzyonun röntgende değerlendirilmesini zorlaştırmış, enfeksiyon ve komşu segment hastalığı riskinin devam etmesi, alternatif biyomalzeme arayışını tetiklemiştir (Mehboob, 2023). Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, geleneksel katı implant tasarımlarının yerini, mekanik ve biyolojik

gereksinimlere daha iyi yanıt verebilen latis (kafes) yapı tabanlı implant tasarımları almaya başlamıştır. Latis yapılar, gözeneklilik, hücre boyutu ve bağlanma geometrisi gibi parametrelerin hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanıyarak, implantın elastik modülünün çevre kemik dokusuna daha yakın olacak şekilde ayarlanmasını mümkün kılmaktadır (Bai ve ark., 2019). Bu sayede yük paylaşımı implant ve kemik arasında daha dengeli gerçekleşmekte, stres kalkanı etkisi önemli ölçüde azaltılmaktadır. Ayrıca latis yapıların açık ve bağlantılı gözenek morfolojisi, hücre infiltrasyonu, vaskülarizasyonu ve kemiğin içe doğru büyümesini (osseointegrasyon) teşvik ederek füzyon başarısını artırmaktadır.

Özellikle omurga implantlarında kullanılan latis tasarımlar, fonksiyonel gradyanlı yapılar ile hem mekanik dayanım hem de biyolojik uyumluluğu bir arada sunmaktadır (Jayakumar ve ark., 2024). Merkez bölgelerde daha yüksek porozite hücre büyümesini desteklerken, dış bölgelerde daha yoğun yapılar mekanik stabiliteyi sağlamaktadır. Eklemeli imalat sayesinde, hasta spesifik geometriler ve yük koşullarına uyumlu latis mimariler üretilebilmekte; bu da implant-kemik arayüzünde daha homojen gerilme dağılımı ve uzun dönem klinik başarı sağlamaktadır. Bu nedenlerle latis tabanlı implant tasarımları geleneksel metal kafeslere kıyasla stres kalkanını azaltan ve biyolojik entegrasyonu artıran yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Omurganın maruz kaldığı karmaşık ve çok eksenli yükleme şartlarında daha uyumlu ve uzun süreli biyolojik uyumu artırılmış bir implant tasarımı geliştirmek için bu çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur. Geleneksel metal tabanlı implantların neden olduğu stres kalkanı etkisi, yetersiz osseointegrasyon ve zamanla ortaya çıkan mekanik uyumsuzluklar, klinik başarıyı sınırlayan temel problemler olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, doğal kemik dokusunun hiyerarşik ve poroz yapısını taklit eden biyomimikri temelli latis yapılar ile yük paylaşımını optimize eden fonksiyonel gradyanlı bir tasarım yaklaşımı sunarak literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca SLA ve EFÜ gibi iki farklı eklemeli imalat yönteminin PLA ve kompozit malzemelerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi sadece tasarım değil, üretim sürecinin de implant performansına etkisini ortaya koymaktadır. Bu açıdan çalışma, hem geometrik optimizasyon hem de üretim teknolojisi seçiminin birlikte değerlendirildiği bütüncül bir yaklaşım sunarak, biyouyumlu, mekanik olarak optimize edilmiş ve klinik olarak daha sürdürülebilir omurga implantlarının geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. LİTERATÜR

2.1. İmplant Malzemeleri

Son yıllarda omurga implanlarında en çok kullanılan malzemeler arasında titanyum alaşımı ve Polyetheretherketone (PEEK) yer almaktadır. Çalışmalarda kullanılan implant malzemelerinden özellikle titanyum, yüksek elastik modülü (116 GPa) nedeniyle kemik dokusuyla uyumlu bir şekilde çalışmakta zorlanır. Bu durum, kemik ile implant arasında oluşan stres farklılıklarına neden olarak yeni kemik oluşumunu engelleyebilir ve implantın uzun vadeli stabilitesini azaltabilir. Ayrıca titanyum implantlar metal iyon salınımı yaparak, potansiyel olarak metal iyon zehirlenmesine sebep olma riski taşımaktadır. Metal iyonlarının vücutta birikmesi, dokular üzerinde toksik etkiler yaratabilir ve sistematik sağlık sorunlarına yol açabilmektedir (Javaid ve Haleem, 2019). PEEK malzemesi ise düşük elastik modülü (3,6 GPa) sayesinde son yıllarda daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır (Zhang ve ark., 2022). Ancak Torstrick ve diğ. (2018), PEEK biyoinert bir malzeme olduğu için kemik dokusuyla yeterli seviyede entegre olamayacağını ifade etmişlerdir. Bu durum, fibrotik doku oluşumuna, zayıf osteointegrasyona ve peri-implant enfeksiyon riskine yol açabilir. Literatürde de belirtildiği üzere, PEEK malzemeler ile üretilen implantlar, bu biyolojik uyumsuzluklar nedeniyle uzun vadede implant başarısını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Torstrick ve ark., 2018). McGilvray ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, bu malzemelerin kullanımına dair bir diğer önemli dezavantaj olarak üretim süreçlerinin maliyetli ve karmaşık olduğunu tespit etmişlerdir. Hem titanyum hem de PEEK malzemelerin eklemeli imalatla üretimi, yüksek sıcaklıklar ve hassas kontrol gerektirir. Titanyum tozları özellikle yüksek sıcaklıklarda işlenirken, oksidasyona karşı korunmalı ve inert bir atmosferde işlenmelidir. Benzer şekilde PEEK malzemeleri de erime sıcaklığının oldukça yüksek olması nedeniyle, özel üretim teknikleri ve ekipman gerektirir. Bu koşullar üretim süreçlerinin karmaşıklığını ve maliyetini artırarak implantların da genel maliyetini yükseltir (McGilvray ve ark., 2017).

2.2. 3B ile Yazdırılmış Omurga İmplantı

Literatür taramalarında 3B yazıcılarla üretilen vücut içi kafeslerin kullanımıyla ilgili çalışmaların arttığı görülmektedir. Ayrıca 3B yazıcılarla üretilen vücut içi kafesler hakkındaki çalışmaların çoğu, gözenek boyutları veya özelleştirilmiş üretimle ilgilidir. Latis yapılı vücut içi kafesler, omurlara yük aktarımı ve stres kalkanının azaltılmasında daha iyi bir etkiye sahiptir. Spinal instabiliteye bağlı posterior cerrahi müdahale yöntemlerinde kullanılan vücut içi kafeslerin üretimi, talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler farklı geometrilerin üretiminde yetersiz kaldığından, son yıllarda karmaşık yapıların üretimini kolaylaştıran 3B yazıcı yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde kullanılan omurga implantları ile ilgili literatür burada değerlendirilmiştir. Fogel ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, mikro gözenekli ve latis tasarımlı kemik içi kafesler karşılaştırıldığında, latis yapılı bir titanyum kafes, füzyonda sadece 12 hafta gibi kısa bir sürede kemik büyümesini ve segmental mekanik stabiliteyi desteklemektedir. Ancak mikro gözenekli kemik içi kafesin blok sertliği üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı, latis yapılı kafesin ise sertliğini azalttığı tespit edilmiştir (Fogel ve ark., 2022). Egan ve diğ. (2019), 3B ile yazdırılmış polimer latisler, kemik içi füzyon kafesinin model uygulamasını belirli ışın çaplarında, gözeneklilikler ve gözenek boyutlarına sahip dört farklı ünite tasarlamışlar. Omurga kafes tasarımları %50 gözenekli ünite hücreleri, 600 mm boyutunda gözenekler ve 5,6 kN/mm'ye kadar sertlik ile kemik füzyonu için uygun özellikler göstermiştir (Egan ve ark., 2019). Torakolomber bölgede omurga tümörü olan 13 hastanın tedavisinde, 3B yazıcı titanyum protez testlerinde, tüm hastalarda hem proksimal hem de distal kemik implantı arayüzlerinde komşu vertebra gövdelerinde çökme meydana gelmiştir. Bir hastada kafesin çökmesi yapının revizyonuna yol açmıştır. Bu implant, hastalığın lokal nüksetmesi nedeniyle çıkarılmıştır (Girolami ve ark., 2018). Benzer bir çalışmada Leary ve diğ. (2021), karmaşık primer spinal tümörü olan bir hastanın tedavisinde 3B yazıcı yöntemi ile üretilen implantı kullanmıştır. Bu yöntemle üretilen implantlar, cerrahlar tarafından ameliyat öncesi ve sonrası incelenmiş, dokuz vaka için referans olarak kullanılmış; spinal onkolojide ameliyat planlaması ve intraoperatif rehberlikte kullanılabilirlikleri kanıtlanmıştır (Leary ve ark., 2021).

Kuleshov ve diğ. (2018), spinal deformitelerin tedavisinde 3B yazıcı yöntemiyle üretilen modelleri denemişlerdir. Farklı omurga deformitelerine sahip 52 hastada test edilen bu modeller, üç hasta hariç tüm hastalarda omurganın stabil kalmasını sağlamıştır (Kuleshov ve ark., 2018). Öte yandan Xu ve diğ. (2016), üst servikal omurga rekonstrüksiyonu için C2 Ewing sarkomu olan 12 yaşındaki bir hastanın aksiyal vertebra gövdesini 3B yazıcıyla üretmişler. Aşamalı spondilektomi geçiren hasta, optimize edilmiş ve stabilize edilmiş implantlar sayesinde 7 günde iyileşmiştir (Xu ve ark., 2016). Liang ve diğ. (2023), silindirik tasarımlı elmas Gyroid ve hacim merkezli kübik (HMK) yapılarının enerji emme ve deformasyon süreçlerini incelemiştir. Deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar modelleri kullanılarak doğrulanmıştır. Parametrik çalışmalar hücre boyutunun ve radyal varyasyon katsayısının silindirik tasarımlı kafeslerin enerji emiliminde önemli roller oynadığını göstermiştir (Liang ve ark., 2023).

Geleneksel malzemelerden üretilen bu tür implantlar, hastalar iyileştikten sonra genellikle ikinci bir cerrahi müdahale ile çıkarılmayı gerektirir. Veronasi ve diğ. (2022) göre, bu durumda ikinci bir ameliyat, ilk müdahaleye kıyasla çok daha karmaşık ve riskli olabilir. Ameliyat sonrası oluşan skar dokusu, cerrahın operasyon alanına erişimini zorlaştırarak işlemi komplike hale getirebilir ve iyileşme sürecini uzatabilir. Ayrıca her cerrahi müdahale gibi, ikinci ameliyat da enfeksiyon riski taşıyabilir ve bu risk vücuda tekrar müdahale edilmesiyle daha da artabilir (Veronesi ve ark., 2022). Yaşlı hastalarda bu riskler daha belirgin hale gelir; skar dokusu oluşumu, artan enfeksiyon riski ve genel sağlık durumu gibi faktörler nedeniyle ikinci cerrahi müdahale daha zorlu ve tehlikeli olabilir. Genç hastalarda ise bağışıklık

sisteminin daha güçlü olması enfeksiyon riskini düşürebilir, ancak skar dokusunun varlığı yine de operasyonu zorlaştırabilir ve iyileşme sürecini uzatabilir.

Sadeghinia ve diğ. (2022), lomber vücut içi kafes modelini tasarlayan ekip olarak, bu gözeneklilik değerleri %10,64, %14,05 ve %17,94 kafes modeliyle L1-L2 omurlarının disk aralığı için optimize etmiştir. Sonlu elemanlar analizi (SEA), sıkıştırma, fleksiyon, yanal eğilme ve burulma yoluyla gerçekleştirilir. Vücut içi kafes modelinin genel sertliği, von Mises gerilmesi ve %14,05 gözeneklilikteki gerinimi, implantın optimize edilmiş bir model olduğunu göstermiştir (Sadeghinia ve ark., 2022).

2.3. Biyomimikri Tasarım

Çalışmada kullanılan biyomimikri tasarım ile ilgili literatür burada değerlendirilmiştir. Biyomimikri, biyolojik olarak doğadan ilham alınan tasarımları ifade etmek için kullanılan bir kavramdır. Xu ve diğ. (2025), kemik dokusu mühendisliği üzerine yapılan bu çalışmada, seçici lazer eritme yöntemi kullanılarak farklı kafes mimarilerine sahip dört silindirik Ti6Al4V latis (Yüzey Merkezli Kübik, Hacim Merkezli Kübik, Cam Sünger ve Auxetik) yapılar geliştirilmiştir. Yüzey merkezli kübik (YMK) latisler, diğerlerinden yedi kat daha yüksek maksimum gerilme ile olağanüstü mekanik özellikler sergilemiştir. YMK latis yapı için temel performans ölçütleri arasında 1,2-1,4 GPa'lık plato gerilimi, 0,15-0,25'lik yoğunlaşma gerilimi, 85-100 MJ/m³'lük enerji emilimi ve 45-55 kJ/kg'lık özgül enerji emilimi yer almaktadır. Bu sonuçlar YMK'nın benzersiz kafes yapısının enerji emilim verimliliğini önemli ölçüde artırdığını ve daha iyi klinik uygulamalara sahip mekanik olarak uyarlanabilir kemik implantları için teorik bir temel oluşturduğunu göstermektedir (Xu ve ark., 2025).

Noranha ve diğ. (2023), latis birim hücrelerindeki yoğunluk gradyanları aracılığıyla malzeme dağılımını optimize etmek için doğal yapılardan ilham alınan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş latisleri (FDL) tartışmışlardır. Çalışmada uygulanan basma testleri, FDL'nin akma gerilimi ve elastik modülü gibi FDL'nin mekanik özelliklerinin, geleneksel kafeslere göre daha yüksek enerji emilimi ile bağlı yoğunluklara bağlı olduğunu ortaya koymuştur (Noranha ve ark., 2023). Hussain ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, destekler ve ÜPMY yapılarından çeşitli birim hücreleri içeren fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılara sahip, radyal olarak hibritleştirilmiş tasarımlara odaklanmıştır. Çalışmanın deneysel ve sayısal sonuçları, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapıların hibrit yapılara kıyasla daha iyi mekanik verimlilik sergilediğini göstermiştir (Hussain ve ark., 2023). Meena ve diğ. (2022), farklı yükleme koşulları altında hibrit omurga kafeslerindeki gerilme ve deformasyonu incelemek için SEA kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada gözenek boyutları 0,4 ile 0,6 mm arasında değişen latis (Elmas, Gyroid ve Schwarz W) yapılarından oluşan omurga kafesleri, gerilme koruması ve yorulma dayanımı açısından incelenmiştir. Çalışmada 0,6 mm'lik gözenek boyutunun tüm dokulardaki gerilim kalkını etkisini azaltmak için en uygun boyut olduğu sonucuna varılmıştır (Meena ve ark., 2021).

Xu ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, ayçiçeği çekirdeklerinin latis organizasyonunu analiz ederek, anizotropik oksetik davranış ve yüksek enerji emilimiyle sonuçlanan çift gradyanlı bir kafes yapısı geliştirmişlerdir. Bu tasarımdan ilham alarak oksetik metamateryallerin çeşitli alanlarda potansiyel uygulamalara sahip olduğunu öne sürmüşlerdir (Xu ve ark., 2023). Tung ve diğ. (2022), biyolojik olarak ilham alınan sarmal yönelimli silindirik yapılar geliştirmişler ve mekanik özelliklerini ve enerji emilim performanslarını incelemişler. Deformasyon davranışı ve enerji emilim mekanizmaları, sarmal açılarına bağlı olarak ayarlanabilir ve potansiyel uygulamalar için optimize edilebilir (Tung ve ark., 2022). Sharma ve diğ. (2023) tarafından Polilaktik Asit (PLA) ve Termoplastik Poliüretan (TPU) ile EFÜ kullanılarak üretilen deniz süngerinden (*Euplectella aspergillum*) türetilen, biyolojik olarak ilham alınan kafes mimarileri incelenmiştir. Üretilen yapılar basma yüklemesi altında test edilmiştir. Sonuçlar sert (PLA) ve yumuşak (TPU) malzemelerin birleştirilmesinin enerji emilimini artırdığını göstermiştir. Biyolojik olarak ilham alınan kafes yapıları, enerji emici geri dönüşümlülüğünden ödün vermeden gelişmiş performans göstererek en yüksek verimliliğe ulaşmıştır. Bu araştırma daha iyi enerji emici bir malzeme tasarımı potansiyelini ortaya koymaktadır (Sharma ve Hiremath, 2023).

Chen ve diğ. (2018), altıgen ve üçgen geometrilere sahip, sabit hızlı darbe altında silindirik kafes yapıların dinamik davranışını incelemişler. Kafes yapıların dinamik plato geriliminin analitik çözümleri olduğunu tespit etmişler (Chen ve ark., 2018). Anizotropik ızgaralara sahip kompozit silindirik kafes kabuk yapılarının eksenel burulma ve eğilme gerilim koşulları altındaki burkulma davranışı Morozov ve diğ. (2011) tarafından tartışılmıştır. Kritik yükler altında kompozit kafes yapıların tasarımının analizini kolaylaştırmak için sayısal modeller geliştirilmiştir (Morozov ve ark., 2011). Örneğin Li ve diğ. (2023), basma gerilimi altında hacim merkezli kübik kafeslerin ve üç çeşit ÜPMY kafesinin enerji emme kapasitelerini ve mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Deneysel bulgularda ÜPMY Elmas ve Gyroid kafeslerin basma kuvvetleri açısından HMK kafeslerinden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir (Li ve ark., 2023). Guo ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, düğümlü bir denizyıldızı elmas-ÜPMY kafesi tasarlamışlar; sonlu elemanlar ve deneysel yöntemler kullanarak mekanik davranışını, enerji emilimini ve hasara karşı dayanıklılığını incelemişler. ÜPMY elmas kafesleri, büyük gerinimlerde mükemmel hasar direnci ve elastoplastik benzeri deformasyon sergilerken, %57'den fazla sertlik ve mukavemeti korumuştur (X. Guo ve ark., 2023).

2.4. Biyobozunur Omurga İmplantları

Son yıllarda biyolojik olarak parçalanabilir implant teknolojisi, vücutta doğal olarak çözünerek ikincil cerrahilere olan ihtiyacı ortadan kaldırma potansiyeli nedeniyle ilgi görmüştür. Bu amaçla araştırılan çeşitli malzemeler arasında magnezyum alaşımları, biyobozunurluk, biyouyumluluk ve doğal kemikle benzer mekanik özelliklerin eşsiz kombinasyonu sayesinde öne çıkan bir malzemedir (Waizy ve ark., 2013). Magnezyum bazlı implantlar, vidalar, pimler ve plaklar gibi ortopedik uygulamalarda umut

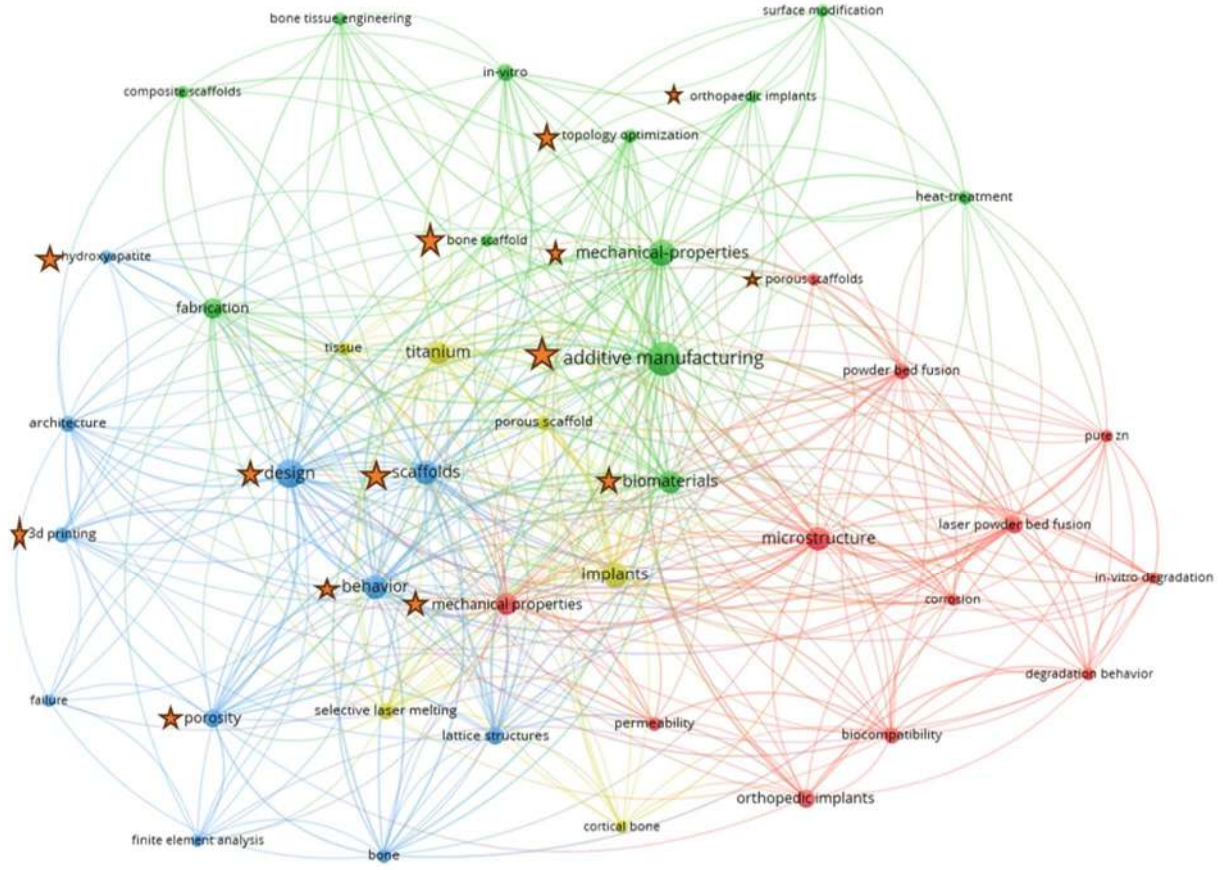
verici sonuçlar göstermiştir. Ancak magnezyum implantlarının en büyük zorluklarından biri, bozulma hızını kontrol etmektir; çünkü hızlı korozyon fazla hidrojen gazı üretebilir ve bu da komplikasyonlara yol açabilir (Ben Amara ve ark., 2023). Bunu ele almak için, korozyon sürecini yavaşlatmak ve biyoyumu artırmak amacıyla kalsiyum-fosfat ve poli laktik-ko-glikolik asit (PLGA) gibi polimer kaplamalar şeklinde çeşitli yüzey işlemleri geliştirilmiştir. Bu ilerlemeler önemli bir gelişmeyi işaret etse de, biyolojik olarak parçalanabilir implantların performansını optimize etmek ve klinik uygulamalarda güvenli ve etkili bir şekilde kullanılmalarını sağlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Biyobozunur malzemeler çevreye ve geri dönüşüme önemli katkılar sağlar. Biyobozunur malzemeler zamanla vücutta doğal olarak çözünür ve çevreye zarar vermeden biyolojik olarak uyumlu maddelere dönüşür. Bu malzemeler geleneksel malzemelere kıyasla daha çevre dostudur ve geri dönüşüm süreçlerine katkıda bulunur. Biyobozunur implantlar tıbbi atık miktarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğine ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlar. Biyobozunur malzemeler hem tıbbi hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunduğundan, gelecekte daha yaygın olarak kullanılmaları beklenmektedir. Biyoyumluluğu yüksek, mekanik dayanıklılığı iyi ve biyobozunur özellikteki yeni nesil malzemeler, omurganın doğal hareketlerini desteklerken implant reddi riskini azaltır ve vücutta çözünerek doğal iyileşme sürecine katkıda bulunur. Biyobozunur implantlar zamanla vücutta çözünerek ikinci bir cerrahi müdahaleye gerek kalmadan doğal olarak emilir (Xia ve ark., 2025). Ayrıca bu malzemeler, gözenekli latis yapılarla birleştirildiğinde hücre göçünü teşvik eder, yeni kemik oluşumunu destekler ve osteointegrasyonu artırır. Biyobozunur özellikleri sayesinde implant, zamanla vücutta çözünerek doğal dokuya yerini bırakır. Böylece tedavi süreci tamamlandığında ikinci bir cerrahi müdahaleye ihtiyaç kalmaz. Bu durum, çevre dokular üzerindeki stres farklarını azaltarak komplikasyon risklerini en aza indirir. Bu malzemeler vücudun doğal dokusuyla uyumlu bir şekilde çalışarak inflamasyon yanıtları azaltır, bu da hastaların daha konforlu bir iyileşme süreci geçirmesine yardımcı olur.

Biyobozunur omurga implantların mukavemetini ve kemik ile uyumunu artırmak amacıyla seramik, metal tozları ve doğal katkı lifleri polimer matrisine katılır. Özellikle hidroksiapatit (HAp) ve biyolojik cam gibi seramik tozları, osteoindüktif özellikleri sayesinde kemik büyümesini ve entegrasyonunu da desteklemektedir. Kemik doku mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bu seramikler, biyoyumlulukları ve kemik rejenerasyonuna katkıları ile öne çıkmaktadır (Zhang ve ark., 2022). Eklemeli üretim, kendine özgü özellikleri nedeniyle tıbbi implantlar oluşturmak için geleneksel yöntemlere uygulanabilir bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Rahatuzzam ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, kemik doku mühendisliğini hedefleyen 3B ile yazdırılmış iskelelerin tasarımı ve mekanik değerlendirmesinde biyoyumlu malzemeler olan akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asitin (PLA) kullanımını araştırmışlardır. Malzemelerin mekanik özellikleri basma testler ve SEA ile değerlendirilmiştir. PLA'nın kemik doku rejenerasyonun potansiyeli açısından ABS'den daha iyi

performans gösterdiği ve kemik onarımında mühendislik uygulamaları için bir biyomalzeme olarak maliyet etkinliğini ve erişilebilirliğini göstermiştir (Rahatuzzaman ve ark., 2024). Benzer şekilde özellikle omurga, ortopedik ve kardiyovasküler implantlar gibi biyomedikal uygulamalarda da bu tür biyobozunur implantlar kullanılabilir.

Cao ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, schwarz ve gyroid gibi ÜPMY yapıları tasarlayarak, doku iskeleleri için potansiyel uygulamalar sunmuşlardır. Polibütilen adipat tereftalat ve PLA tabanlı biyobozunur polimer kompozitler esneklikleri, termal ve reolojik özellikleri nedeniyle biyomedikal yumuşak iskeleler ve giyilebilir cihazlarda kullanılmak üzere önerilmiştir (Cao ve ark., 2023). Deng ve diğ. (2022), çift fazlı kafesler de dahil olmak üzere kafes yapıları, hafif ve geliştirilmiş mekanik özellikler sunmaktadır. Yeni bir karma yapısal tasarım stratejisi, daha yüksek enerji emilimi ve hafiflik özellikleri sağlayarak gelişmiş kafes yapılarına katkıda bulunmaktadır (Deng ve ark., 2022). Hussain ve diğ. (2023), HMK, YMK ve elmas bazlı yüzey elemanlarından yapılmış birim hücreler kullanarak yeni fonksiyonel derecelendirilmiş radyal hibrit yapıları değerlendirmişlerdir. Malzeme olarak polilaktik asit (PLA) ve üretim yöntemi olarak Eritilmiş Filament Üretimi (EFÜ) kullanılarak yapılan yarı-statik basma testleri uygulamışlar. Bu fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kafes yapılarının mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. YMK birim hücre boyutundaki ve yapısal burkulmanın azaltılmasına rağmen basma modülü, nihai dayanıklılık ve özgül enerji emilimi açısından kiriş tabanlı benzerlerinden daha iyi performans sergilemiştir (Hussain ve ark., 2023). Şekil 2.1’de eklemeli imalat ile üretilen omurga implantıyla ilgili yapılan literatür çalışmaların anahtar kelimeleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat ile üretilen omurga implantıyla ilgili yapılan çalışmaların anahtar kelimeleri.

2.5. Optimize Edilmiş Omurga İmplant Tasarımı

Çalışmada kullanılan optimize edilmiş omurga implant tasarımı ile ilgili literatür kapsamında Yu ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, özellikle hastaya özgü anizotropik dönme tepkilerini ele alarak, doğal disklerin mekaniğini taklit etmek üzere tasarlanmış yeni bir kafes tabanlı yapay omurga diski (YOD) sunmaktadırlar. Makine öğreniminin özellikle yapay sinir ağlarının yeteneklerinden yararlanarak yapılan araştırma, YOD tasarımını otomatikleştirmek için üye boyutlandırmasıyla birleştirilmiş, verimli bir topoloji optimizasyon yöntemi önermektedir. Bulgular, optimize edilmiş YOD'lerin L2-L3 ve L4-L5 seviyelerinde insan lomber disklerinin sertliğiyle eşleştiğini ve optimizasyon sürecinde hızlı bir yakınsama oranı göstermektedir. Genel olarak çalışma, kafes tabanlı YOD'lerin hastaya özgü mekanik tepkileri etkili bir şekilde taklit edebileceğini ve makine öğrenimi teknikleri aracılığıyla tasarım verimliliğini artırabileceğini vurgulamaktadır (Yu ve ark., 2023). Wei ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, destek çapını ve birim hücre boyutunu değiştirerek YMK kafes ve kemik yapılarından oluşan bir kompozit tasarlamışlar. Bu tasarım ile sertlikleri kolayca değiştirilebilir ve kemiğin elastik modülü ile eşleştirilebilir, böylece gerilim koruması önlenir (Y. L. Wei ve ark., 2022). Sokullu ve diğ. (2022)

yaptıkları çalışmada, HMK ve YMK kafes yapılarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. YMK yapısı en yüksek basma ve çekme davranışını sergilerken, gyroid numuneler en yüksek akma gerilimi ve enerji emilim kapasitelerini göstermiştir (Sokollu ve ark., 2022).

2.6. SLA (Stereolithography) ile İmplant Üretimi

Çalışmada kullanılan SLA ile implant üretimi alanındaki literatür burada değerlendirilmiştir. Koç ve diğ. (2026) yaptıkları çalışmada, hidroksiapatit nanopartiküllerinin (nano-HAp) termal döngü sonrası 3B yazıcı ile üretilmiş bir kron reçinesinin yüzey pürüzlülüğü ve Vickers sertliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Değişken nano-HAp konsantrasyonlarına (%0, %1, %2, %3) sahip numuneler test edilmiştir. Sonuçlar, termal döngünün tüm gruplarda yüzey pürüzlülüğünü artırdığını ve sertliği azalttığını göstermiştir. %3 nano-HAp grubu en yüksek yüzey pürüzlülüğüne ($1,16 \pm 0,47 \mu\text{m}$) sahip ve genel sertlik düşüşüne rağmen termal döngü sonrası en yüksek Vickers sertliğini ($24,66 \pm 1,51 \text{ VHN}$) korumuştur. SEM analizi, daha yüksek nano-HAp konsantrasyonlarıyla ilişkili olarak artan yüzey düzensizliklerini ortaya koymuştur. Bu nedenle nano-HAp'nin eklenmesi hem yüzey hem de mekanik özellikleri etkilemiş olup, %3'lük bir konsantrasyon yaşlanma sonrası artan sertlik ve pürüzlülük arasında bir denge sağlamıştır (Koç, ve ark., 2026). Gao ve diğ. (2025) yaptıkları çalışmada, omurlararası füzyon kafesleri için LCD foto-kürleme, 3B baskı teknolojisi kullanarak yeni bir hidroksiapatit/polimer kompozit geliştirmişler. Çalışma %30 ağırlıkça hidroksiapatit içeriğinin insan kortikal kemiğiyle karşılaştırılması sonucunda, yaklaşık 102 MPa basma dayanımı sağladığını ortaya koymaktadır. Füzyon cihazı hücre çoğalmasını ve kemik büyümesini teşvik ederek %80'in üzerinde hücrenin hayatta kaldığını göstermektedir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, bu LCD tabanlı teknoloji daha düşük maliyet, daha basit süreçler ve daha fazla tasarım esnekliği sunarak bu alanda umut verici uygulamalara işaret etmektedir (Gao ve ark., 2025). Palhares ve diğ (2024) çalışmalarında polikaprolakton metakrilat (PCLMA) ve fonksiyonelleştirilmiş hidroksiapatit Silisyum (HAp-Si) kullanarak fotopolimerize edilebilir bir kompozit reçine oluşturarak, SLA baskı için biyoaktif malzemelerin geliştirilmesindeki zorlukları ele almaktadırlar. Fonksiyonelleştirme, organik polimer ile inorganik dolgu maddesi arasındaki uyumluluğu artırarak yapısal stabiliteyi ve biyolojik uygulanabilirliği geliştirmişler. X-ışını kırınımı ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) dahil olmak üzere doğrulayıcı analizler malzemelerde yapılan değişiklikleri doğrulamıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), HAp-Si parçacıklarının dağılımında iyileşme olduğunu göstermiştir. Elde edilen reçine, silindirik numunelerin 3B baskısı sırasında boyutsal doğruluk sergileyerek, doku mühendisliği ve biyoaktif implant uygulamalarında kullanım potansiyeli göstermiştir (Palhares ve ark., 2024).

Chen ve diğ (2024) yaptıkları çalışma ile, etkili kemik onarımı sağlayabilen bir GelMA/HAP hidrojelini sunmaktadır. Yazarlar, GelMA ve HAP'ı %10-50 katı içeriğe sahip bir hidrojelde karıştırarak, stereolitografi yoluyla kademeli gözenekli bir yapı tasarlamışlar. GelMA/HAP'ın sol-jel özelliklerinden

yararlanılarak, hidrojel ekstrüde edilmiş ve katmanlar halinde döşenmiş, birbirine bağlı gözenekler oluşturmak için UV ışınıyla katılaştırılmıştır. Dış hidrojel yapısı, artık lazer enerjisi nedeniyle daha da polimerleşerek, tek adımda kemik benzeri kademeli yapıların basılmasına olanak sağlamıştır. Kırılma parametreleri ve seramik konsantrasyonu ayarlanarak, gözenek çapı 50-260 µm arasında kontrol edilmiş ve sıkıştırılmış alanın kalınlığı 130-670 µm arasında değişiklik göstermiştir (Chen ve ark., 2024).

2.7. Amaç ve Hedefler

2.7.1. Amaçlar

Bu çalışmanın temel amacı, omurganın karmaşık biyomekanik yükleme koşullarını ve biyolojik iyileşme süreçlerini bütüncül bir yaklaşımla ele alarak, biyomimikri temelli, fonksiyonel olarak gradyanlı, biyobozunur ve optimize edilmiş bir omurga implantı geliştirmektir. Çalışmada geleneksel metal ve katı implantların neden olduğu stres kalkani, yetersiz osseointegrasyon ve uzun dönem klinik komplikasyonlara çözüm üretmek amacıyla, doğal kemik dokusunun hiyerarşik ve poroz yapısını taklit eden ileri seviye latis tabanlı implant tasarımları önerilmektedir. Literatürden farklı olarak implant geometrileri, yük paylaşımını kemik-implant arayüzünde dengeleyecek şekilde sayısal optimizasyon yöntemleriyle geliştirilmiştir.

Biyobozunur omurga implantlarının üretiminde kullanılabilecek iki farklı eklemeli imalat teknolojisi olan Stereolithography (SLA) ve Eritilmiş filametli üretim (EFÜ) yöntemleri, Polylaktik asit (PLA) malzeme kullanılarak karşılaştırılacaktır. Çalışmanın temel amacı, her iki üretim yönteminin geometrik doğruluk, yüzey kalitesi, mekanik dayanım ve biyouyumluluk açısından performans farklılıklarını değerlendirmektir. İmplant geometrisi, mekanik dayanım, gözeneklilik, ağırlık ve biyomekanik uyumluluk gibi kriterleri dikkate alan ÇAGA ile optimize edilecektir. SLA teknolojisi, yüksek çözünürlüğü (16-32 µm) ve pürüzsüz yüzey kalitesi sayesinde karmaşık geometrilerin hassas üretimine imkan tanırken, fotopolimer reçineler genellikle kırılğan bir yapı sergilemektedir. EFÜ yöntemi ise daha düşük çözünürlükle (100-200 µm) çalışmasına rağmen, biyobozunur PLA malzemenin kolay işlenebilmesi, düşük maliyet ve fonksiyonel prototip üretimi açısından avantaj sağlamaktadır.

Biyouyumlu fotopolimer reçine ve hidroksiapatit katkılı kompozitlerin SLA yöntemiyle hücresel implant yapıları halinde üretilerek, omurga implantları için mekanik ve biyouyumluluk açısından uygunluğunun ortaya konması hedeflenmektedir. Burada optimize edilmiş implant geometrisi her iki teknoloji ile üretilerek; yüzey pürüzlülüğü, yoğunluk, gözeneklilik ve basma dayanımı gibi parametreler üzerinden deneysel karşılaştırmalar yapılacaktır. Yapılan bu çalışma ile biyomedikal alanında literatüre bir katkı sağlanacaktır.

2.7.2. Hedefler

Çalışmanın temel hedeflerini şöyle sıralayabiliriz:

Mekanik uyumluluk sağlamak: Kafes yapılarının elastik modülünü, çevredeki kortikal ve trabeküler kemiğin modül aralıklarıyla uyumlu hale getirerek stres kalkını etkisini azaltmak.

Parametrik tasarım esnekliği oluşturmak: Bağlı yoğunluk, destek kalınlığı, radyal hücre ve çevresel hücre bölünme parametrelerini Genetik Algoritmalar (GA) ile optimize ederek anatomik ve mekanik gereksinimlere göre uyarlanabilir kafes geometrileri elde etmek.

Hasta için spesifik implant geliştirmek: BT/MR verilerini tersine mühendislik sürecine entegre ederek bireysel anatomik yapıya tam uyum sağlayan, kişiselleştirilmiş implant modelleri tasarlamak.

Yük taşıma kapasitesini artırmak: Silindirik ve radyal simetriye sahip kafes formlarıyla eksenel yüklerin dengeli dağılımını sağlayarak kırılma ve lokal stres birikimlerini minimize etmek.

Yorulma dayanımını ve uzun ömürlülüğü artırmak: YMK-Core, YMK-Petal ve YMK-Mesh gibi sünek deformasyon davranışı gösteren konfigürasyonlarla, döngüsel yükleme altında stabil enerji absorpsiyonu sağlamak.

Eklemeli üretimle kaliteli ürün sağlamak: PLA gibi biyouyumlu biyobozunur malzemelerle katmanlı üretim tekniklerini kullanarak, karmaşık kafes geometrilerini yüksek hassasiyetle üretmek ve hızlı prototipleme sürecini desteklemek.

SLA yöntemi ile kompozit üretim: Fotopolimer reçineye hidroksiapatit (HAP) seramik katkısı eklenerek, SLA yöntemiyle biyomekanik olarak uyumlu, kontrollü bozulma davranışı sergileyen ve osteokondüktif özelliklere sahip latis omurga implantlarının tasarlanması, üretilmesi ve mekanik açıdan kapsamlı olarak değerlendirilmesidir.

Sonlu elemanlar analizi: Eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin SEA ile simülasyonunu yaparak, deneysel ortamda yapılan analizlerle karşılaştırmak.

2.7.3. Hipotez

Bu tezde ortaya konulan temel hipotez, eklemeli imalat ile üretilen gözenekli ve biyobozunur omurga implantlarının, topoloji kontrollü kafes mimarileri kullanılarak tasarlandığında, hem mekanik dayanım hem de enerji absorpsiyonu açısından geleneksel homojen yapılı implantlara kıyasla iyi bir performans gösterebilir. Özellikle polar silindirik geometri ve YMK-tabanlı kafes topolojilerinin kullanılmasıyla, implantın yük taşıma kapasitesinin artacağı, deformasyonun daha kontrollü ilerleyeceği ve omurga dokusunun yük paylaşımına biyomekanik olarak daha uygun bir davranış sergileyeceği varsayılmaktadır. Bu kapsamda değişken gözenek oranı, destek yapı yönelimi ve hücresel yoğunluk dağılımının implantın rijitlik ve dayanım özelliklerini belirgin şekilde iyileştireceği öngörülmektedir.

Diğer hipotez, biyobozunur malzemeler kullanılarak eklemeli imalat yoluyla kafes halinde yapılar üretildiğinde, hem biyomekanik gereksinimlere uyumlu hem de kontrollü biyobozulma davranışı sergileyebileceği üzerine kuruludur. Genetik algoritma tabanlı parametrik tasarım, SEA ve deneysel basma testlerinin birlikte kullanılmasıyla optimize edilen bu yapının, omurga implantlarında gerekli olan yüksek dayanım, düşük rijitlik dengesini sağlayarak implantın çevre dokularla uyumlu bir yük aktarımına imkan tanıyacağı beklenmektedir.

Bu çalışmada ayrıca biyouyumlu bir fotopolimer reçineye, hidroksiapatit (HAp) seramik katkısı eklenerek, stereolitografi (SLA) yöntemiyle üretilen latis implant yapıların, biyouyumlu reçineye kıyasla mekanik dayanım, enerji sönümleme kapasitesinde iyileşme göstereceği düşünülmektedir. Buna ilave olarak kontrollü biyobozunurluk davranışını koruyarak, omurga implantları için biyomekanik uygunluğu noktasında bir performans sergileyeceği hipotezlenmektedir.

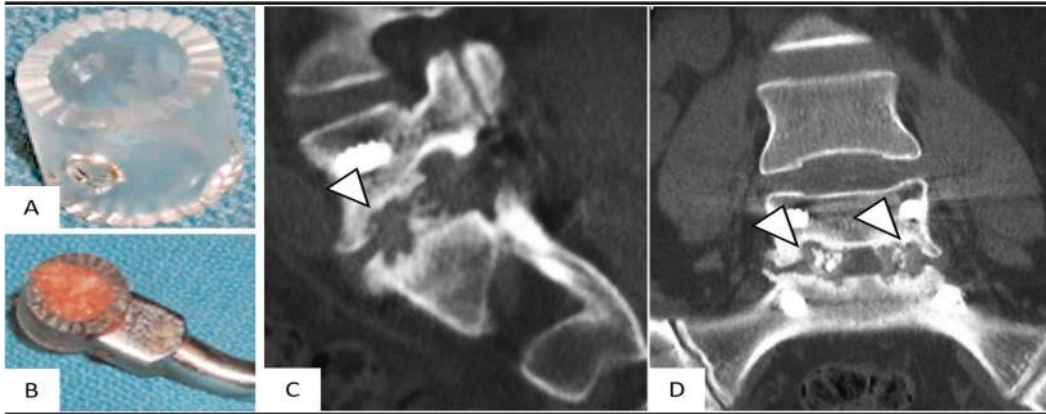


3. GENEL BİLGİLER

3.1. Biyobozunur Polimerler

Biyobozunur implantlar arasında polilaktik asit (PLA) ve türevleri (PLLA, PDLLA ve PLGA) gibi vücut içi kafes tasarımı için uygun malzemeler olarak ortaya çıkmıştır. Bu polimerler Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) onaylı biyouyumlu malzemeler olup (Lee ve ark., 2009), değişen monomer oranları ve moleküler konfigürasyonlarla ayarlanabilir özellikler elde edilebilir. Laktik asit ve glikolik asit bileşimlerini değiştirmedeki esneklik, kristallik, bozulma hızı ve mekanik mukavemet üzerinde kontrol sağlar. 2000'li yıllardaki ilk araştırmalar, biyolojik olarak emilebilir PLA bazlı kafeslerin kullanılmasının, titanyum kafeslere benzer füzyon oranlarına ulaşılabilceğini, ayrıca azaltılmış stres kalkını ve kademeli rezorpsiyondan sonra kemikle tamamen yer değiştirme potansiyeli gibi ek avantajlar sağladığını göstermiştir. Klinik öncesi çalışmalar PLA'nın sinir ve dural dokularla biyouyumluluğunu doğrulamış ve bozulma sırasında herhangi bir olumsuz pH değişikliği veya inflamasyon yanıt bildirmemiştir; bu da spinal uygulamalar için potansiyelini vurgulamaktadır (Myers ve ark., 2022).

Hydrosorb™ (PLDLLA) kafes, 2000'li yılların başında FDA onayı ve daha sonra Avrupa'da CE işareti alarak klinik dönüşümde önemli bir dönüm noktası olmuştur. PLDLLA kopolimerinden üretilen Hydrosorb™ kafes, 12 aya kadar olumlu mekanik tutunma ve üç ila dört yıl içinde tamamen bozulma göstermiştir. Transforaminal lomber vücut içi füzyon (TLIF) ve posterior lomber vücut içi füzyon (PLIF) prosedürlerinde yapılan ilk klinik çalışmalar, yüksek füzyon oranları (%96,8'e kadar) ve minimum komplikasyonla kısa vadeli sonuçlar göstermiştir (Laubach ve ark., 2022). Klinik öncesi hayvan modelleri hidroksiapatit/PLLA (HAp/PLLA) gibi kompozit çalışmalar, bu malzemelerin potansiyelini daha da destekleyerek, geleneksel kafeslere kıyasla üstün kemik teması ve entegrasyonunu ortaya koymuştur (Sui ve ark., 2007). Şekil 3.1'de insan vücuduna yerleştirilen polimer Hydrosorb vücut içi kafes implantı görülmektedir.



Şekil 3.1. Hydrosorb kafesinin klinik uygulaması. 2 mm kalınlığında, 10 mm yükseklik x 13 mm çap ölçülerinde örnek bir Hydrosorb kafesi (Frost ve ark., 2011).

Kafes yapıların üretiminde epoksi, poliamid ve ABS gibi polimerler önemli ölçüde kullanılır. Bu polimerler, düşük maliyetli depolama, bulunabilirlik ve işleme kolaylığı gibi avantajlar sağlar. Ancak bu polimerlerin işleme sırasında tehlikeli duman emisyonu gibi bazı sorunları vardır ve biyolojik olarak parçalanamazlar. Bu polimerler kullanımdan sonra çöplüklere atıldıkları için çevreyi kirletmektedirler. Bu sorun biyolojik olarak parçalanabilen polimerler kullanılarak oluşturulan yapılarla çözülebilir. PLA'nın sertliği ve baskısının basitliği, onu prototiplerden süs eşyalarına kadar çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir (Alizadeh-Osgouei ve ark., 2021). PLA'daki biyolojik parçalanabilirlik, sürdürülebilir uygulamalarla tutarlıken, TPU'nın bu özelliği baskı ile ilgili sorunlar ortaya çıkarabilmektedir. Tasarlanmış kafes davranışları, kafes geometrisi, malzeme özellikleri ve mekanik tepkinin etkileşimi tarafından kontrol edilir (Alemayehu ve Todoh, 2024). Bu gelişmeler geleneksel mühendislik malzemelerinin özelliklerini aşan kafes yapılarının oluşturulmasını sağlayarak, kafes araştırmaları için yeni yollar açmıştır (Talukdar ve ark., 2022). İki kafes yapısının birleştirilmesi ve eklemeli üretim süreçlerindeki ilerlemeler sayesinde kafes üretimi bir devrim geçirmiştir.

Biyolojik olarak parçalanabilir implantların en önemli avantajlarından biri, uzun vadeli yabancı cisim reaksiyonlarını en aza indirirken, doğal doku rejenerasyonunu destekleme kabiliyetleridir. Örneğin kemik iyileştirme uygulamalarında, biyolojik olarak parçalanabilir vidalar veya plakalar başlangıçta yapısal stabilite sağlar ve ardından yeni kemik dokusu oluştuğunda parçalanarak, vücudun mekanik yükünü kademeli olarak devralmasını sağlar. Kardiyovasküler uygulamalarda biyolojik olarak parçalanabilir stentler, geçici olarak kan damarlarını destekler ve ardından kaybolarak kalıcı stentlerle ilişkili kronik inflamasyon veya tromboz gibi komplikasyonları azaltır (Xia ve ark., 2025). Buna rağmen biyolojik olarak parçalanabilir implantların geliştirilmesinde ve klinik kullanımında zorluklar devam etmektedir. Bozulma hızının doku iyileşme sürecine uyum sağlayacak şekilde kontrol edilmesi kritik öneme sahiptir. Çok hızlı bozulma mekanik destek kaybına, çok yavaş bozulma ise inflamasyona veya iyileşmenin gecikmesine neden olabilir.

Cerrahi müdahaleler genellikle stabiliteyi sağlamak, disk yüksekliğini korumak ve ağrıyı hafifletmek için omurga füzyonu veya vücut içi implantasyonu içermektedir. Genellikle titanyum veya alaşımlarından üretilen geleneksel metalik implantlar, tatmin edici klinik performans göstermektedir. Metalik implantlar yüksek mekanik dayanıklılık sağlasa da, sertlikleri genellikle doğal kemiğin sertliğinden çok daha fazladır. Mekanik özelliklerdeki bu uyumsuzluk, zamanla stres kalkanına, kemik erimesine ve implant gevşemesine yol açabilir (Meena ve ark., 2021). Kemik, üzerine binen yüke göre kendini yenileyen canlı bir dokudur. Metal implantlar (özellikle titanyum alaşımları ve çelik) kemikten çok daha serttir. Yükün büyük kısmını implant taşıyınca, kemik boşta kalır ve bu mekanik uyarının eksikliği kemik dokusunun zayıflayıp erimesine (rezorpsiyon) neden olur (Chmielewska ve Dean, 2024). Bu, uzun vadede implantın gevşemesine ve tedavinin başarısız olmasına yol açar. Buna ilave olarak kalıcı implantlar, tanısal işlemlerde görüntüleme hatalarına neden olabilir. Manyetik metal implantlar,

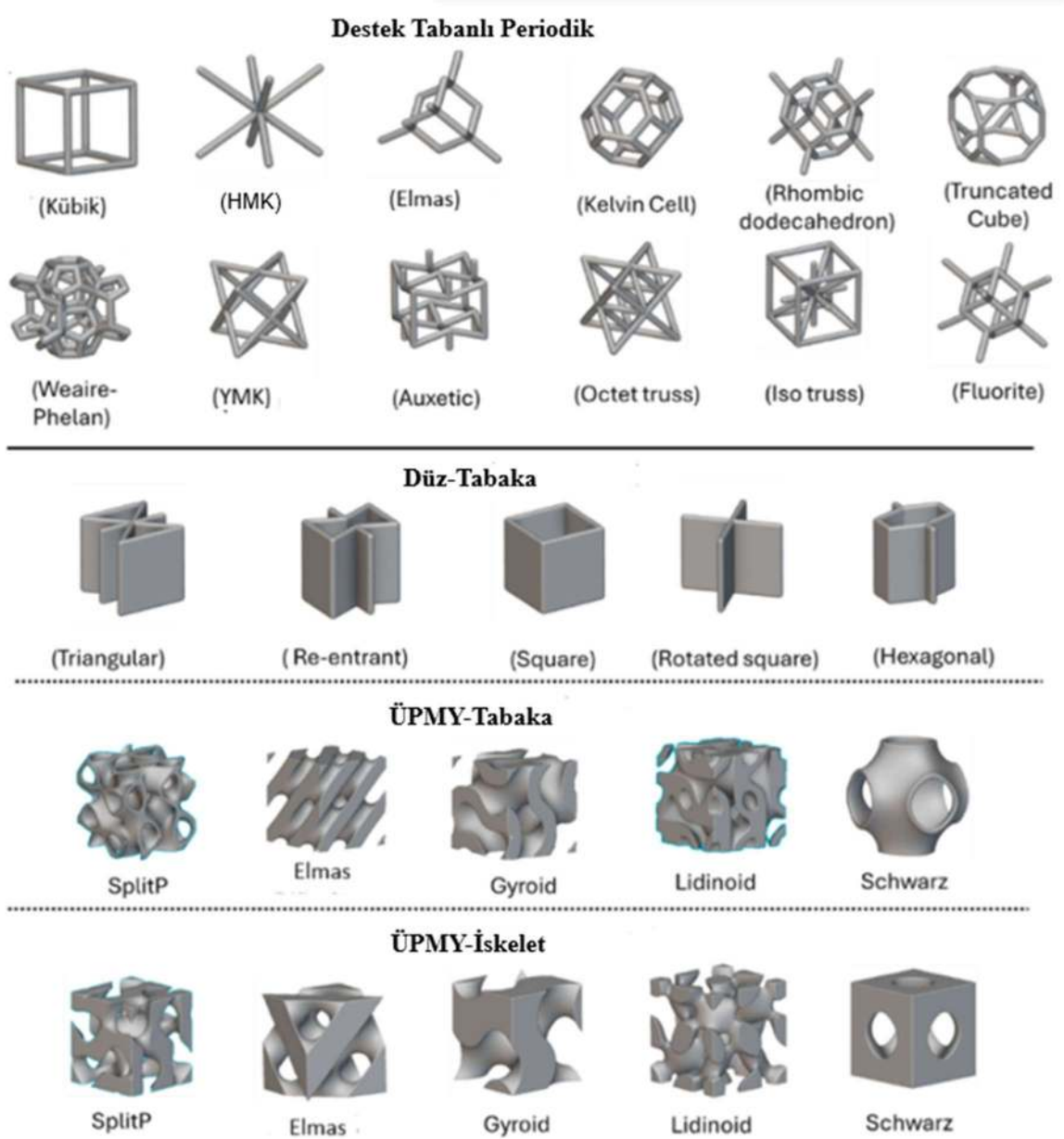
güçlü manyetik alanda tehlike oluşturabilir ve görüntüde ciddi bozulmalara neden olabilir. Bilgisayarlı Tomografi (BT)'de metallerin yansıması yoğun olduğu için “saçılma etkisi” yaparak implant çevresindeki dokuların net görüntülenmesini engeller (Kumar ve ark., 2006). Metalik implantlar vücutta parçalanmayarak ömür boyu yabancı madde bırakabilir. İmplant ömür boyu vücutta kaldığı sürece, vücut onu hafif de olsa bir yabancı madde olarak algılamaya devam eder. Bu uzun süreli tepki, çevre dokularda istenmeyen inflamasyon reaksiyonlara veya diğer komplikasyonlara zemin hazırlayabilir.

Omurga instabilitesi nedeniyle posterior cerrahi müdahale yöntemlerinde kullanılan vücut içi kafeslerin üretimi, talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bilgisayarlı yöntemlerle BT görüntülerinden, hastanın omurgasının Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yöntemiyle oluşturulması mümkündür (Verma ve ark., 2020). Bu yöntemler farklı implant geometrilerin üretiminde yetersiz kaldığından, son yıllarda karmaşık yapıların üretimini kolaylaştıran 3B yazıcı yöntemleri kullanılmaktadır (Siu ve ark., 2018).

3.2. Latis (Kafes) İmplant Tasarımı

Karmaşık yapılardan olan latis yapılar: iskeleler, hücre katılar, köpük yapılar, ağ dizileri ve gözenekli yapılar olarak da bilinir. Bunlar bağlantı noktalarındaki destekler ve düğümlerden oluşan bir veya daha fazla tekrarlanan birim hücrenin düzenlenmesiyle oluşturulan, üç boyutlu topolojik olarak düzenlenmiş açık hücreli yapılardır. Bu yapılar yüksek tasarım esnekliği, geniş yüzey alanı ve hafiflik özellikleri gibi çeşitli avantajlar sağlar (Amaya-Rivas ve ark., 2024). Söz konusu yeni tasarımlar, yüksek enerjili darbelere ve çeşitli mekanik yüklere karşı dayanıklılık gösterir. Bu nedenle dayanıklılığı artırmak için yoğunluk veya bileşimde değişiklikler gereklidir. Latis yapılar havacılık ve biyomedikal uygulamalarda büyük bir potansiyele sahiptir. Savunma alanında bu yapılar yüksek enerjili darbelere karşı koruma için hafif, ancak sağlam çözümler sunarak askeri ekipmanların verimliliğini ve manevra kabiliyetini artırabilir. Biyomedikal alanda kafes yapılar, doğal dokuların özelliklerini taklit edecek şekilde uyarlanabilir ve böylece hasta sorunlarını iyileştirmek için gelişmiş implantların ve tıbbi cihazların geliştirilmesini kolaylaştırır (Distefano ve ark., 2023).

Destek tabanlı ve yüzey tabanlı topolojiler, latis topolojilerinin iki farklı ailesidir. HMK, elmas kafesler ve diğer daha karmaşık giriş kombinasyonları gibi girişlere/desteklere dayalı, periyodik topolojiler ilk aileye dahildir. İkinci aile ise üçlü periyodik minimal yüzey (ÜPMY) fikrine dayanan yüzey latis bağlantılarına sahip topolojilerden oluşur. Schoen Gyroid, IWP, Schwartz ilkeli ve elmaslar, ÜPMY tabanlı kafeslerdir. Geometrilerine bağlı olarak, ÜPMY tabanlı kafesler levha ve iskelet alt ailelerine ayrılabilir. Geleneksel kafeslerle karşılaştırıldığında, ÜPMY'ler üstün mekanik özellikler ve enerji emme performansı sergilerler (Khan ve Riccio, 2024). Şekil 3.2'de latis yapıların örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Destek ve Yüzey tabanlı latis birim hücreler (Khan ve Riccio, 2024).

Matematiksel olarak modellenen latis yapılar aşağıdaki gibi verilmiştir.

Gyroid formülü : $\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x)$

Schwarz : $\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)$

Elmas: $\sin(x) * \sin(y) * \sin(z) + \sin(x) * \cos(y) * \cos(z) + \cos(x) * \sin(y) * \cos(z) + \cos(x) * \cos(y) * \sin(z)$

Lidinoid : $\sin(2*x) * \cos(y) * \sin(z) + \sin(2*y) * \cos(z) * \sin(x) + \sin(2*z) * \cos(x) * \sin(y) - \cos(2*x) * \cos(2*y) - \cos(2*y) * \cos(2*z) - \cos(2*z) * \cos(2*x) + 0.3$

Split P : $1.1 * (\sin(2*x) * \sin(z) * \cos(y) + \sin(2*y) * \sin(x) * \cos(z) + \sin(2*z) * \sin(y) * \cos(x)) - 0.2 * (\cos(2*x) * \cos(2*y) + \cos(2*y) * \cos(2*z) + \cos(2*z) * \cos(2*x)) - 0.4 * (\cos(2*x) + \cos(2*y) + \cos(2*z))$

Gyroid, ÜPMY elmas, HMK, YMK ve destek yapılı elmas gibi latis tasarımlarının seçimi, mukavemet, ağırlık ve malzeme verimliliğini dengeledikleri için çok önemlidir. Bu tasarımlar hafif veya darbeye dayanıklı yapılar gibi enerji emilimi, yük dağılımı ve mekanik performans gerektiren uygulamalar için idealdir. Belirli kullanımlar uygulanmadan önce performanslar, simülasyonlar ve deneyler yoluyla doğrulanmalıdır. Basma yükü, plato gerilimi ve Young modülü gibi temel mekanik özellikler için optimize edilmiş bu kafes yapılar, endüstri ve biyomedikal alana uyarlanabilir (Feng ve ark., 2022).

Belirli amaçlar veya talepler için performansı en üst düzeye çıkaran, düzenlenmiş 3B özellik değişikliklerine sahip bir latis yapısına, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş latis denir. Bu değişiklikler latis yapısının geometrik özelliklerinde, malzeme bileşiminde ve gözeneklilik yoğunluğunda değişiklikler içerir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş latis, farklı bölgelerde sertlik, mukavemet ve ısı iletkenlik dahil olmak üzere birçok latis parametresini optimize etmek için inşa edilebilir.

3.3. Biyomimikri Tasarım

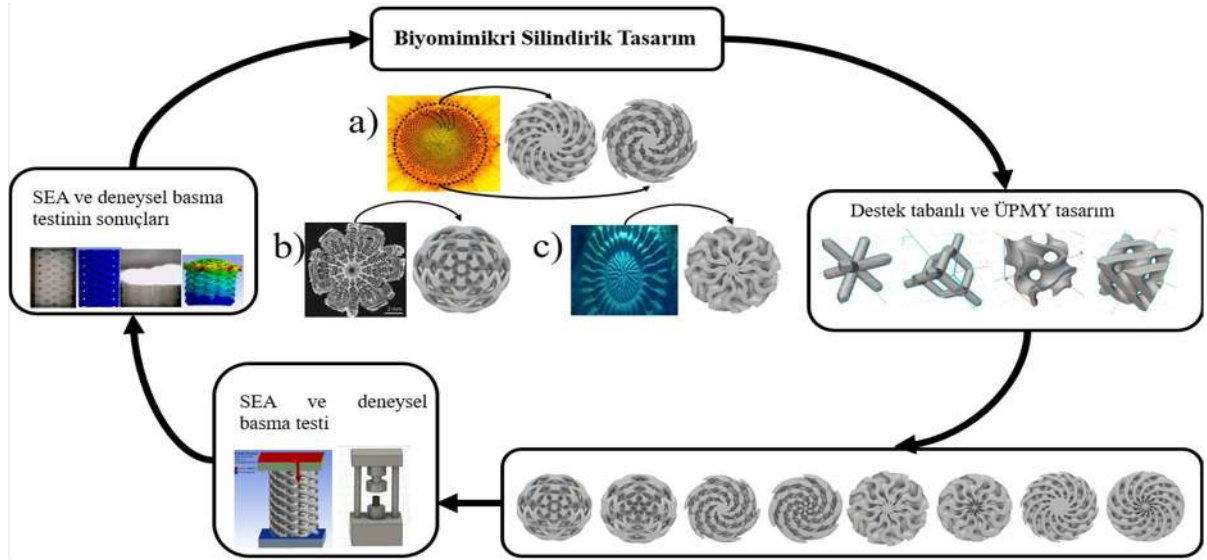
Biyolojik olarak ilham alınan kafes yapılar doğal verimlilik ve ileri mühendislik arasında bir sinerjiyi temsil eder. Doğada bulunan yapısal prensipleri taklit eden bu kafesler çeşitli uygulamalar için mukavemet, ağırlık ve işlevsellik açısından önemli avantajlar sunar. Örneğin bu malzemelerin potansiyelini tam olarak optimize etmek ve keşfetmek için ek çalışmalara ihtiyaç vardır. Daha doğrusu düzenlenmiş ve belirlenmiş topolojiye sahip gözenekli bir malzeme sınıfı kafes veya mimari malzemelere ihtiyaç artmıştır (du Plessis ve ark., 2019).

Biyolojik olarak ilham alınan kafes yapılar, fonksiyonel olarak silindirik derecelendirilmiş kafes yapı tasarımlarında ileri mühendislik ve doğal verimliliğin bir araya geldiğini göstermektedir. Silindirik yapıların mekanik ve enerji emilim yeteneklerini iyileştirmek için çeşitli stratejiler kullanılmıştır. Bu stratejiler arasında kafes silindirik yapılar, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılar, kompozit sandviçler ve takviyeli yapılar yer almaktadır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılar, kompozit oluşumlar, gözenekli matrisler, arayüzler ve şekil değiştiren mimariler dahil olmak üzere, biyolojik olarak ilham alınan silindirik kafes yapılara örnektir (Ha ve Lu, 2020). Bu kafesler doğanın temel prensiplerini taklit ederek çeşitli uygulamalarda mukavemet, ağırlık ve fayda açısından önemli avantajlar sunar. Mühendisler 3B yazıcı ve hesaplamalı tasarım kullanarak, çağdaş teknolojinin katı taleplerini karşılayan son derece özel yapılar oluşturabilirler. Bu yapılar çeşitli alanlardaki gelişmeler için bir ilham kaynağı sağlar ki bunlar çekicilikleri ve karmaşıklıklarıyla bilinir ve sıklıkla geleneksel üretim yöntemlerinin yeteneklerini aşarlar. Bu durum 3B yazıcının hızlı ilerlemesi sayesinde biyolojik olarak ilham alınan silindirik kafes tasarım malzemeleri için de mümkündür. Geleneksel hücresel katıların mekanik özellik alanını genişleten bu teknolojiler, üretim ve boyut kısıtlamaları dahilinde performansı optimize etmeyi amaçlayan çağdaş ürün tasarımının daha zorlu gereksinimlerini karşılar.

Dikkat çekici yapısal özelliklere sahip 3B ile yazdırılmış biyolojik ilham alınan silindirik kafes yapılar üzerine yapılan araştırmalar, teknolojinin karmaşık iç geometriler ve ince ayrıntılı yapılar oluşturma becerisi sayesinde hız kazanmıştır (Hussain ve ark., 2023).

Silindirik kafes yapılar, enerji emilimi içeren uygulamalarda en sık kullanılan yapılardır. 3B yazıcı bu yapıların evriminde önemli bir rol oynayarak, gelişmiş mekanik mukavemet ve düşük ağırlığa sahip, biyolojik olarak ilham alınan kafes tasarımlarının oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Çeşitli topolojik konfigürasyonlara sahip, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş, homojen ve biyolojik olarak ilham alınan kafeslerin yapısal özellikleri ve enerji emilimi son zamanlarda yapılan araştırmalara konu olmuştur (Zhu ve ark., 2022). Burada bahsedilen araştırmacılara göre, silindirik yapılar öncelikle enerji emici uygulamalarda kullanılmakta ve uzun, kararlı plato bölgeleriyle öne çıkmaktadır. Bununla birlikte tepe dayanımları ve sertliklerinin düşük olduğu doğrulanabilir ve eğri altındaki alan, nispeten düşük sertlikleri nedeniyle azaltılabilir.

Araştırıldığı kadarıyla eksenel basma altında radyal fonksiyonel derecelendirilmiş ve düzgün bir silindirik kafesin enerji emilimi hakkında çok az rapor yayınlanmıştır. Bu çalışmalar hafif ancak sağlam çözümler arayan, doğal dokuların özelliklerini taklit etmeyi ve hasta sonuçlarını iyileştirmeyi amaçlayan biyomedikal çalışmalara kadar çeşitli sektörlerdeki inovasyon potansiyelini vurgulamaktadır. Yapılan çalışmada 3B yazıcı ile üretilen doğadan ilham alınan sekiz benzersiz silindirik düzgün yapı ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş PLA silindirik latis yapılar incelenmiştir. Sonlu elemanlar (SE) ve deneysel analizler, tekdüze ve derecelendirilmiş silindirik kafes yapılarının basma koşulları altında deformasyonunu, hasar mekanizmalarını ve enerji emilimini incelemek için kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Eklemeli imalat (Eİ), kafes yapılarına sahip biyomedikal cihazların karmaşık, özel gözenekli şekilleri hızla üretmesini sağlayarak gelişmektedir (Oymak ve ark., 2025). Şekil 3.3’de bu çalışmanın akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Biyolojik olarak ilham alınarak yapılan dizaynların akış şeması a) Ay çekirdeği b) Clematis vitalba c) Torquigener albomaculosus (Oymak ve ark., 2025).

Gözenekli malzemelerin yapısı değişikçe işlevleri de etkilenir. “Gözeneklilik” terimi genellikle kafes yapılarını tanımlamak için kullanılır. Doku mühendisliğinde kullanılan kemik iskeleleri, hücre büyümesini kolaylaştırmak için çok sayıda gözenek, doğru gözenek boyutları ve geniş bir özgül yüzey alanına sahip olmalıdır (Lutzweiler ve ark., 2020). Milyonlarca yıllık evrimin ötesinde, biyolojik doku yapıları çeşitli zorlu ortamlara uyum sağlayarak, eş merkezli formlarda görüldüğü gibi, gelişmiş mukavemet ve sertliğin yanı sıra şok ve hasar direnci sergilemiştir (Meyers ve ark., 2008).

Eriyik Biriktirme Modellemesi, aynı zamanda Eriyik Filamentli Üretim (EFÜ) olarak da bilinir. Bu eklemeli üretimle bir şeyler üretmenin yaygın bir yoludur. EFÜ ekonomiktir, birçok malzemeye uyumludur ve kullanıcı dostudur. Ancak toz yatak füzyonu veya lazer tabanlı teknolojilerin çözünürlüğüne ulaşamayabilir (Kladovasilakis ve ark., 2021). EFÜ işlevsel prototipleme, erken aşama tasarım yinelenmesi ve düzenlenmiş iç mimariye sahip yapılar inşa etmede mükemmeldir. Bu, özellikle tasarım aşamasında üretim sınırları hakkında bilgi toplarken etkilidir. EFÜ yalnızca ürün üretmek yerine 3B ile yazdırılmış mekanik olarak işlevsel spinal füzyon implantlarının üretimini kolaylaştırmak için bir tasarım kısıtlaması sağlar (Wu ve ark., 2023). Bu kısıtlamaları en başından itibaren hesaba katan bir üretime yönelik tasarım yaklaşımı uygulamak çok önemlidir. EFÜ’nin minimum özellik boyutu, destek gereksinimleri, kuvvetler ve anizotropik malzeme nitelikleri gibi sınırları vardır. Ancak bu implantları biyomekanik uyum, doğal kemikle biyolojik uyumluluk ve yapısal bütünlük sağlayacak şekilde tasarlamak zordur. İmplant tasarımıındaki önemli bir zorluk, bitişik spinal kemikle biyomekanik uyumluluğu sağlarken yapısal bütünlüğü, biyolojik entegrasyonu ve uzun vadeli stabiliteyi korumaktır (Ataollahi, 2023).

3B ile yazdırılmış kafes yapılar, açık veya gözenekli tasarımlar üreten, tekrarlanan birim hücrelerden oluşur. Kafes yapılar benzersiz mukavemet-ağırlık oranları, değiştirilebilen mekanik özellikleri ve etkili malzeme kullanımı nedeniyle değerlidir. Genellikle giriş tabanlı kafesler olarak tanımlanan bu yapılar periyodik veya kademeli olabilir; destekler ve düğüm noktaları içerir. ÜPMY tabanlı kafesler de burada uygulanır, gyroid veya elmas geometriler gibi pürüzsüz, sürekli yüzeyler sayesinde izotropik davranış ve gelişmiş yorulma direnci sağlar (Günther ve ark., 2023). Hafif yapısal bileşenler, kemik iskeleleri, ısı eşanjörleri ve darbe emiciler gibi uygulamalar için kafes yapıları, havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji endüstrilerinde önemli bir kullanım alanı bulmaktadır (Yu ve ark., 2025).

3.4. Genetik Algoritmalarla Parametrik Tasarım

Genetik algoritmalarla parametrik tasarım noktasında yapılan çalışmalarda, fiziksel prototiplemeye ihtiyaç duymadan performansı öngörmek ve iyileştirmek için sıklıkla sayısal simülasyonlarla geliştirilen kafes yapıları ileri tasarım yaklaşımları izler. Sayısal simülasyonlarla topoloji optimizasyonları ve üretken algoritmalar gibi karmaşık hesaplama teknikleri de kullanılabilir. Katmanlı üretim, işlevsel amaçlara yönelik karmaşık kafes tasarımlarının uygulanmasını mümkün kılmıştır (Cheng ve ark., 2017). Geleneksel kafes yapı inşa yöntemleri iki ana kategoride tanımlanır. Bunlar ileri tasarım ve topolojik optimizasyondur. İleri tasarım yaklaşımı, birim hücre boyutları ve duvar kalınlığı gibi yapısal parametrelerin ölçülen veya simüle edilen özellikleri, önceden tanımlanmış tasarım hedeflerini karşılayana kadar yinelemeli olarak değiştirilmelidir. Genellikle, kapsamlı bir alan bilgisine ihtiyaç duyduğumuzda, bu yöntem geleneksel bir (tasarım, üretim, test) döngü izler. Bu nedenle sıklıkla daha uzun geliştirme süreleri, daha yüksek deneysel maliyetler ve yapısal optimizasyona ulaşmada belirgin zorluklarla sonuçlanır (Almesmari ve ark., 2023).

Topoloji optimizasyonu daha fazla tasarım esnekliği sunar. Ancak aynı zamanda tasarım girdileri ile yapısal tepkiler arasında benzer eşleşmeler ve doğru mekanik davranış tahminini zorlaştıran geniş bir tasarım alanı gibi karmaşıklıklar da getirir (Pan ve ark., 2020). Yüksek güvenilirlikli sayısal simülasyonlara dayanan bu yöntem, güvenilir performans tahminleri sağlar. Hesaplamalı modelleme ve analiz kullanarak topolojik optimizasyon, fiziksel prototipleme ihtiyacını ortadan kaldırabilir ve geliştirme süresini ve ilgili maliyetleri önemli ölçüde azaltabilir. Bu hesaplama aracı, tasarımcıların geliştirme sürecinin erken aşamalarında tasarım seçeneklerini keşfetmelerine ve iyileştirmelerine yardımcı olur (Bandyopadhyay ve ark., 2023). Ancak bu implantları biyomekanik uyum, doğal kemikle biyolojik uyumluluk ve yapısal bütünlüğü garanti altına alacak şekilde tasarlamak zordur. İmplant tasarımındaki önemli bir zorluk, bitişik omurga kemiğiyle biyomekanik uyumluluğu sağlarken, yapısal bütünlüğü, biyolojik entegrasyonu ve uzun vadeli stabiliteyi korumaktır (Jayakumar ve ark., 2024).

Fiziksel prototiplemeye ihtiyaç duymadan performansı öngörmek ve iyileştirmek için sıklıkla sayısal simülasyonlarla geliştirilen bu tasarımlar, geleneksel ileri tasarım yaklaşımlarını izler veya topoloji optimizasyonları ve üretken algoritmalar gibi karmaşık hesaplama teknikleri kullanılır. Katmanlı üretim, işlevsel amaçlara yönelik karmaşık kafes tasarımlarının uygulanmasını mümkün kılmaktadır (Domínguez-Rodríguez ve ark., 2018).

İmplant geometrisi, pres-fit yerleştirme için klinik gerekliliklerin yanı sıra, omurlar arası boşluğun anatomik kısıtlamalarını da dikkate alan silindirik bir kafes tasarımıyla tanımlanır. Bu alanda yük taşıma verimliliği elde etmek için YMK, oktet kafes veya diğer mimari birim hücreleri kullanılarak destek tabanlı bir kafes topolojisi oluşturulur. Bağlantılı gözeneklilikleri kemik içeri büyümesini ve vaskülarizasyonu desteklerken, bu periyodik kafes yapıları yük aktarımı için ana çerçeveyi oluşturur (Meena ve ark., 2022). Diğer omurga implantı yapılarına vücut içi füzyon kafesleri de dahil olmak üzere, kıyasla birçok avantaj sağlayan YMK kafes, mekanik öngörülebilirlik ve üretilebilirlik açısından son zamanlarda giderek daha önemli hale gelmiştir. İmplant başarısızlığı riskini azaltmak ve süngerimsi kemiğin davranışını daha iyi simüle etmek için önemli olan nokta YMK kafeslerin eğilme baskınlığıdır, bu durum basma altında daha yavaş, kontrollü deformasyon sunar (Hussain ve ark., 2023). Bunlara ilave olarak, özellikle Ti6Al4V gibi tıbbi sınıf malzemelerde eklemeli üretim teknikleri için daha uygun olan YMK tasarımları, bükülmeyi en aza indiren ve baskı sırasında doğal füzyona izin veren ve kendi kendini destekleyen özelliklere sahiptir. Öte yandan Gyroid gibi ÜPMY kafesleri daha fazla yüzey alanına ve daha pürüzsüz yük yollarına sahipken (kemik büyümesi ve yorulma direnci için faydalıdır), karmaşık şekilleri sertlik yönetimini, gözeneklilik derecelendirmesini ve SEA hesaplama açısından daha zorlu hale getirebilir (Huang ve ark., 2023). Kemik uygulamalarında, eksenel derecelendirme, hassas sertlik düzenlemesi ve tutarlı mekanik davranış çok önemlidir. Silindirik YMK kafesleri daha mantıklı ve sağlam bir çözüm sunabilir (W. Guo ve ark., 2023).

Bu tasarım alanındaki optimum konfigürasyonlar için, çok amaçlı bir genetik algoritma (ÇAGA) kullanılarak potansiyeli belirlenebilir. Seçim, çaprazlama ve mutasyon kullanılarak aday tasarımlar zaman içinde değişir ve parametre değişkenleri kümeleri olarak saklanır. Optimizasyon, hedefleri çevreleyen kemiğe uygun mekanik sertlik, gerilim korumasını azaltmak için küçük bir omurga implant kütlesi, osseointegrasyonu iyileştirmek için geniş bir yüzey alanı ve lokalize hasarı azaltmak için düzgün gerilim dağılımıdır. Standart gerilime maruz bırakılan implantın SEA ile uygunluk fonksiyonları sağlanır (Han ve Sun, 2024).

Simüle edilmiş veya deneysel yükleme koşullarından elde edilen gerilim haritalarını kullanarak, kafesin mekansal derecelendirmesini yönlendiren gerilim odaklı optimizasyon, bu yöntemin önemli bir parçasıdır. Desteklerin kalınlığı ve birim hücrelerin boyutu, bölgedeki gerilim alanlarına bağlı olarak değişir. Bu, omurga implant yükleri daha iyi yönetmesini ve daha az malzeme kullanmasını sağlar.

Sonuç olarak kafes, mukavemetin gerekli olduğu yerlerde yoğun, biyolojik etkileşimin gerekli olduğu yerlerde ise gözenekli olan çeşitli yoğunluk seviyelerine sahip bir yapıdır (Sadeghinia ve ark., 2022).

Biyolojik olarak ilham alınan bu tasarım yöntemi, yeni nesil omurga implantları üretmek için biyomekanik, malzeme bilimi ve hesaplamalı tasarım fikirlerini bir araya getirir. Silindirik şekli, destek tabanlı kafes mimarisi ve evrimsel optimizasyonlarla birleştirilerek, hastanın kendine özgü mekanik ve anatomik ihtiyaçlarına uyan esnek ve yüksek performanslı bir çözüm oluşturur. Bu plan, omurga füzyon cerrahisinin daha uzun sürmesini, füzyon oranını artırmasını ve komplikasyon riskini azaltmasını sağlama potansiyeline sahiptir (Loenen ve ark., 2022). YMK silindirik kafes hesaplamalı tahminleri kontrol etmek için bir başlangıç noktası olarak Gibson-Ashby modeli uygulanmıştır. Radyal derecelendirme veya EFÜ kaynaklı yön özellikleri gibi geometrik anizotropilerin ve tekdüze olmayan birim hücre dağılımının, SEA'den türetilen sertlik ve von Mises gerilim dağılımlarını teorik ölçekleme yasalarıyla karşılaştırarak sonuçları nasıl etkilediğini gözlemlemek mümkündür. Bu yöntem her hastanın kendi anatomik ve biyomekanik sınırlarına sahip olmasına izin verir; parametrik tasarım çerçevesinin hücresel malzemelerin nasıl çalıştığına dair genel fikirlerle uyumlu olmasını sağlar (Rahman ve ark., 2023).

Katmanlı üretimdeki son gelişmeler, idealize edilmiş Gibson-Ashby tahminleri ile basılmış kafes performansı arasındaki farklılıkları, proses kaynaklı kusurlar (örneğin: tabaka gözenekliliği, yüzey pürüzlülüğü) nedeniyle vurgulanmıştır. Üretici tasarım, hesaplamalı mekanik ve hücresel malzeme teorisi, idealize edilmiş modeller ile pratik biyomedikal kullanımlar arasındaki mesafeyi kapatır. Gözenekli alanlar yapısal bütünlüğü tehlikeye atmadan biyolojik bütünleşmeye öncelik verirken, Gibson-Ashby çerçevesi yalnızca kafesin mekanik davranışını doğrulamakla kalmaz, aynı zamanda derecelendirme stratejisine de rehberlik ederek yüksek stres konsantrasyonlu alanların (örneğin: implant-kemik arayüzleri) mukavemet-yoğunluk ölçekleme yasalarına uymasını sağlar. Biyomimikri kavramlarını çok amaçlı evrimsel algoritmalarla birleştirilerek biyolojik işlevsellik ve mekanik uyumluluk için özel olarak tasarlanmış polar silindirik kafes tasarımları oluşturmaktadır. Bu hesaplamalı yöntemle hastaya özel gelişmiş implant tasarımlarına imkan veren malzeme kullanımı ve stres korumasını en aza indirirken, osseointegrasyonu artırır (Distefano ve ark., 2023).

Bu tasarım alanı içinde ÇAGA kullanılarak, ideal konfigürasyonlar bulunur. Aday tasarımlar seçim, çaprazlama ve mutasyon süreçleri kullanılarak ardışık nesiller boyunca gelişir ve parametre değişkenleri kümeleri olarak kodlanır (Ponnambalam ve ark., 2000). İmplantı çevreleyen kemiğe uyum sağlayan mekanik sertlik, stres korumasını azaltmak için minimum implant kütlesi, osseointegrasyonu iyileştirmek amacıyla yüzey alanı ve lokalize arızayı en aza indirmekte stres dağılımının homojenliği, optimizasyon hedefleri arasındadır. İmplantın fizyolojik omurga yükleri altındaki uygunluk fonksiyonları SEA ile türetilir.

Simüle edilmiş veya deneysel yükleme koşullarından elde edilen gerilim haritalarının, kafesin mekansal derecelendirmesini yönlendirdiği gerilim odaklı optimizasyon, bu yaklaşımın temel bileşenidir. Bu gerilim alanlarına verilen yerel tepkiler, destek kalınlığı birim hücre boyutlarına göre değişir ve implantın yüklere daha etkili bir şekilde direnmesini, fazla malzeme kullanımını azaltmasını sağlar. Sonuçta polar silindirik kafes yapı, mukavemet için gereken yerlerde yoğun, biyolojik etkileşim için gereken yerlerde gözenekli, işlevsel olarak derecelendirilmiş bir kafes yapısıdır (Bilhère-Dieuzeide ve ark., 2022). Bunlar gerilime yanıt veren ve bu kurulumda mekanik olarak optimize edilen tasarımlara olarak tanıyan, doğadan ilham alınan bir parametrik çerçeve sağlar. Silindirik koordinatlar, daha sonra genetik algoritma (GA) tabanlı bir optimizasyon sürecinde, genler olarak görülen yapısal parametreleri kontrol eder.

Kafesin mekanik şekli ve tepkisi büyük ölçüde her biri ayrı parametrelere bağlıdır. Bunlar: radyal bölümler (n_r), açısal bölümler (n_θ), eksenel katmanlar (n_z) ve destek kalınlığı (t). Radyal bölümler (n_r) iç çekirdekten dış kabuğa geçişi kontrol eder, bu da çekirdek ile kabuk arasındaki gözenekliliği değiştirir. Bu yükün olduğu yere yakın daha fazla destek ve ortaya daha az destek konulmasını sağlar; bu da ağırlıktan veya malzemeden tasarruf sağlar. Açısal bölümler (n_θ), silindir etrafındaki desteklerin simetrisini ve yönelimini kontrol eder. Bu, burulma sertliğini ve çevresel gerilimin dağılımını kontrol eder (Kouhi-Lakeh ve ark., 2024). Ayrıca eksenel katmanlar (n_z), silindirin yüksekliği boyunca işlevsel olarak derecelendirilmiş sertlik ekleyen, dikey segmentasyonu da tanımlar. Bu, doğal sistemlerin değişen mekanik ortamlara nasıl uyum sağladığına benzer. Destek kalınlığı (t), malzemenin yüklenmesiyle ne kadar sert, güçlü ve deforme edilebilir olduğu üzerinde doğrudan etkisi olan önemli bir gendir. Genetik algoritma, belirli yükleme koşulları için en iyi konfigürasyonları bulmak amacıyla bu parametreleri gen olarak kodlayarak, kafes yapılarını zaman içinde değiştirir. Simülasyonlardan veya deneylerden elde edilen stres alanları, algoritmanın ne kadar iyi çalıştığını değerlendirmek için kullanılır. Devamında stres konsantrasyonunu, ağırlığı veya enerji emilimini azaltan topolojiler oluşturur. Bu stres odaklı parametrik genetik algoritmalar (GA) optimizasyonu, hem güçlü hem de hafif biyolojik olarak ilham alınan kafes yapıları oluşturmayı mümkün kılar. Bu yapılar implantlarda, koruyucu cihazlarda ve adaptif mühendislik sistemlerinde kullanılabilir.

Yeni nesil üretken omurga implantları üretmek için, biyolojik olarak ilham alınan tasarım yaklaşımı, biyomekanik, malzeme bilimi ve hesaplamalı tasarım kavramlarını sentezler. Silindirik formun destek tabanlı kafes mimarisi ve evrimsel optimizasyonla birleştirilmesi, hastaya özgü mekanik ve anatomik ortama uygun, esnek ve yüksek performanslı bir çözüm sunar. Bu strateji, implant ömrünü uzatma, füzyon oranlarını yükseltme ve spinal füzyon cerrahisinde komplikasyon risklerini azaltma konusunda bir potansiyele sahiptir (Zolpakar ve ark., 2020).

Geometrik anizotropiden (örneğin: radyal derecelendirme, EFÜ kaynaklı yön özellikleri) veya düzensiz birim hücre dağılımından kaynaklanan değişimler, SEA ile türetilmiş sertlik ve von Mises

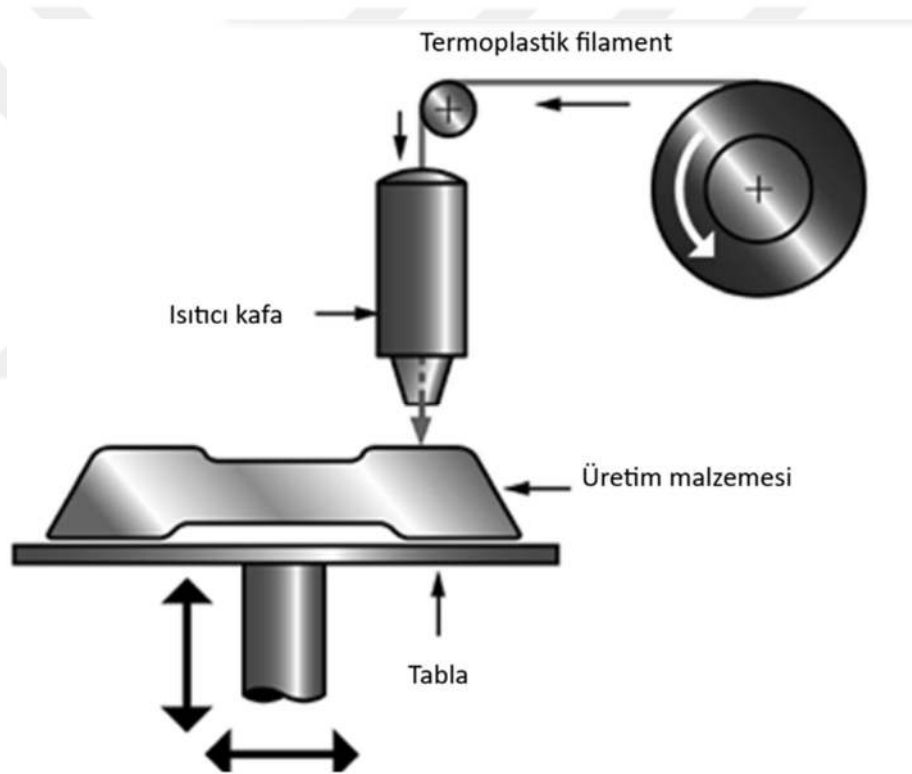
gerilme dağılımlarının teorik ölçekleme yasalarıyla karşılaştırılması yoluyla ölçülür. Bu yöntem, hastaya özgü anatomik ve biyomekanik kısıtlamalara izin verirken, parametrik tasarım çerçevesinin hücre malzeme mekaniğinin evrensel fikirleriyle uyumlu olmasını garanti eder. Katmanlı üretimdeki son gelişmeler, idealize edilmiş Gibson-Ashby tahminleri ile basılmış, kafes performansı arasındaki farkları, proses kaynaklı kusurlar (örneğin: tabaka gözenekliliği, yüzey pürüzlülüğü) nedeniyle ortaya koymuştur. Çok amaçlı genetik algoritma, bu sorunu çözmek için süreç odaklı düzeltmeleri entegre ederek yalnızca biyomekanik uyumluluk için değil, aynı zamanda üretim için de optimizasyon sağlar. Örneğin: EFÜ'deki ($\geq 0,5$ mm) bağıl yoğunluk ve sertlik-gerilim bağlantısı, minimum destek kalınlığı kısıtlamasına doğrudan bağlıdır (Masood, 2014). Tasarım, kafes parametrelerini (destek kalınlığı, birim hücre boyutu) hem Gibson-Ashby kıyaslamalarına hem de SEA sonuçlarına göre yinelemeli olarak iyileştirerek teorik verimlilik ve pratik uygulanabilirlik arasında bir uzlaşma bulur. Üretici tasarım, hesaplamalı mekanik ve hücre malzeme teorisi, idealize edilmiş modeller ile pratik biyomedikal kullanımlar arasındaki mesafeyi kapatır. Gözenekli alanlar yapısal bütünlükten ödün vermeden, biyolojik bütünleşmeye öncelik verirken, Gibson Ashby çerçevesi yalnızca kafesin mekanik davranışını doğrulamakla kalmaz, aynı zamanda derecelendirme stratejisine de rehberlik ederek, yüksek stres konsantrasyonlu alanların (örneğin: implant-kemik arayüzleri) mukavemet-yoğunluk ölçekleme yasalarına uymasını sağlar. Biyomimetik ilkelere ve çok amaçlı evrimsel algoritmalara uyum sağlayarak, biyolojik fayda ve mekanik uyumluluk için optimize edilmiş polar silindirik kafes yapıları tasarlanmıştır. Bu hesaplamalı yöntem, malzeme tüketimini ve stres korumasını azaltırken, osseointegrasyonu artıran gelişmiş, hastaya özel implant tasarımlarının oluşturulmasını sağlayabilecek özel tasarımlar ortaya çıkarmıştır.

Burada biyobozunur yapılarının gözenekli kafes tasarımı, implatların performanslarında kritik bir rol oynamaktadır. Gözenekli kafes mimari, yalnızca implantın toplam ağırlığını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda başarılı kemik rejenerasyonu için hayati öneme sahip olan hücre büyümesi için elverişli bir ortam da yaratmaktadır. Gözenek boyutu, destek kalınlığı ve genel kafes geometrisi gibi tasarım parametreleri, mekanik dayanıklılık, esneklik ve bozulma oranlarını dengelemek için optimize edilebilir. Gözenekli yapılar, biyomedikal implantların kontrollü bir şekilde bozulmasını sağlarken aynı zamanda yeni doku gelişimini de desteklemektedir. İmplant bozuldukça, bu gözenekli yapılar yeni dokuların büyümesini teşvik ederek zamanla çevredeki kemikle bütünleşmeyi sağlar (Zhang ve ark., 2024).

3.5. Eriyik Filamentli Üretim (EFÜ)

Eriyik Filamentli Üretim (EFÜ), termoplastik esaslı filament malzemesinin ısıtılmış bir nozül içerisinde eritilerek katman katman biriktirilmesi prensibine dayanan, Şekil 3.4'de görüldüğü gibi bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde filament, cam geçiş sıcaklığının üzerine çıkarılarak yarı akışkan hale getirilir ve bilgisayar kontrollü hareket sistemi ile belirlenen yol boyunca ekstrüde edilir;

soğuma sonrası katmanlar arası difüzyon ve bağlanma gerçekleşir (Cano-Vicent ve ark., 2021). EFÜ yöntemi düşük maliyetli ekipman gereksinimi, malzeme çeşitliliği (PLA, TPU, PETG vb.), parametrik olarak kontrol edilebilir doluluk oranı ve iç yapı geometrileri sayesinde özellikle latis yapılar ve biyomedikal implant prototipleri için uygun bir üretim altyapısı sunar (Rahman ve ark., 2023). Gözenekli yapıların üretiminde infill yoğunluğu, katman yüksekliği, ekstrüzyon sıcaklığı ve baskı hızı gibi parametreler mekanik dayanım ve ara yüz bağlanmasını doğrudan etkiler. Ancak katmanlar arası anizotropi, yüzey pürüzlülüğü ve mikroboşluk oluşumu gibi faktörler mekanik performansı sınırlayabileceğinden, tasarım aşamasında üretim yönü ve yükleme doğrultusu birlikte değerlendirilmelidir (Q. Wei ve ark., 2022). Bu yönüyle eriyik filamentli üretim, fonksiyonel derecelendirilmiş, kontrollü poroziteli ve mekanik olarak optimize edilmiş yapılar geliştirmek için esnek ve araştırmaya açık bir platform sağlamaktadır.



Şekil 3.4. EFÜ sistem grafiği (Telfer ve ark., 2012)

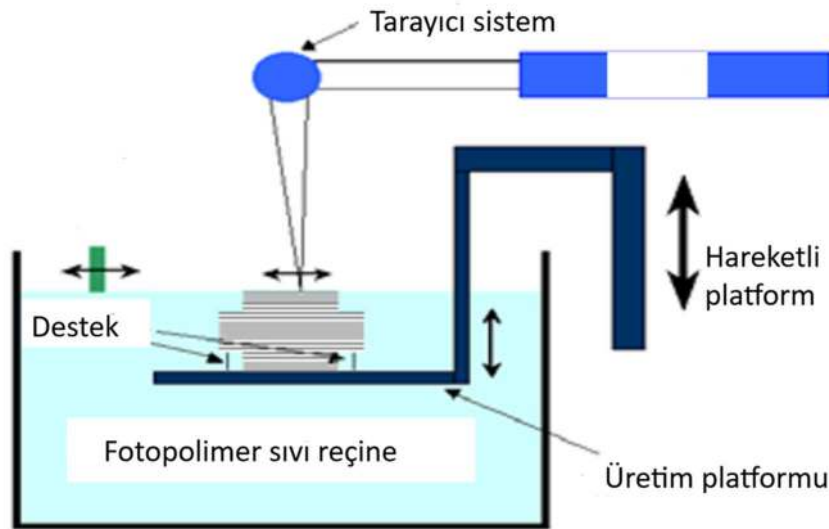
3.6. Stereolitografi (SLA) Yöntemi

Stereolitografi (SLA), fotopolimer esaslı sıvı reçinelerin kontrollü ışık kaynağı ile katman katman kürlenmesine dayanan, yüksek hassasiyetli bir eklemeli imalat yöntemidir. İlk geliştirilen üç boyutlu baskı teknolojilerinden biri olan SLA, özellikle karmaşık geometrilerin, ince detayların ve pürüzsüz yüzeylerin üretiminde sağladığı üstünlükler nedeniyle dental, biyomedikal ve mikro-yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, dijital ortamda hazırlanan üç boyutlu

modelin, genellikle ultraviyole (UV) ışık kullanılarak sıvı reçine havuzu içerisinde seçici olarak sertleştirilmesi prensibine dayanır. SLA yönteminin şematik olarak çalışma prensibi Şekil 3.5’de verilmiştir.

SLA teknolojisi, yüksek boyutsal doğruluk ve tekrarlanabilirlik sunması sayesinde ortodontik apareyler, cerrahi kılavuzlar ve kişiye özel biyomedikal implant prototiplerinin üretiminde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Katman kalınlığının mikrometre mertebesinde ayarlanabilmesi, yapı içerisindeki detayların ve yüzey kalitesinin kontrol edilebilmesine olanak tanır. Bununla birlikte kullanılan fotopolimer reçinelerin mekanik, biyolojik ve kimyasal özellikleri, üretilen parçaların performansını doğrudan etkilemektedir (Afridi ve ark., 2024).

Son yıllarda SLA reçinelerinin fonksiyonel özelliklerini geliştirmek amacıyla hidroksiapatit (HAp) gibi biyoseramik katkı maddelerinin kullanımı ön plana çıkmıştır. HAp katkısı, biyouyumluluğun ve osteokondüktif davranışın artırılmasını hedeflerken, aynı zamanda kürlenme davranışı, ışık geçirgenliği ve reçine viskozitesi üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Bu durum SLA baskı parametrelerinin ve malzeme hazırlık süreçlerinin dikkatle optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır (Kennedy ve ark., 2023). Bu bağlamda SLA yöntemi yalnızca geometrik doğruluk açısından değil, aynı zamanda malzeme işlem performans ilişkilerinin birlikte değerlendirilmesi gereken çok disiplinli bir üretim teknolojisi olarak ele alınmaktadır. Özellikle biyoseramik katkılı fotopolimer sistemlerde, dispersiyon kalitesi ve kürlenme kinetiği, baskı başarısının belirleyici unsurları arasında yer almaktadır.



Şekil 3.5. SLA sistem şematığı (Raju ve ark., 2010)

3.7. SEM-EDX Analizi

Malzemelerin yüzey yapısını ve kimyasal bileşimini incelemek için SEM-EDX analizi, kullanılan gelişmiş bir karakterizasyon yöntemidir. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), numune yüzeyine

gönderilen yüksek enerjili elektronlar sayesinde yüzey yapısı, gözenek yapısı ve mikroyapısal özellikleri yüksek büyütmede görüntüler. Özellikle bu yöntem biyomalzemeler, metal alaşımlar, seramikler ve gözenekli latis yapılar gibi mühendislik malzemelerinin detaylı incelenmesinde kullanılmaktadır. EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) ise SEM cihazına entegre çalışan bir analiz tekniği olup malzemenin içerdiği elementleri belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Elektron demetinin numune yüzeyine çarpması neticesinde oluşan karakteristik X-ışınları analiz edilerek malzemenin elementel dağılımının tespit edilmesini sağlar. Böylece kalsiyum, fosfor, karbon gibi elementlerin yüzey üzerindeki varlığı ve oranları belirlenir. Özellikle katkılı biyomalzemelerin üretim kalitesinin değerlendirilmesinde SEM-EDX analizi önemli bir rol oynamaktadır. Bu analiz sayesinde üretilen yapıların gözenek morfolojisi, yüzey pürüzlülüğü, partikül dağılımı ve katkı maddelerinin homojenliği detaylı bir şekilde incelenebilir. Biyomedikal implant çalışmalarında da hücre tutunmasını etkileyen yüzey özelliklerinin değerlendirilmesinde sıkça kullanılmaktadır (Ali ve ark., 2023; Gorji ve ark., 2025).

3.8. FTIR Analizi ve Termal Analizler

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), malzemelerin kimyasal yapısı ve fonksiyonel gruplarını belirlemek amacıyla kullanılan önemli bir karakterizasyon yöntemidir. FTIR analizi, moleküllerin kızılötesi ışınımı belirli dalga boylarında absorblama davranışına dayanmakta olup; polimer, seramik, biyomalzeme ve kompozit yapıların kimyasal bağlarının incelenmesinde kullanılmaktadır (Gong ve ark., 2024). Özellikle hidroksiapatit katkılı biyomalzemelerde, katkı maddesinin yapı içerisindeki dağılımını, kimyasal etkileşimleri ve fonksiyonel grup değişimlerini belirlemek açısından önemli bilgiler sağlamaktadır. Termal analizlerde bu tür çalışmalarda kullanılan önemli bir yöntemdir. TGA, DTGA, DTA ve DSC olarak belirtilen bu analizler hakkında aşağıda bilgi verilmiştir.

Termogravimetrik Analiz (TGA), bir malzemenin kontrollü sıcaklık artışı altında meydana gelen kütle değişimini ölçen termal analiz yöntemidir. Analiz sırasında numunenin sıcaklığa bağlı olarak bozunması, uçucu bileşenlerin uzaklaşması, oksidasyonu veya kalıntı miktarı belirlenebilir. TGA sayesinde malzemenin termal kararlılığı, bozunma sıcaklığı, dolgu maddesi oranı ve inorganik kalıntı miktarı hakkında bilgi elde edilir (Özsın, 2025). Özellikle polimer ve kompozit malzemelerin termal dayanımlarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Türev Termogravimetrik Analiz (DTGA), TGA eğrisinin birinci türevidir ve sıcaklığa bağlı kütle kaybı hızını gösterir. DTGA eğrisindeki pikler, bozunmanın en hızlı gerçekleştiği sıcaklıkları ifade eder. Bu yöntem, birden fazla bozunma aşamasının birbirinden ayrılmasını kolaylaştırır ve her bozunma basamağının maksimum bozunma sıcaklığının (Tmax) belirlenmesini sağlar (Hamouda ve ark., 2025). Böylece kompleks polimer sistemlerinin bozunma mekanizmaları daha ayrıntılı olarak analiz edilebilir.

DTA (Diferansiyel Termal Analiz), numune ile referans malzeme arasındaki sıcaklık farkını ve sıcaklığın fonksiyonunu ölçen bir termal analiz yöntemidir. Analiz sırasında meydana gelen endotermik (ısı alan) ve ekzotermik (ısı veren) olaylar belirlenebilir. DTA ile erime, kristalleşme, faz dönüşümü, oksidasyon ve bozunma gibi termal olaylar tespit edilir. Ancak DTA, olayların gerçekleşmesi sırasında açığa çıkan veya absorplanan ısı miktarını doğrudan ölçmez; yalnızca sıcaklık farkını kaydeder (Devi ve ark., 2021).

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), numune ile referans arasındaki ısı akışı farkını ölçen gelişmiş bir termal analiz tekniğidir. Bu yöntem sayesinde malzemenin cam geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m), kristalleşme sıcaklığı (T_c), erime entalpisi ve kristallik derecesi belirlenebilir (Singh ve Singh, 2022). DSC özellikle polimerlerin termal davranışlarının incelenmesi, kristallenme özelliklerinin değerlendirilmesi ve katkı maddelerinin malzeme üzerindeki etkilerinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Materyal

Bu çalışmada kullandığımız malzemeler çeşitlilik arz etmektedir. Bunlardan biri sonlu elemanlar yöntemiyle Ti6Al4V alaşımının kullanılmasıdır. Diğer bir malzeme ise genetik algoritmalarda polar silindirik YMK PLA+ kullanımıdır. PLA+ malzemesinin özellikleri: Young modülü 3 GPa, akma gerilimi 52 MPa, poisson oranı 0,35 ve yoğunluğu 1,23 g/cm³'tür. eSUN PLA+, FDA onaylı bir malzemedir ve bu da sağlık uygulamaları için güvenli olduğunu gösterir. Sonlu elemanlar ile montajı yapılan L3-L4 omurga kemiği ve Ti6Al4V implantın malzeme özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Bütün parçaların malzeme özellikleri (Bozyiğit ve ark., 2023).

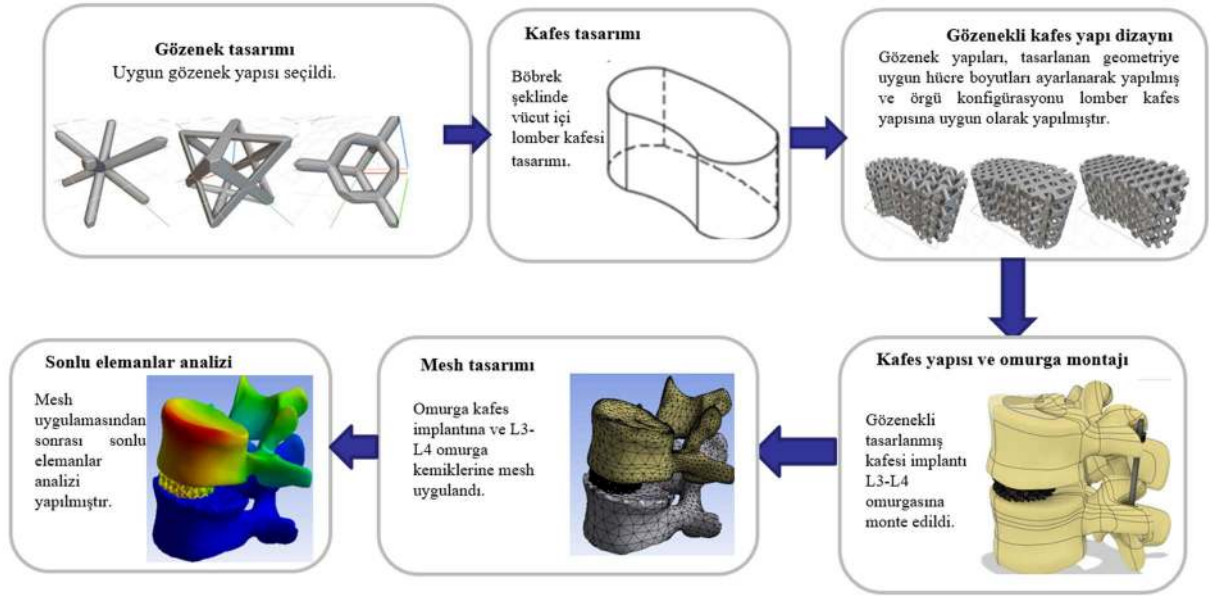
Materyal	Yoğunluk (kg/m ³)	Young Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Kortikal kemik	1830	12000	0,29
Süngerimsi kemik	1000	450	0,29
Nükleus	1000	3,4	0,49
Fibröz kapsülü	1200	4,2	0,40
Faset eklemi	1000	10	0,30
Ti6Al4V implant	4429	113800	0,34

Çalışmada kullanılan diğer malzeme de alias dental denture reçine olup, bu malzemenin özellikleri şu şekildedir: Maksimum gerilme 60MPa, young modülü 2,49 GPa, kopma uzaması %5, shore D 92 D.

4.2. Metot

Çalışmada takip edilen metot olarak öncelikle gözenekli modeller, vücut içi lomber kafesinin tasarımı, tasarlanan implantların montajı, sonlu elemanlar modeli mesh ve sınır durumu; silindirik latis yapıların dizayn ve modellemesi yapılmıştır. Ayrıca 3B yazıcı ile üretimi, tasarımların karakterizasyonu, yapıların sayısal modellemesi, çok amaçlı genetik algoritma ile silindirik polar YMK latis yapı tasarımı, Biyomimikri polar YMK parametrik tasarımlar; Polar YMK latis yapılarda teorik ve deneysel doğrulama, yapılarda modelleme, ağ oluşturma, temas ayarları; son olarak farklı HAp katkı ile SLA üretim metodu uygulanmıştır. Ayrıca SLA ile üretilen malzemelerin FTIR ve termal analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir.

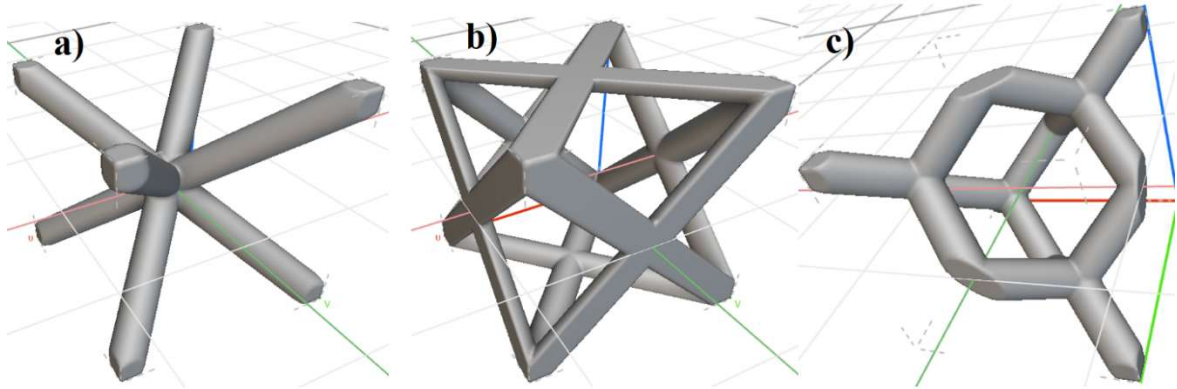
Çalışmada ayrıca lomber bölgede L3-L4 omurları arasında gözenekli şeklinde tasarlanan Ti6Al4V alaşımı interbody füzyon kafeslerinin SEA yöntemi ile etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmanın akış şeması Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çalışmanın akış şeması (Bozyiğit ve ark., 2023)

4.2.1 Gözenekli modeller

Sonlu elemanlar modelinde uygulanmak üzere tasarlanan vücut içi kafes implantların içyapısında, literatürde kullanılan üç farklı gözenek yapısı seçilmiştir. Bu, şekil 4.2'de olduğu gibi seçilen HMK, YMK ve elmas kafes yapılarıdır. Bu gözenek yapıları, element yazılımı 2.06 sürümü (nTopology, ABD) kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 4.2. Gözenek yapıları a) hacim merkezli kübik b) yüzey merkezli kübik c) elmas yapılar (Bozyiğit ve ark., 2023)

4.2.2. Gözenekli vücut içi lomber kafesinin tasarımı

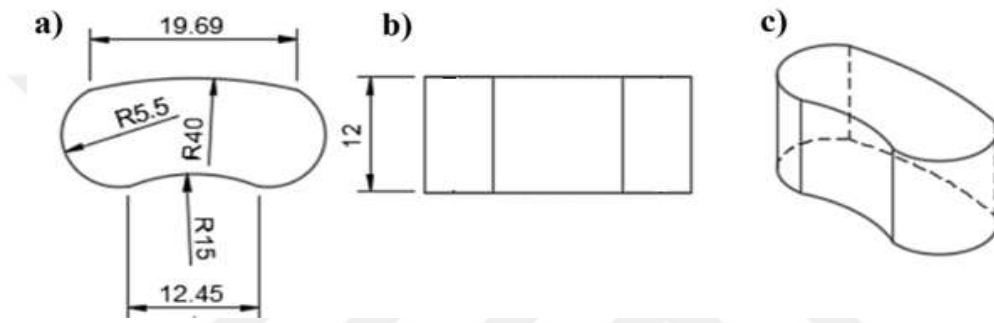
Literatürlere göre böbrek şekilli veya mermi şekilli kafesler, disk yüksekliğini korumak için şu anda kullanılan ortopedik cihazlardandır (Siu ve ark., 2018). Tablo 4.2'de gösterilen ölçülerde

özelleştirilmiş bir lomber kafesinin simülasyonu yapılmıştır. Bu boyutlar, çalışmada sunulan vücut içi füzyon kafesinin tasarımı için temel alınmıştır.

Tablo 4.2. Lomber kafes boyutları

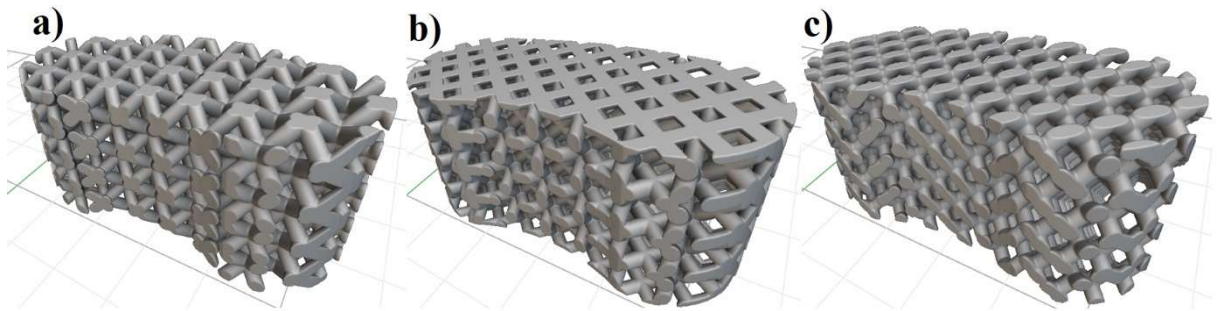
Tasarım	Uzunluk [mm]	Genişlik [mm]	Yükseklik [mm]
Böbrek şekilli	22	9,9	12

Böbrek şeklinde bir lomber interbody füzyon kafesi, FUSION 360 yazılımı V.2.0.14337 öğrenci sürümü (Autodesk, ABD) kullanılarak tasarlanmıştır. Füzyon kafesinin boyutları Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Böbrek şeklinde lomber vücut içi füzyon kafesi. a) Üstten görünüm b) Önden görünüm c) İzometrik görünüm, mm cinsinden boyutlar (Bozyiğit ve ark., 2023).

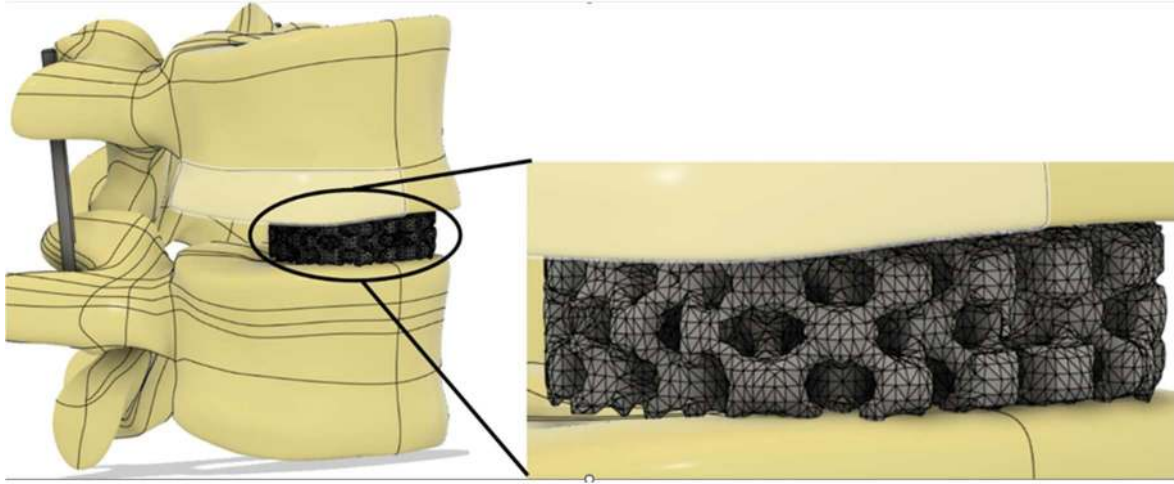
L3-L4 omurgasına yerleştirilmek üzere tasarlanan lomber vücut içi kafesin iç yapısının topolojik analizi yapılmış ve Şekil 4.4'deki gibi seçilen 3x3x3 mm ünite boyutunda ve 1 mm payanda kalınlığında hacim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik ve elmas gözenek yapıları uygulanmıştır. Latis kafes yapıları 2.06 sürüm (nTopology, ABD) yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Artan gözeneklilik, gözeneklerin içinde kemik büyümesine izin vermektedir. Ancak implantın mekanik özelliklerinin korunması kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.4. Tasarlanan lomber vücut içi kafesinin iç yapısına uygulanan gözenek yapılar a) Hacim merkezli kübik b) Yüzey merkezli kübik c) Elmas yapılı (Bozyiğit ve ark., 2023).

4.2.3. Gözenek yapıları ile tasarlanan implantların L3-L4 omurga kemiklerine montajı

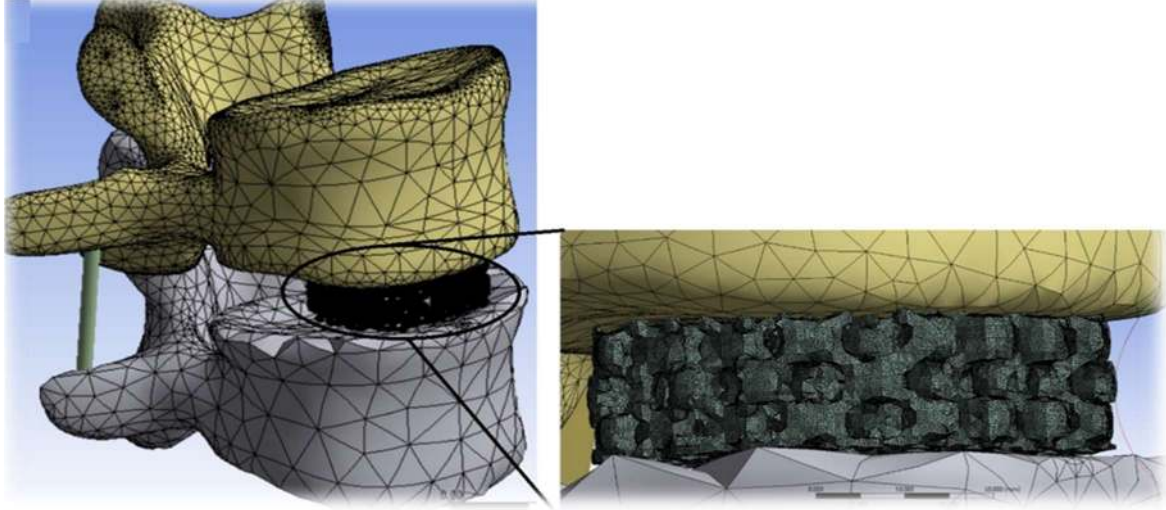
Kafes tasarımı lomber gövde içi implantlar Şekil 4.5'de gösterildiği gibi, Lomber vücut içi füzyon kafesi ile L3-L4 omurları arasına monte edilmiş şekli FUSION 360 yazılımı V.2.0.14337 öğrenci sürümü (Autodesk) kullanılarak tasarlanmıştır. Lomber vertebra ve implant CAD modeli çubuklar ve vidalar ile vücut içi kafes implantı oluşturulmuş, ancak vidalar ve çubuklar SEA'ini etkileyerek vücut içi füzyon kafesindeki gerilimlerin ve gerinimlerin görülmesini engellediği için analize dahil edilmemiştir.



Şekil 4.5. Gözenekli tasarlanan lomber vücut içi implantlar L3-L4 omurgalarının montajı
(Bozyiğit ve ark., 2023).

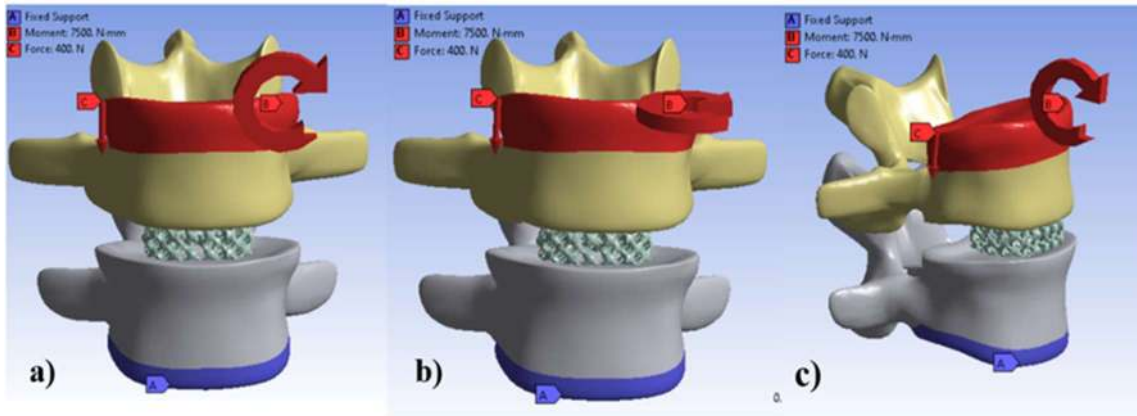
4.2.4. Gözenekli yapıların sonlu elemanlar modeli mesh ve sınır durumu

Gözenekli yapılarda sonlu elemanlar modeli mesh uygulamasında, L3-L4 omurgaları için tasarlanan vücut içi gözenekli disk monte edildikten sonra, sonlu elemanlar programına aktarılmıştır. Omurga ve diskin montajının 3B modeline sonlu elemanlar yöntemi ile mesh uygulaması yapılmıştır. Şekil 4.6'de görüldüğü gibi mesh uygulamasında 3351849 düğüm ve 2293578 eleman bulunmaktadır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yazılımıyla omurga kemikleri ve gözenekli disk analizini hesaplamak için Lagrange yaklaşımı kullanılarak mesh uygulanmıştır. Net entegrasyon çözümünü kullanan Arbitaray Lagrange Euler (ALE) yöntemi, Lagrange yaklaşımının tipik eleman bozulmalarını azaltmak için kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Gözenekli tasarlanan lomber vücut içi implantlar ve L3-L4 omurga kemiklerine mesh uygulaması (Bozyiğit ve ark., 2023).

Sonlu elemanlar ile yapılan analiz için gerekli olan sabitleme ve kuvvet uygulama alanları belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan yükleme modeli literatürde öngörülen modellerle karşılaştırılmıştır (McGillvray ve ark., 2017; Vanaclocha-Saiz ve ark., 2022). Ağırlık kaldırma uzatması sırasında L3-4 diski, fleksiyon pozisyonunda yaklaşık 230 N veya 0,34 vücut ağırlığı kadar bir maksimum kesme yüküne ve dik pozisyonda 1500 N veya 2,28 vücut ağırlığına kadar bir maksimum sıkıştırma yüküne maruz kalmıştır (Heo ve ark., 2022). Hastaya literatürde yer alan, omurga kemiğine uygulanabilen ve L3 omurganın 400 N'lık eksenel kuvveti ile lateral eğilme, fleksiyon ve burulmaya göre 7,5 N.m moment uygulaması Şekil 4.7'de görüldüğü gibi uygulanmıştır. Sabitleme bölgesi L4 omurgasının alt bölgesi olarak seçilmiştir. L3 omuruna uygulanan kuvvet ve moment bölgesi Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. HMK vücut içi kafes üzerinde sonlu elemanlar, kuvvet, moment ve sabitleme modeli 400N eksenel kuvvetle birlikte a) 7,5 N.m yanal eğilme momenti b) 7,5 N.m burulma c) 7,5 N.m fleksiyon uygulaması (Bozyiğit ve ark., 2023).

Bu çalışmada, böbrek geometrisine sahip yapı üzerinde gerçekleştirilen SEA sonucunda, maksimum gerilme yığılmalarının silindirik karaktere sahip bölgelerde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Gerilme dağılımlarının özellikle eksensel yük aktarımı boyunca silindirik bir davranış göstermesi nedeniyle, deneysel doğrulama çalışmalarında yapının tamamı yerine en kritik gerilme bölgesini temsil eden silindirik geometri tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, hem deneysel sürecin sadeleştirilmesini hem de mekanik davranışın daha kontrollü şekilde incelenmesini sağlamıştır.

Silindirik numune geometrisine geçiş ile birlikte üretim parametreleri, yükleme koşulları ve deformasyon davranışları standartlaştırılarak deneysel tekrar edilebilirlik artırılmıştır. Ayrıca silindirik yapı, latis mimarisinin basma davranışı, enerji absorpsiyonu ve rijitlik özelliklerinin daha doğru karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Böylece SEA sonuçlarında kritik olarak belirlenen bölgenin deneysel prototipleme gerçekleştirilmiş ve sayısal analiz ile deneysel verilerin karşılaştırılması için uygun bir mühendislik yaklaşımı oluşturulmuştur.

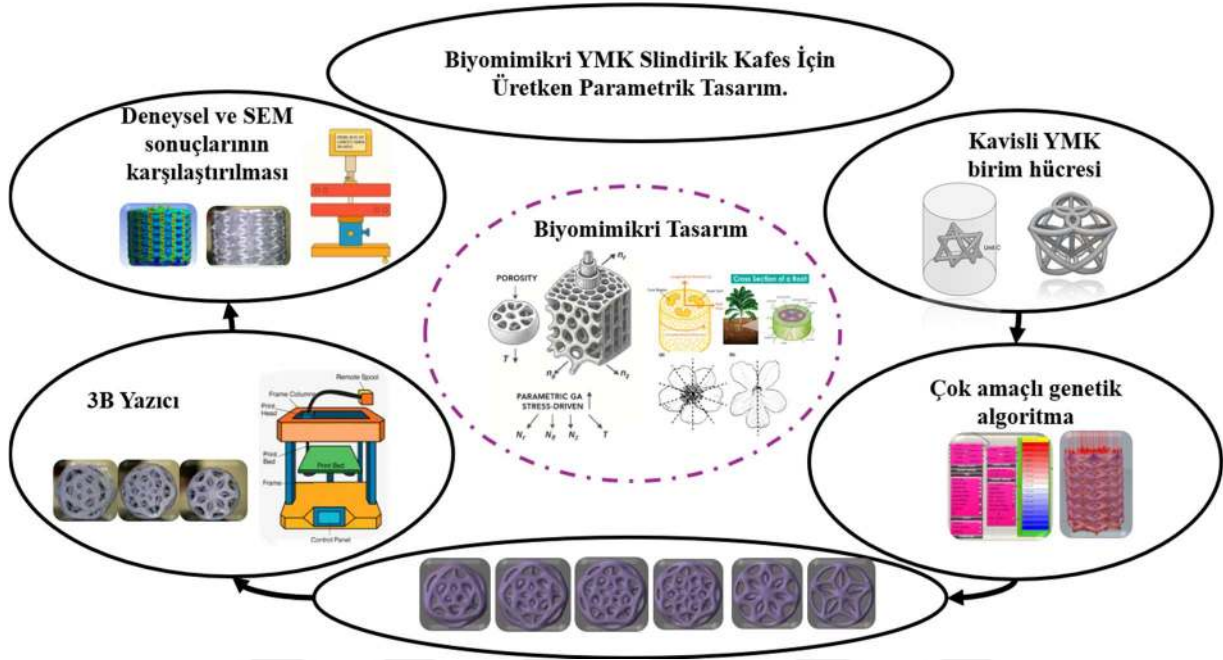
4.2.5. Çok amaçlı genetik algoritma ile silindirik polar YMK latis yapı tasarımı

Sonlu elemanlar analizleri neticesinde, kritik gerilme bölgelerinin silindirik forma yakın alanlarda yoğunlaşması nedeniyle, deneysel değerlendirmelerde daha kontrollü ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla silindirik geometri tercih edilmiştir. Bu doğrultuda biyomimetik yaklaşım temel alınarak silindirik polar YMK latis yapılar tasarlanmış ve yapısal performansın optimize edilmesi amacıyla çok amaçlı genetik algoritma yöntemi uygulanmıştır. Genetik algoritmalar, mühendislik tasarım problemlerinde birden fazla hedef fonksiyonun aynı anda optimize edilmesine olanak sağlayan etkili yöntemler arasında yer almaktadır.

Silindirik latis yapılar, omurga segmentlerinin doğal radyal yük aktarım mekanizmasını taklit edebilme, yoğunluk gradyanı ile fonksiyonel derecelendirme imkânı sunma ve eklemeli imalata yüksek uyum gösterme özellikleri nedeniyle omurga implant tasarımında tercih edilmiştir (Laubach ve ark., 2022). Özellikle lomber seviyede (örneğin: L3-L4 intervertebral disk) görülen aksiyel basma altında silindirik YMK latis geometri, yüklerin homojen dağılımını sağlayarak stres yığılmalarını azaltmakta ve kemik-implant arayüzünde daha dengeli bir mekanik ortam oluşturmaktadır. Ayrıca gözenek boyutu ve porozite kontrolü sayesinde osseointegrasyonu desteklerken, elastik modülün doğal kemiğe uyumuna olanak sağlayarak stres kalkanı etkisini minimize etmektedir (Oymak ve ark., 2025). Bu nedenle silindirik latis tasarım yaklaşımı biyomimetik, mekanik olarak optimize edilmiş ve üretilebilirliği yüksek bir omurga implant konsepti sunmaktadır. Çok amaçlı genetik algoritmaların (ÇAGA) biyomimikri yaklaşımlarıyla birlikte kullanılması, polar silindirik latis yapıların tasarımında yeni olanaklar tanımaktadır.

Biyomimikri temelli omurga implantı tasarımının gerçek ve karmaşık anatomik geometriden, deneysel basma testlerine ve sonlu elemanlar analizine uygun, daha sade bir silindirik modele

dönüştürülme süreci Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Bu süreçte polar silindirik koordinatlara dayalı parametrik tasarım ve genetik algoritma kullanılarak optimize edilen latis yapı, eşdeğer mekanik davranışı koruyacak şekilde idealize edilmekte; böylece hem üretilebilirlik hem de deneysel, sayısal karşılaştırmalar ile doğruluğu artırılmaktadır.

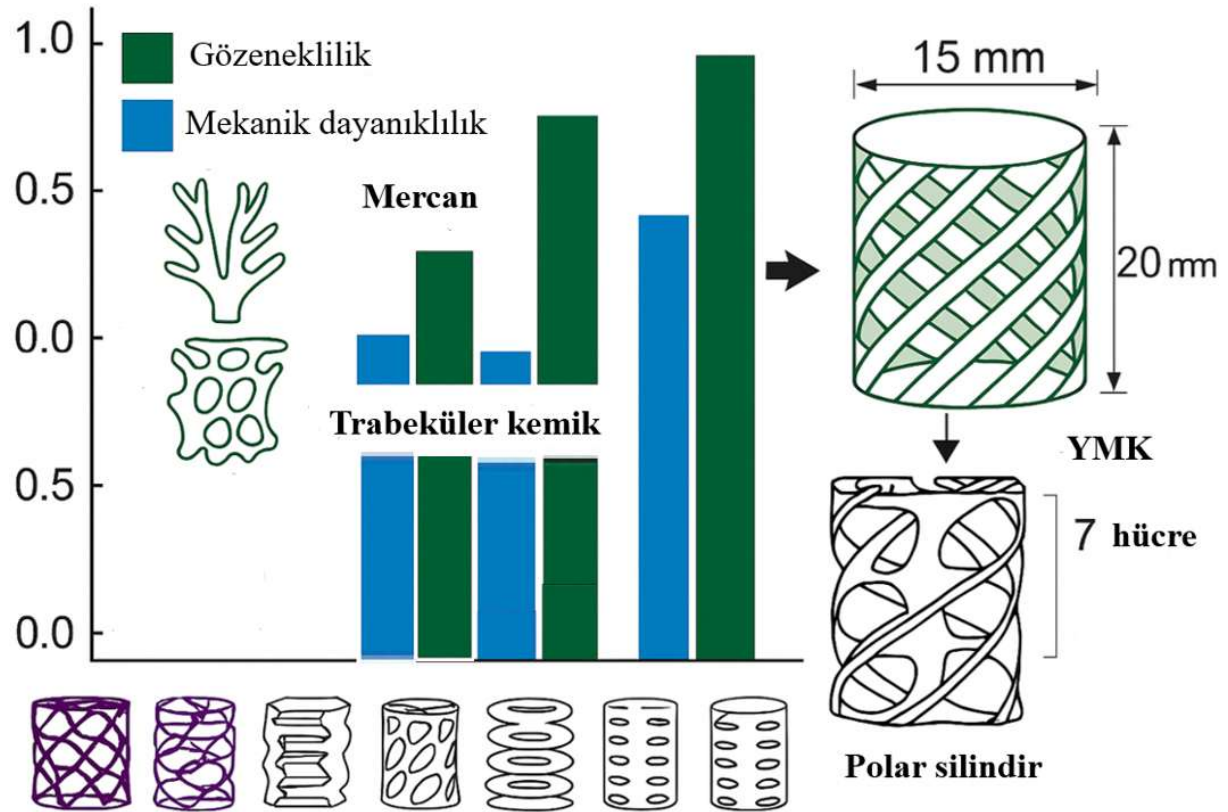


Şekil 4.8. Polar YMK kafes tasarımının şematik gösterimi, sayısal ve deneysel testleri (Oymak ve ark., 2026).

Biyomimikri, doğal yapıların şekil ve işlevlerini taklit ederek ileri doku mühendisliği ve ortopedik implant tasarımında dönüştürücü bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Trabeküler kemik, bambu sapları ve mercan kolonileri gibi biyolojik sistemler, doğal olarak optimize edilmiş malzeme dağılımı, hiyerarşik gözeneklilik ve yük taşıma verimliliği göstermeleri nedeniyle tasarım sürecine model oluşturmaktadırlar. Bu çalışmada söz konusu biyolojik örüntülerden esinlenilerek polar silindirik YMK kafes yapıları tasarlanmıştır (Siddique ve ark., 2022).

Düzgün bir polar silindirik YMK kafesinin mekanik performansı, basma yüklemesi altında incelenmiş ve özellikle kontrollü eksenel hücre dağılımıyla burkulma eğilimlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Tasarlanan yapı, 15 mm çap ve 20 mm yükseklik ile $H/D \approx 1,33$ olup literatürde önerilen 1–1,5 aralığına uygundur. Bu oran, yapının ne çok uzun olup global burkulmaya eğilimli olmasına, ne de çok kısa olup sınır koşullarının aşırı şekilde davranışı etkilemesine izin verir. Eksenel (Z) yönde 7 hücre katmanı kullanılması, özellikle ortadaki 5 katmanın “kafes çekirdeği” gibi davranmasını sağlamıştır. Üst ve alt katmanlar ise deney sırasında plaka temasından dolayı nispeten daha yüksek rijitlik göstermiştir. Böylece test, yapının içsel sıkıştırma yanıtını daha doğru şekilde vermektedir.

Mercan dokusu, trabeküler kemik ve YMK kafes yapısının normalleştirilmiş gözeneklilik ve mekanik özellikleri Şekil 4.9'da karşılaştırılmaktadır. Mercan benzeri yapılar yüksek gözeneklilik ve düşük mekanik dayanım gösterirken, trabeküler kemik bu iki özellik arasında dengeli bir ilişki sunmaktadır. Buna karşılık YMK tabanlı polar silindirik kafes yapısı, yüksek gözeneklilik ile rekabetçi mekanik dayanımı aynı anda sağlayarak, hafiflik ve yük taşıma kapasitesinin eşzamanlı gereksinim duyulduğu biyomedikal implantlar için güçlü bir aday olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. Biyomimikri polar YMK kafes tasarımları, mercan ve trabeküler kemik ile karşılaştırılması (Oymak ve ark., 2026).

4.2.6. Biyomimikri polar YMK parametrik tasarımlar

Biyomimikri polar silindirik tasarım topolojileri, destek geometrileri ve gözenekliliklerini üç eksen boyunca değiştiren kafesler oluşturmak için silindirik koordinatlar (R , θ , Z) uygulanmaktadır. Bunlardan Radyal (R), yoğun iç katmanlardan (yüksek gerilim direnci) gözenekli dış bölgelere (hafifletme) doğru hareket ederek yük aktarımını iyileştirmek için kemik osteonlarının yapılarını taklit eder. Çevresel (θ) ise kesme ve burulma kuvvetlerine direnmek için hücre hizalama açısını değiştirir. Bu da bitki damar demetlerine veya eklem bacaklı dış iskeletlerine dayanır. Z gradyanlar, omurga implantları için daha sert uç plakalar ve şok emilimi için daha esnek orta bölümler gibi yükseklik boyunca gözeneklilik ve sertlik noktasında, uzunlamasına vertebral disklerin çalışma şeklini taklit eder.

Bu parametrik yaklaşım, biyomimetik performans artırıcı mukavemet-ağırlık oranları, sıvı geçirgenliği ve anizotropik uyumu mümkün kılarken, kafes parametrelerinin (örneğin: Gözeneklilik ve von Mises gerilimi) algoritmik kontrolü yoluyla hastaya özgü üretkenliği de mümkün kılar. Orijinal kartezyen kafes, doğrudan silindirik koordinatlara dönüştürülür ve tamamen polar silindirik bir YMK kafes yapısı oluşturur. Bu dönüşüm, dikdörtgen alandaki kafes noktalarının koordinatları olan X_1 ve Y_1 'i radyal ve açısal konumlara geçişini sağlayarak, düz dikdörtgen bir YMK birim hücre dizisini silindirik bir konfigürasyona dönüştürür. Dikdörtgen alanda W toplam açısal uzunluğu, L radyal uzunluğu ve R nihai silindir yarıçapını temsil eder. Dönüşüm şu şekilde formüle edilerek tanımlanmıştır (Oymak ve ark., 2026):

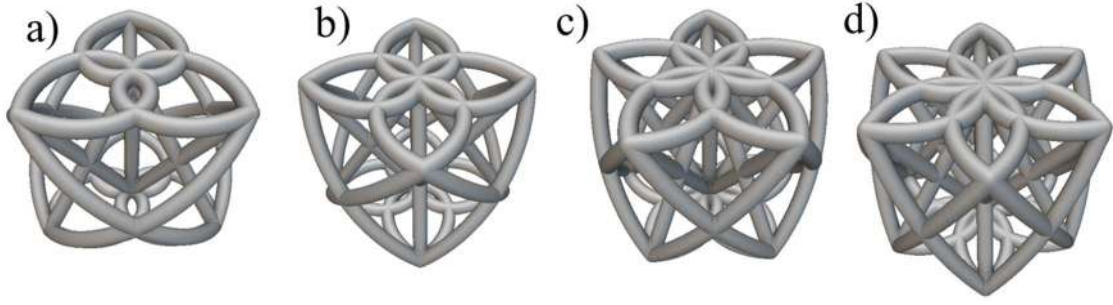
$$\theta = (Y_1/W) \cdot 2\pi \text{ ve } r = (X_1/L) \cdot R \quad (4.1)$$

Kutupsal koordinatlar

$$X_2 = r \cdot \cos(\theta), Y_2 = r \cdot \sin(\theta) \text{ ve } Z_2 = Z_1, \quad (4.2)$$

Bu kutupsal kordinatlar daha sonra üç boyutlu kartezyen koordinatlara dönüştürülürler. Bu eşleme, YMK birim hücrelerini merkezi eksen boyunca deforme ederek pürüzsüz bir silindirik polar kafes oluşturur. Ortaya çıkan yapı, kemik iskeleleri, stentler veya özelleştirilmiş implant tasarımları gibi silindirik uygulamalar için gereken geometrik düzgünlüğü, YMK topolojilerinin mekanik verimliliğiyle birleştirmektedir (Cheikho ve ark., 2022). Bu, yapının mekanik özellikler ve gözeneklilikteki radyal gradyanları, tıpkı gerçek kemiklerin kortikal kabuktan trabeküler çekirdeğe kadar yoğunluk bakımından farklılık göstermesi gibi temsil etmesine yardımcı olur. Genetik Algoritmalar (GA) ile birleştirildiğinde ve ÇAGA kullanıldığında, polar silindirik şekil, mekanik dayanım, yani sertliği artırma veya gerilimi azaltma gibi karşıt hedeflere bağlı olarak optimize edilir. Hücre gelişimi, geçirgenlik ve malzeme kullanımı (hacim veya hacmi en aza indirme) için gözenekliliği en üst düzeye çıkarır. ÇAGA kullanılarak hedefler arasındaki dengeleri yansıtan ideal çözümlerden oluşan bir koleksiyon olan Pareto cephesi oluşturulabilir. Her silindirik kafes tasarımının optimizasyonundaki önemli faktörler, bir dizi ayarlanabilir parametre ile ayırt edilir.

Radyal bölmeler (n_r) çekirdek-kabuk gözenekliliğini, destek yöneliminin düzenlenmesini ve açısal bölmeler (n_θ) kullanılarak simetriyi etkiler. Bir hücrede 4 farklı açısal bölme Şekil 4.10'da gösterilmektedir (Oymak ve ark., 2026). Eksenel katmanlar (n_z) yüksekliğe bağlı olarak değişimi tanımlar. Destek kalınlığı (t) mekanik özellikleri doğrudan etkiler ve 1 mm olarak seçilmiştir. Genetik algoritma bu değerleri gen olarak yorumlar. Tablo 4.3'de polar kafes YMK silindir tasarımı için çoklu genetik algoritma tarafından seçilen parametreler gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Bir hücrede 4 farklı açısall bölme n_{θ} a)3 b)4 c)5 d)6 (Oymak ve ark., 2026).

Tablo 4.3. Polar kafes silindir tasarım parametreleri (Oymak ve ark., 2026).

	YMK-Ring	YMK-Stack	YMK-Petal	YMK-Core	YMK-Mesh	YMK-Leaf
Hücre sayısı (theta)	2,7	3,99	5,15	6,31	8,18	5,24
Hücre sayısı (radial)	2,42	2,16	2,46	2,62	1,24	1,24

Şekil 4.11 (a ve b)'de görülen YMK-Ring ve YMK-Stack yapıları, belirgin dairesel simetrileri ve katmanlı eksenel düzenlemeleriyle tanımlanabilir. YMK-Ring, hem üst hem de alt katmanlardaki iç ve dış destek yapılarını birbirine bağlayan düzgün dağılmış radyal ve açısall destekler içerir ve dayanıklı-dengeli bir kafes yapısı oluşturur. Bu, orta düzeyde rijitliğe sahiptir ve sıradan yük taşıma uygulamaları için yapısal olarak etkilidir.

YMK-Stack, her yatay katman arasında sağlam dikey destek bağlantılarına öncelik vererek eksenel rijitliği artırır. Bu istifleme konfigürasyonu, sütunsal davranışı yansıtır ve YMK-Stack'ı omurga füzyon implantları veya yük taşıyan biyomedikal ekipmanlardaki destekleri gibi sıkıştırıcı uygulamalar için ideal hale getirir. Şekil 4.11 (c ve d)'de gösterilen YMK-Petal ve YMK-Core, kafesin bağlantı yoğunluğunu artırır. YMK-Petal, dokunmuş bir ağ gibi hem yatay hem de çapraz bağlantılara sahiptir. Bu düzenleme izotropik mukavemet gerektiren uygulamalar için ideal olan, her yönde homojen mekanik özellikler sunar. YMK-Core, sağlam bir şekilde paketlenmiş bir düğüm bölgesi oluşturan kısa çapraz destekler ekleyerek merkez bölgesini yoğunlaştırır. Bu tasarım esneklik ve üretilebilirlikten ödün vermeden optimum rijitlik ve deformasyon direnci sağlar. Özellikle önemli mekanik strese maruz kalan veya mekanik güvenilirliğin kritik olduğu bölgeler için uygundur (Oymak ve ark., 2026).

YMK-Mesh ve YMK-Leaf'in Şekil 4.11 (e ve f)'de çiçek veya yaprak desenlerindeki desteklerin eğriliği aracılığıyla esnekliği ve biyomimikri tasarımı incelenmiştir. YMK-Mesh, desteği düzgün bir ağ konfigürasyonunda dışa doğru yayarak düzenli esneme ve enerji kaybını kolaylaştırır. Tasarım hem mukavemeti hem de şekil değiştirilebilirliği artırarak, yumuşak doku entegrasyon bölgeleri gibi uyumluluk gerektiren arayüzler için uygun hale getirir. YMK-Leaf, destekler arasındaki mesafeyi artırarak yapıyı önemli ölçüde düzene sokar ve bu da koleksiyondaki en uyumlu ve esnek tasarımı

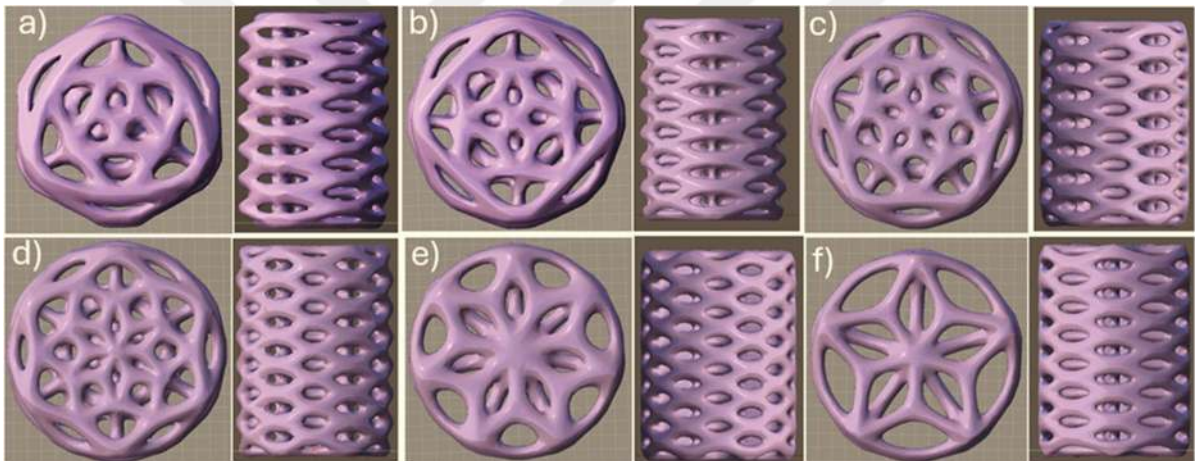
ortaya çıkarır. YMK-Leaf uyarlanabilir ve hafiftir; yastıklama, giyilebilir destek yapıları veya düşük yüklü biyolojik implantlar için uygundur. Gözenekliliğin Hesaplanması: Formülün matematiksel gösterimi (4.3), gözenekliliğin ϕ yerel veya küresel olarak tahmin edilmesini sağlar (Oymak ve ark., 2026):

$$\phi = 1 - \frac{V_{\text{katı}}}{V_{\text{toplam}}} \quad (4.3)$$

Burada V katı: Katı kafes yapısının hacmi

V toplam: Tüm tasarım alanının (silindir) hacmi.

Şekil 4.11 (a-f)'de görüldüğü gibi, YMK prensiplerinden türetilen ve polar silindirik koordinatlarda tasarlanmış benzersiz şekilde kavisli bir birim hücreyi temsil eder. Bu yapılar destek yönelimi, bağlantı ve eğrilik özellikleriyle değişken mekanik davranış göstermekte olup, sert yük taşıyan implantlardan uyumlu biyo-arayüzlere kadar çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. YMK yapıların gözeneklilik oranları Şekil 4.11'de gösterildiği gibi sırasıyla YMK-Ring %62,82, YMK-Stack %59,91, YMK-Petal %55,5, YMK-Core %49,69, YMK-Mesh %56,36 ve YMK-Leaf %69,25'tir.

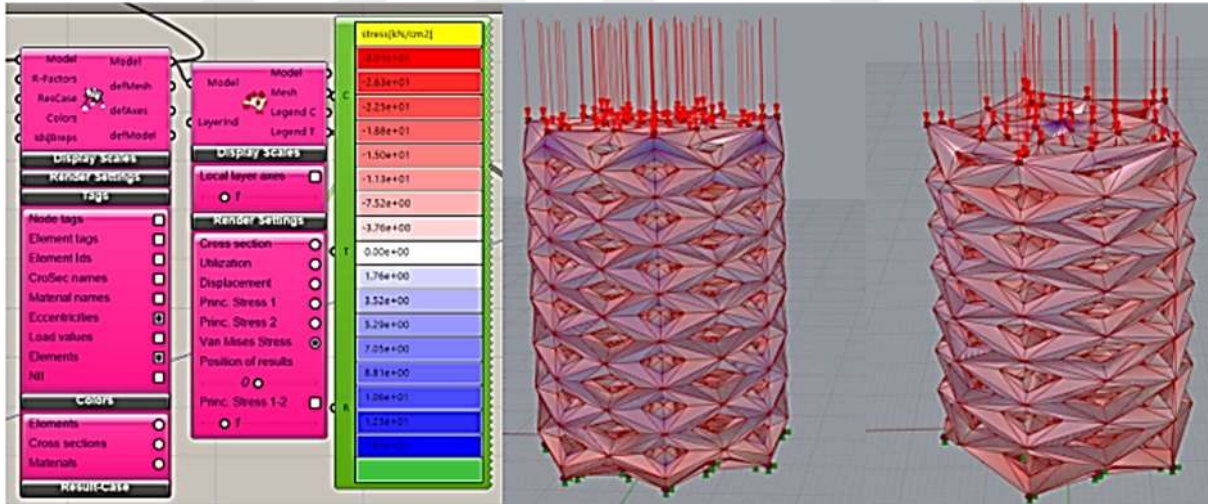


Şekil 4.11. Biyolojik olarak ilham alınan polar YMK silindirik kafes tasarımları a) YMK-Ring b) YMK-Stack c) YMK-Petal d) YMK-Core e) YMK-Mesh f) YMK-Leaf (Oymak ve ark., 2026).

Polar YMK'da desteklerin kalınlığı, birim hücrenin boyutu ve silindirik kafes yapısının yönlendirildiği açı gibi önemli geometrik özellikleri dinamik olarak kontrol etmek için, parametrik modelleme kullanan tam kapsamlı bir tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. Bu mekanik ve yapısal özelliklerin büyük bir doğrulukla hassas bir şekilde ayarlanmasını mümkün kılmıştır. Radyal parametrik kontrol, ayrıca değişken bir gözenek boyutu dağılımı sunarak, tasarımın biyolojik olarak aktif alanlarda daha yüksek gözenekliliğe sahip olmasını ve diğer alanlarda mekanik bütünlüğün korunmasını mümkün kılmıştır. Mukavemet ve esneklik gibi çelişen hedefleri dengelemek için ÇAGA kullanılmıştır (Oymak ve ark., 2026). Bu, tasarım alanını keşfetmeyi ve hem biyomekanik performans hem de biyolojik uyumluluk için en iyi kafes konfigürasyonları bulmayı kolaylaştırmıştır.

Önerilen biyomimetik kafes tasarımları, biyomekanik uyumluluk, minimum kütle ve yüksek yüzey alanı gibi ortopedik implantlar için temel performans kriterlerini hedeflemektedir. Özellikle yapılar fizyolojik aralıkta (1-20 GPa) bir Young modülü elde etmek, ağırlığı en aza indirmek için %50-70 arasında gözeneklilik sağlamak; kemik büyümesini ve osteojenik potansiyeli artırmak için 300-600 μm (mikro metre) gözenek boyutları içerecek şekilde tasarlanmıştır. Temel tasarım prensiplerinden biri, doğal kemik yükleme davranışını taklit etmek ve stres konsantrasyonlarını azaltmak için kafes boyunca homojen stres dağılımının teşvik edilmesidir (Taniguchi ve ark., 2016). Bu hedeflere polar YMK kafes mimarilerinin entegrasyonu ile ulaşılmış ve SEA kullanılarak değerlendirilmiştir.

Mekanik açıdan tasarımlara bakıldığında, basma altında erken burkulmayı önlemek ve fizyolojik yükler altında yapısal stabilite sağlamak için yedi eksenel birim hücre içermektedir. Tasarımların gözenek boyutu dağılımı, yüzey alanını en üst düzeye çıkaracak, biyolojik fiksasyonu ve hücreyi destekleyecek şekilde ayarlanmıştır. Buna ilave olarak çok amaçlı optimizasyonun kullanımı, klinisyenlerin ve mühendislerin belirli anatomik bölgelere veya mekanik gereksinimlere göre uyarlanmış tasarım varyantlarını seçmelerine olanak tanıyan bir Pareto çözümleri cephesi sağlamıştır. Mekanik güvenlik, osteojenik işlevsellik ve tasarım esnekliğinin bu birleşimi, önerilen implantların klinik uygulanabilirliğini desteklemektedir. Şekil 4.12, GA optimizasyonunun sonuçlarını, özellikle de çözümlerin Pareto cephesini görselleştirerek sunmaktadır.

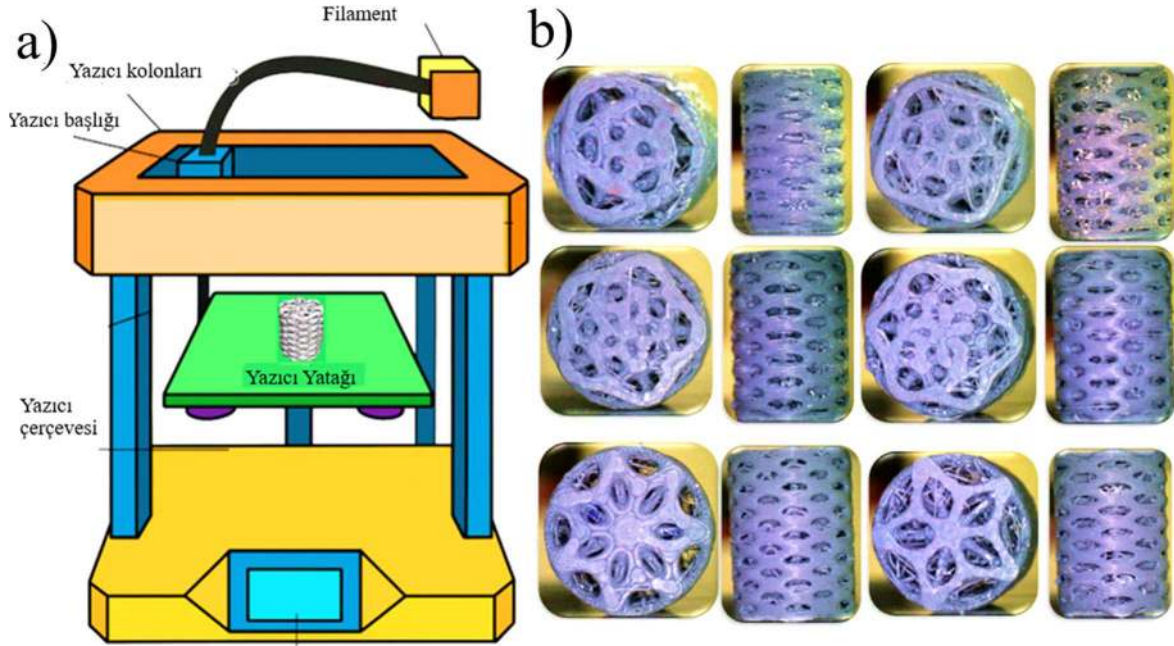


Şekil 4.12. Polar YMK kafesinin çok amaçlı genetik parametre tasarımı (Oymak ve ark., 2026).

4.2.7. Polar YMK latis silindir yapıların üretimi

Polar YMK latis silindir yapıların üretiminde, üretim kısıtlamalarının entegrasyonu için EFÜ'ye özgü uyarlamalar, minimum payanda kalınlığı 1 mm, kendinden destekli açılar ($>45^\circ$) ve katman yönlendirme optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemeler biyouyumlu termoplastiklerle (PLA'lar) uyumlu tasarımlardır. Radyal kafes yapıları, bir kodlayıcı yazıcı (Shenzhen Creality 3D

Technology Co. Ltd.) kullanılarak üç boyutlu olarak üretilmiştir. 3B yazıcı özellikleri şu şekildedir: Nozul sıcaklığı 220 °C; yapı platformu sıcaklığı 55 °C; baskı hızı 50 mm/sn; katman yüksekliği 0,2 mm'dir. Deney esnasında soğutma fanı sürekli çalışmıştır. Dolgu yoğunluğu %100 ve dolgu konfigürasyonu raster tipindedir. Numuneler destek yapıları olmadan üretilmiştir. Monofilament çapı $1,75 \pm 0,05$ mm idi (Oymak ve ark., 2026). Şekil 4.13'da 3B yazıcıyla parça üretimi şematik şekilde gösterilmektedir.

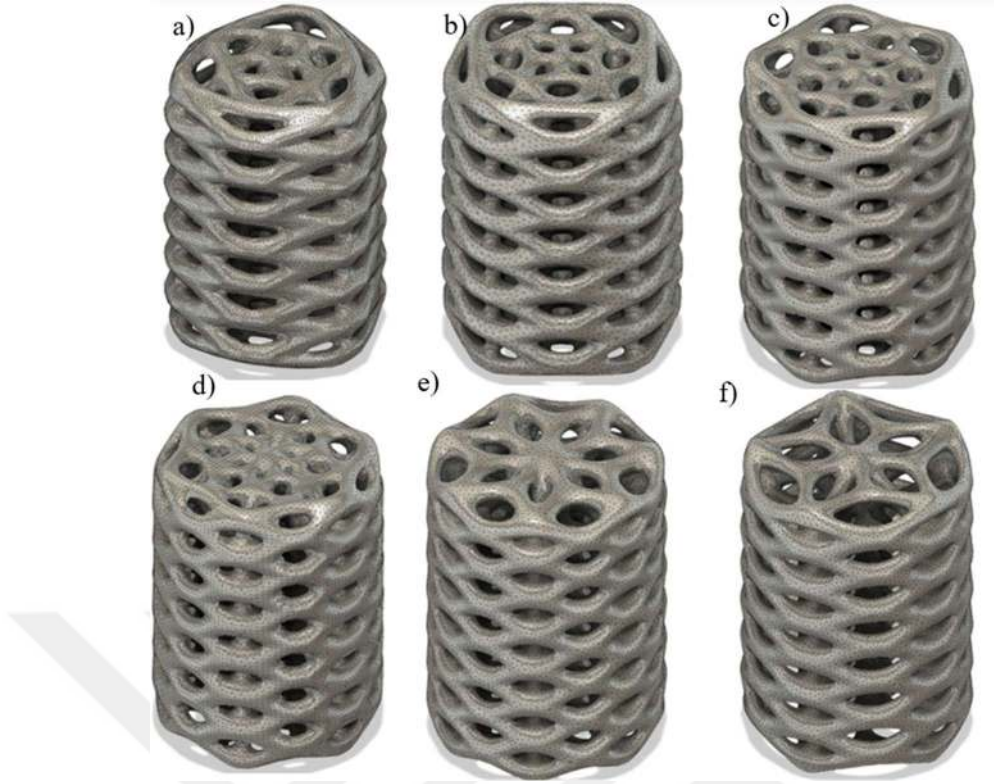


Şekil 4.13. Polar YMK latis silindir yapılarının üretimi. a) 3B yazıcının şeması b) 3B baskılı Polar YMK tasarımları (Oymak ve ark., 2026).

4.2.8. Polar YMK latis yapılarda modelleme, ağ oluşturma ve temas ayarları

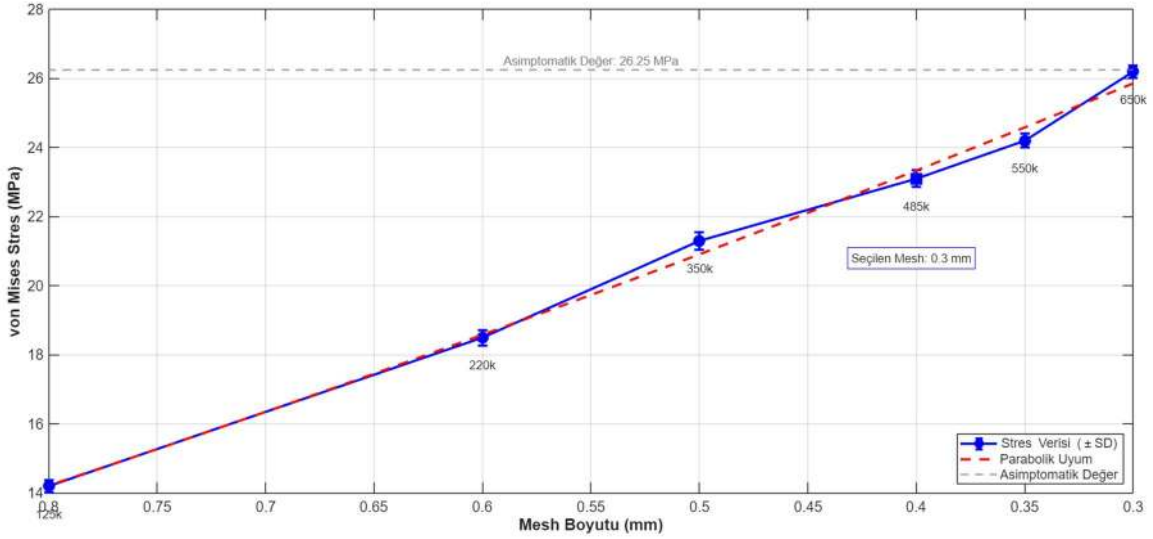
Polar YMK latis yapılarda modelleme, ağ oluşturma ve temas ayarları için biyolojik olarak, aktif bölgelerde gözenekliliğin korunmasını sağlayarak doku entegrasyonunu ve hücrel aktiviteyi destekleyen gerilim odaklı bir fonksiyonel derecelendirme stratejisi uygulanmıştır.

Hesaplamalarda Rhino 8 Grasshopper yazılımı ile örtük çözücü kullanılmıştır. Tüm destek tabanlı polar YMK kafesleri için, Standart üçgenleme dili (STL) ağlarından katı hacim oluşturmak üzere FUSION 360 yazılımı (öğrenci sürümü, Autodesk, ABD) kullanılmıştır. Fusion 360 kullanılarak STL ağları karesel şekilli fonksiyonlara sahip tetrahedral hacim ağlarına dönüştürülmüştür (Şekil 4.14). İnce ayar ağ çalışmaları yeterli sayıda eleman garanti ederek, hücre boyutuna eşit ortalama bir eleman kenar uzunluğu sağlamaktadır (Oymak ve ark., 2026). Şekil 4.14'de YMK Polar kafes yapılı silindir hacim ağları gösterilmiştir.



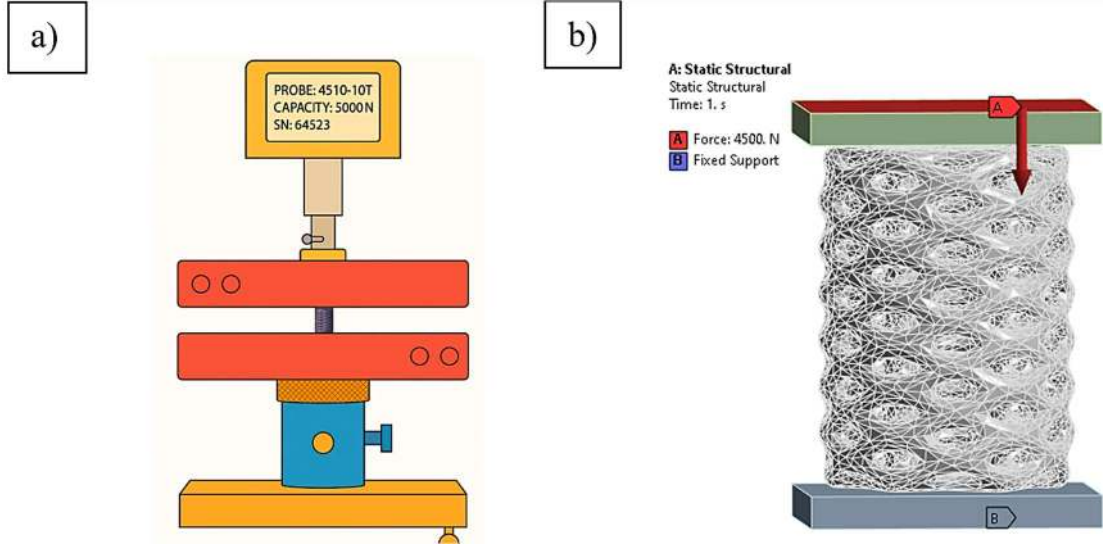
Şekil 4.14. Polar kafes yapılı silindir hacim ağırları: a) YMK-Ring, b) YMK-Stack, c) YMK-Petal, d) YMK-Core, e) YMK-Mesh, f) YMK-Leaf (Oymak ve ark., 2026).

Analizlerin daha iyi sonuç verebilmesi için ince ayarlı tetrahedral ağ 0,3 mm eleman boyutu, %50'den az kuvvet-yer değiştirme değişimi gösteren yakınsama çalışmalarıyla Şekil 4.15'de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Yüksek gerilim gradyan bölgelerine öncelik verilmiş ve bu da 523585-645875 düğüm ve 312548-365875 eleman içeren, hesaplama verimliliğini doğrulukla dengeleyen modellerle sonuçlanmıştır. Deneysel verilere karşı doğrulama, gerilim-şekil değiştirme eğrilerinde %50'ye kadar gerilim deformasyon desenlerinde yüksek oranda doğrulanmış; daha yüksek gerilimlerde küçük sapmalar 3B baskı kusurlarına atfedilmiştir (Oymak ve ark., 2026).



Şekil 4.15. Mesh yakınsama çalışması Mesh-von Mises gerilim grafiği (Oymak ve ark., 2026).

Basma makinesi test boyunca eşit kuvvet uygulamasını sağlasa da numune hizalaması ve ortam gibi faktörler değerlendirilerek basma testleri yoluyla pürüzsüz ve işlevsel silindirik kafes topolojilerinin mekanik performans üzerindeki etkisi belirlenmiştir. 5 kN'a kadar yük uygulayabilen Instron 3345 evrensel mekanik test cihazı, oda sıcaklığında yapısal nitelikleri değerlendirmek için kullanılmıştır (Şekil 4.16 (a)). Testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve gerinim hızı bu test prosedürü için standart olan 1 mm/dakikaya ayarlanmıştır. Doğruluk ve güvenilirliği sağlamak için her konfigürasyondan üçer adet olmak üzere toplam 18 örnek incelenmiştir. Her basma testi için üç numune üretilerek test ve üretim prosedürlerinde tutarlılık sağlanmıştır. Yazıcı parametreleri kontrol edildiğinde, PLA 3B yazıcı yöntemi tutarlı sonuçlar üretmiş; ancak malzeme ekstrüzyonundaki küçük değişiklikler düzensizliklere neden olabilir. Tekrarlanabilirlik, yazıcı parametrelerinin dikkatli kontrolü ve tutarlı test protokolleri ile sağlanmıştır. Herhangi bir karıştırıcı faktörden kurtulmak için, aynı mekanik test prosedürü tüm düzgün ve işlevsel olarak derecelendirilmiş kafes konfigürasyonlarına uygulanmıştır. Son olarak elde edilen veriler orijinal numune ölçümleri kullanılarak mühendislik gerilim-şekil değiştirme verilerine dönüştürülmüştür. Çeşitli malzemelerin ve tasarım tekniklerinin mukavemeti, enerji emilimi, deformasyon özellikleri, sertliği ve genel etkinliği test sonuçları kullanılarak değerlendirilmiştir. 3B ile yazdırılmış kafes yapılarının sonlu eleman simülasyonları, tek eksenli basma koşullarını tekrarlamak için deneysel olarak kalibre edilmiş, PLA malzeme özelliklerini (elastik modül, Poisson oranı, akma dayanımı) kullanarak ANSYS 2022'de gerçekleştirilmiş; alt sert plakaya sabit destek ve üst plakaya basma kuvveti uygulanmıştır (Şekil 4.16 (b)). Kaymayı önlemek için plaka-yapı ara yüzlerinde 0,3 sürtünme katsayısı uygulanmıştır (Oymak ve ark., 2026).



Şekil 4.16. Deneysel ve sayısal değerlendirme: a) Şematik deneysel basma testi ve b) Basma testinin sonlu elemanlar modeli.

4.2.9. Polar YMK latis yapılarda teorik ve deneysel doğrulama

Polar YMK latis yapılarda teorik ve deneysel doğrulama çalışması için Gibson-Ashby modeli, basma dayanımı ve Young modülü gibi mekanik parametreleri hücresel yapıların bağıl yoğunluğuyla etkili bir şekilde ilişkilendirme yeteneği nedeniyle seçilmiştir. Kafes malzemelerinin stres altındaki davranışını tahmin etmedeki etkinliği nedeniyle, bu çalışmada kullanılan YMK ve diğer kafes konfigürasyonlarının analizi için idealdir ve bu diğer çalışmalar tarafından da desteklenmiştir. YMK polar kafes yapılarının Gibson-Ashby modeli yoğunluk ilişkisi, hücresel malzeme mekanikine dayanarak doğrulanmıştır (Oymak ve ark., 2026).

$$\rho = \frac{\text{Destek hacmi}}{V_{\text{toplaml}}} = \frac{\pi t^2 \times L_{\text{toplaml}}}{4\pi R^2 Z} \quad (4.4)$$

Kafes yapılarındaki farklı deformasyonları genişletmek için “n” kritik parametrelerine sahiptir. Elastik modül (E), plato dayanımı (σ_{pl}), bağıl yoğunluk (ρ/ρ_s) ve yoğunlaşma noktasındaki gerilim (ϵD) temel parametrelerdir. Bu karmaşık etkileşimler, kafes yapıların özellikleri hakkında önemli güncel bilgiler sunan (4.5) ve (4.6) denklemleriyle açıklanmaktadır. Güç katsayıları teorik olarak öncelikle eğilme ve gerilmeye dayanımlarıyla kontrol edilen yapılar için sırasıyla 1,5 ve 2 olmalı; gerilmeye kontrol edilen yapılar için bir olmalıdır. “n” iki veya daha fazla olduğunda rijitlik vurgulanır. Daha önce verilen aralıkta yer alan “n” değerleri, genel deformasyon türü için alternatif bir açıklama sağlar. Malzemenin katı kısmı “s” alt simgesiyle, kafes yapısı ise “*” üst simgesiyle gösterilmiştir. C_1 ve C_2 değerleri Gibson-Ashby katsayılarıdır (Oymak ve ark., 2026).

$$\left(\frac{E}{E_s}\right) = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{n_1} \quad (4.5)$$

$$\left(\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}}\right) = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{n_2} \quad (4.6)$$

Yoğunlaşma gerinimi aşağıdaki denklem kullanılarak değerlendirilebilir:

$$\varepsilon_D = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (4.7)$$

4.2.10. SLA ile üretim metodu

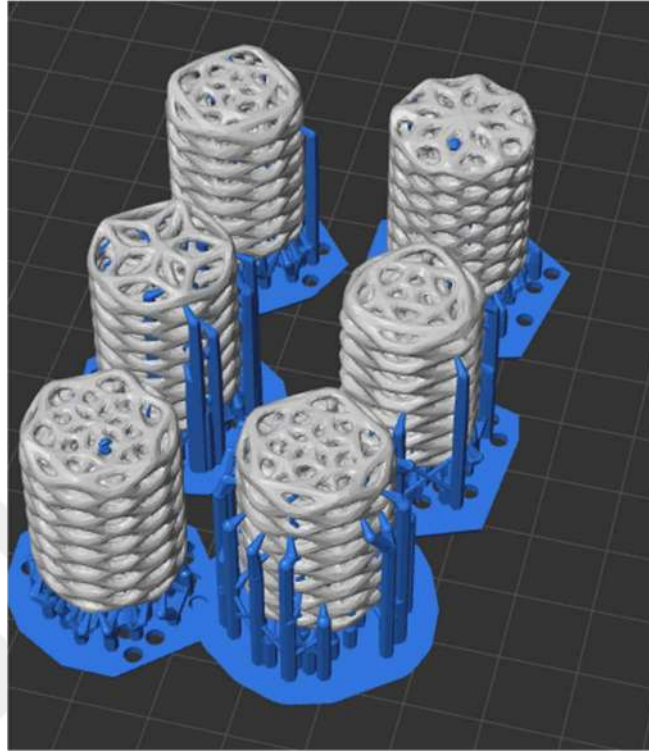
SLA ile Üretim Materyalleri için yapılan çalışmada, fotokürlenebilir biyouyumlu bir reçine olan Alias Dental Denture polimer matrisi kullanılmıştır. Reçine 405 nm dalga boyunda kürlenebilen, ortodontik ve dental uygulamalara yönelik, yüksek rijitlikte bir malzemedir. Takviye malzemesi olarak, biyouyumluluğu ve osteokonduktif özellikleri nedeniyle hidroksiapatit (HAp) tozu tercih edilmiştir. Kullanılan HAp tozunun ortalama parçacık boyutu 50 µm aralığında olup, deney öncesinde nemden arındırılması amacıyla 60 °C’de 1 saat süreyle etüvde kurutulmuştur.

HAp katkılı kompozit reçine karışımının hazırlanması, ağırlıkça %0,5, %1, %1,5 ve %3 HAp içerecek şekildedir. Belirlenen miktardaki HAp tozu, Alias Dental Denture reçinesi içerisine yavaş ve kontrollü biçimde eklenmiştir. Karışım homojenliğini sağlamak amacıyla Şekil 4.17’deki gösterildiği gibi manyetik karıştırıcıda 24 saat karıştırma işlemi uygulanmıştır. Hazırlanan kompozit reçineler, partikül çökmesini önlemek amacıyla 30 dakika içerisinde yazdırma işlemine alınmıştır.



Şekil 4.17. Manyetik karıştırıcı ile karıştırma işlemi

Silindirik şeklindeki örnekler 3B modelleme yazılımı Rhino 8 kullanılarak, STL olarak dışa aktarılmıştır. Dosya dilimleme yazılımı Anycubic Photon Workshop (sürüm 3.3.7 Shenzhen Anycubic Technology Co., Ltd., China) programı kullanılarak Şekil 4.18’deki gibi işlenmiştir.



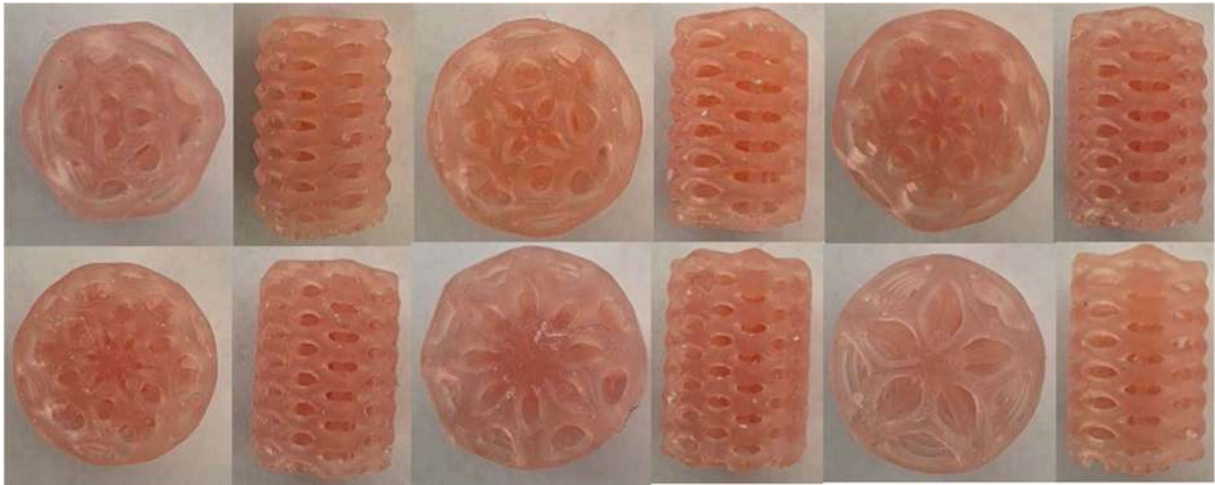
Şekil 4.18. Dosya dilimleme yazılımı Anycubic Photon Workshop ile tasarlanan şekillerin dilimlenmesi

SLA yazdırma ile numunelerin üretim süreci, 405 nm UV ışık kaynağına sahip bir Anycubic Photon Mono M7 Pro SLA/MSLA yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.19 de MSLA yazıcı ve çıkan ürünler gösterilmiştir



Şekil 4.19. Anycubic Photon Mono M7 Pro SLA/MSLA yazıcı ve yazıcıda biyoreçine ile üretilen ürünler.

Baskı parametreleri, HAp katkısının ışık geçirgenliği üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir. Katman kalınlığı 50 µm olarak belirlenmiş, normal katman pozlama süresi 2 saniye olarak ayarlanmıştır. Alt katmanlar için 6-8 katman ve 30 saniye pozlama süresi kullanılmıştır. Yazdırılan numuneler mekanik testler için ilgili ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Derneği) standartlarına uygun geometrilerde üretilmiştir. Üretilen numunelerin üst ve yan görünüşü Şekil 4.20 de verilmiştir.



Şekil 4.20. Üretilen numnelerin üst ve yan görünüşü.

Yazdırma işlemi tamamlanan numuneler, kürlenmemiş reçine kalıntılarının uzaklaştırılması amacıyla Tripropylene Glycol Monomethyl Ether (TPM) kullanılarak Anycubic temizleme ünitesinde iki aşamalı 15 dakika temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Temizleme ünitesi Şekil 4.21 de verilmiştir.



Şekil 4.21. Temizleme ünitesi

Temizleme sonrası numuneler oda sıcaklığında kurutulmuş ve 405 nm UV Anycubic kürleme ünitesinde 9 dakika süreyle post-kürleme uygulanmıştır. Kürleme cihazı Şekil 4.22’de gösterilmiştir. HAp katkısının UV absorpsiyonunu artırması nedeniyle kürleme süresi saf reçineye kıyasla uzatılmıştır.



Şekil 4.22. Kürleme cihazı

Üretilen numuneler üzerinde mekanik ve yapısal özelliklerin belirlenmesi amacıyla basma deneyi Şekil 4.23'teki gibi ASTM D695 basma standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.23. Basma deney cihazı

Elastik modül, maksimum gerilme ve deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Numunelerin kırılma yüzeyleri ve HAp dağılımı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 4.24 deneyde kullanılan taramalı elektron mikroskobu Leo Evo-40 xVP cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı

Basma sonucunda oluşan numunelerdeki farklılıkları ölçülendirmeler yapmak için şekil 4.25 de ki EUROMEX DC.5000-WiFi marka dijital optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 4.25. EUROMEX DC.5000-WiFi marka optik mikroskop

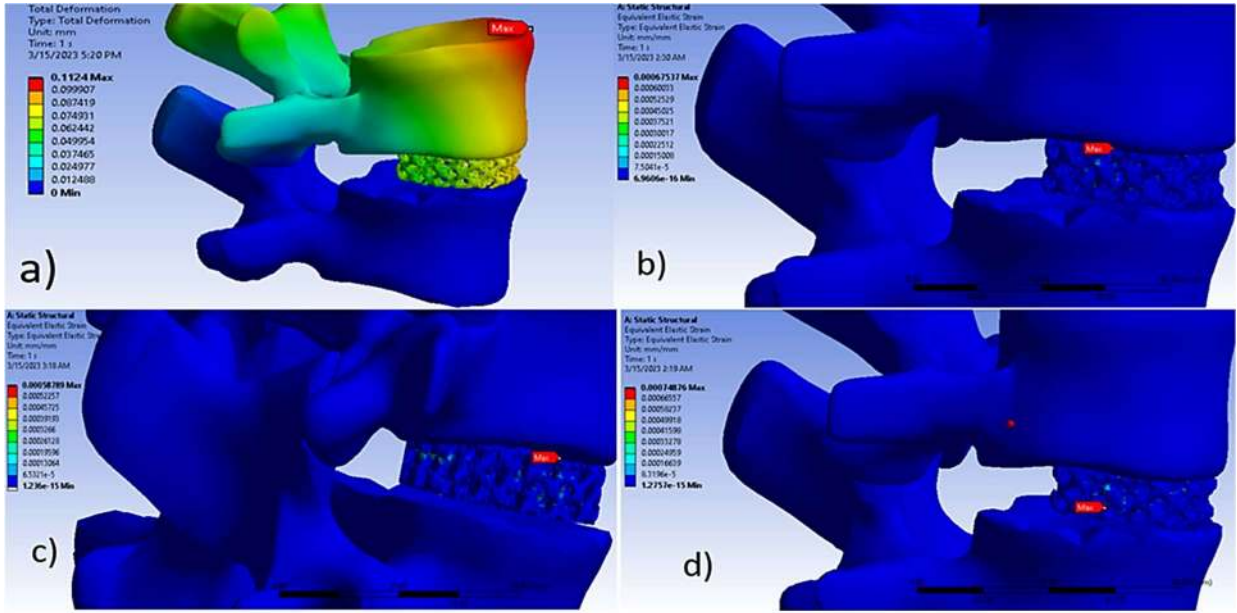
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Yapılan çalışmanın deney ve sonlu elemanlar ile elde edilen bulgular ve sonuçları değerlendirilmiştir. Burada sonlu elemanlar ile lomber omurga implant analizi, deneysel ve sonlu elemanlar ile silindirik latis tasarımları ve genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis tasarımların deformasyon analiz bulguları değerlendirilip tartışılmıştır.

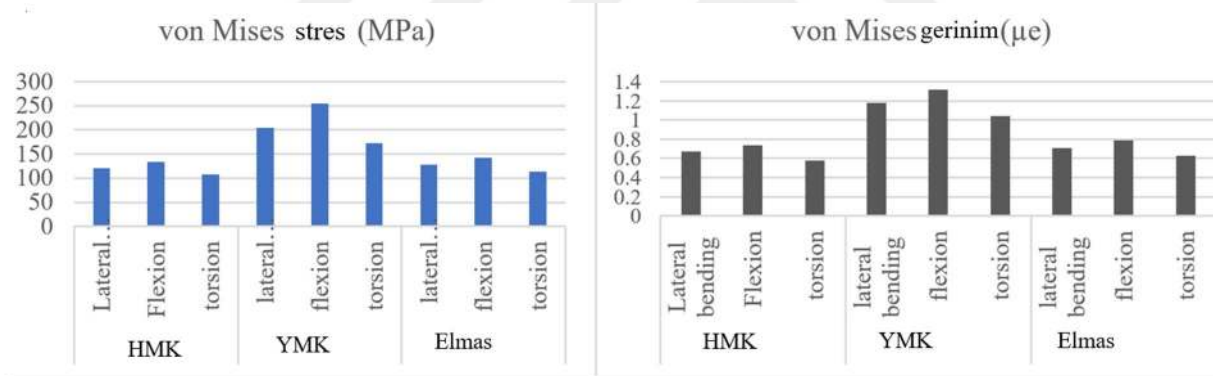
5.1. Sonlu Elemanlar ile L3-L4 Omurga İmplatı Analizi

Araştırmada elde edilen bulgular değerlendirildikten sonra, çalışma ile ilgili tartışmalar yapılacak, devamında konu ile ilgili önerilere yer verilecektir. Çalışmada L3-L4 omurga ve gözenek yapılı vücut içi füzyon implantının sonlu elemanlar programı ile kuvvet ve moment uygulanarak analizi gerçekleştirilmiştir. Omurga ve implant analizleri sonucunda toplam deformasyon ve von Mises stres analizi yapılmıştır. Omurga ve vücut içi kafes düzeneğinin en yüksek toplam deformasyonu, Şekil 5.1 (a)'daki yanal bükülme momenti altında 0,1124 mm olarak tespit edilmiştir. Literatürü incelediğimizde toplam deformasyonun maksimum miktarı yanal eğilme momentlerinde gözlemlenmiştir (Han ve ark., 2022). 400N eksenel kuvvet ve 7,5 N.m yanal bükülme, burulma bükülmesine eşdeğer elastik gerinim modeli Şekil 5.1'de (b,c,d) gösterilmiştir. Maksimum gerilim, gerinim ve kırılma noktaları; yanal bükülme, burulma ve bükülme için aynı düzende gözlemlenmiştir. Maksimum gerinim sırasıyla Şekil 5.1 (b) 0,67 $\mu\epsilon$ (mühendislikte mikro gerinim (microstrain) anlamında kullanılır ve ölçü birimi olarak $\mu\epsilon$ “mikroepsilon” şeklinde yazılır) yanal bükülme, Şekil 5.1 (c) 0,58 $\mu\epsilon$ burulma ve Şekil 5.1 (d) 0,74 $\mu\epsilon$ bükülme ölçülmüştür. Maksimum eşdeğer elastik gerinimler, vücut içi kafes kırılma modeli noktalarında gösterilmektedir (Bozyiğit ve ark., 2023).

Vücut içi kafesin stres ve gerinim dağılımı, ameliyat sonrası kafes kırığı, gevşemesi ve diğer komplikasyonları değerlendirmemiz için bir temel sağlar. Maksimum stres ve gerilim miktarları Şekil 5.2'de verilmiştir. En düşük stres ve burulma momenti etkisi HMK gözenek yapısında, bükülme momenti etkisi altında, YMK gözenek yapısında en yüksek maksimum gerilme 255 MPa ve maksimum gerinim 1,32 $\mu\epsilon$ olarak bulunmuştur

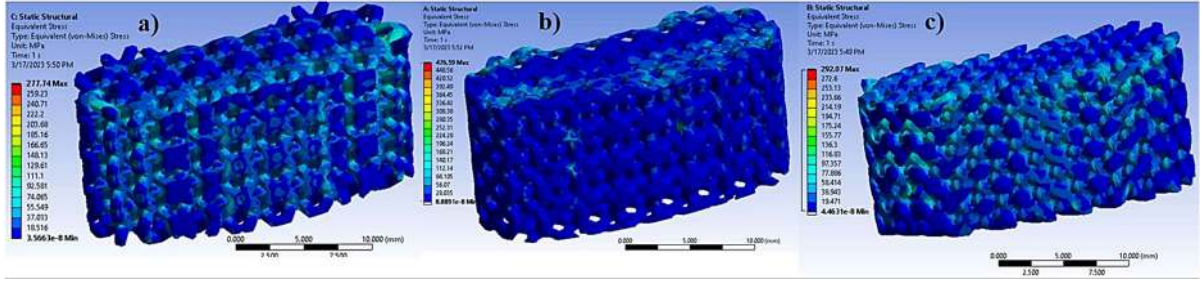


Şekil 5.1. HMK vücut içi kafeste eksenel 400 N kuvvete sahip L3-L4 omurga kemiği ve gözenekli tasarımlı vücut içi kafes: a) Toplam deformasyon 7,5 N.m yanal bükülme b) Moment 7,5 N.m yanal bükülme c) 7,5 N.m burulma d) 7,5 N.m bükülme (Bozyiğit ve ark., 2023).



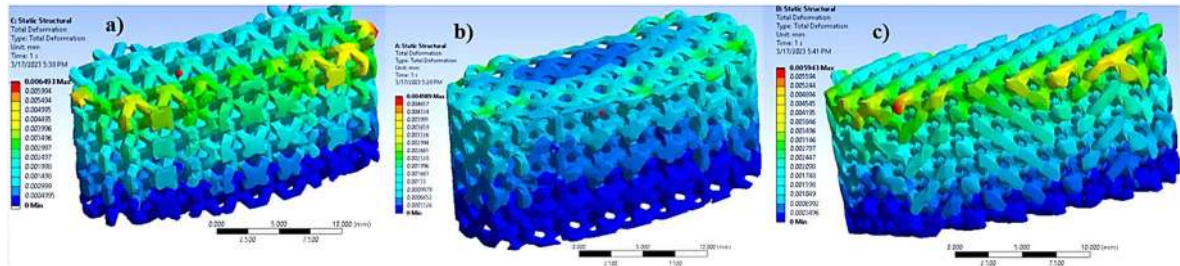
Şekil 5.2. L3-L4 omurları ve HMK, YMK ve elmas gözenek tasarımlı vücut içi kafes maksimum gerilme ve gerinim (Bozyiğit ve ark., 2023).

Tasarlanan gözenekli lomber vücut içi kafes, kuvvet modellerinde literatürdeki benzer uygulamalar incelenerek, 1000 N sıkıştırma yükleri uygulanarak HMK YMK elmas kafes yapılarının yüksek sıkıştırma kuvvetleri altındaki etkileri gözlemlenmiştir. Von Mises, Şekil 5.3'de 1000 N basma yükü altındaki gerilmeler incelendiğinde, HMK yapıda 277,74 MPa gibi daha düşük bir gerilmeye sahip olduğu ve yükün her noktaya eşit olarak dağıldığı görülmektedir. YMK yapıda en yüksek von Mises gerilmeleri 476,56 MPa olarak görünmektedir. Bunun nedeni YMK yapısı üzerindeki düz tabakanın kuvveti dağıtması ve tasarım gereği yüzeyde çökmelerin meydana gelmesidir. Sonlu eleman analizlerinin sonuçları da literatürle iyi bir uyum içerisindedir (Cai ve ark., 2020; Bozyiğit ve ark., 2023).



Şekil 5.3. Gözenekli lomber vücut içi kafes implantının von Mises gerilmeleri a) HMK b) YMK c) Elmas yapılı (Bozyiğit ve ark., 2023).

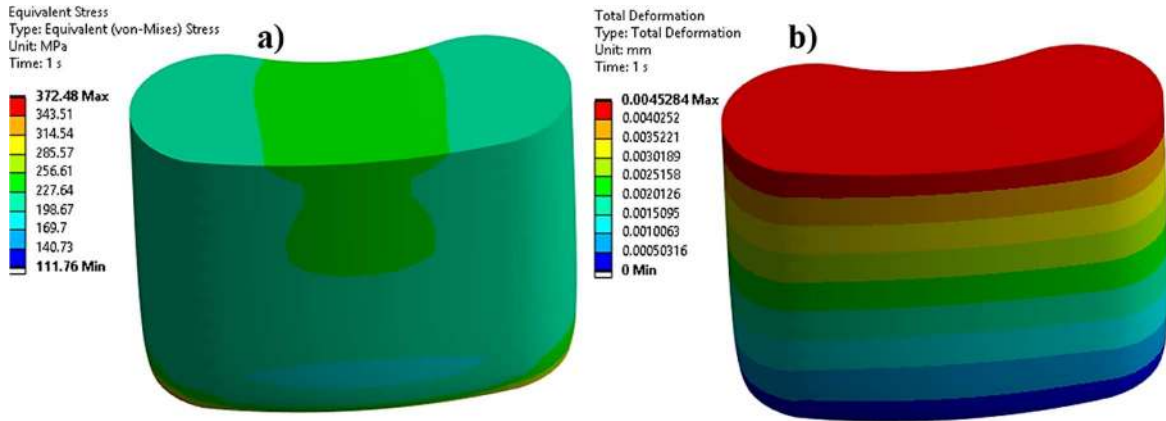
Gözenekli lomber interbody kafes implantlarının toplam deformasyonları Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Toplam deformasyonun en yüksek değeri HMK yapılı gözenekte 6,5 μm , elmas yapısında ise bu değere yakın 5,9 μm olarak bulunmuştur. YMK yapısında ise 4,9 μm gibi daha düşük bir değer ölçülmüştür. HMK yapısında toplam deformasyonun daha fazla olması, bu yapının YMK yapısına göre daha esnek olduğunu göstermiştir. Toplam deformasyonlar, YMK gözenekli kafes, HMK ve elmas yapılı gözenekli kafeslerden daha yüksek sertlik göstermiştir. HMK gözenek yapısı en düşük sertliği gösterir. Kafesin sertliği azaldığında, omurga kemikleri arasındaki stres koruma etkisi de azalmaktadır (Wu ve ark., 2023). YMK yapısı 4,9 μm ile en düşük deformasyonu göstermektedir. Bu durum, yük altında daha az şekil değiştirerek yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğunu kanıtlar. Düşük deformasyon, omurga implantlarında kritik olan segmental stabilitenin korunmasını sağlar. Bu durum, implant çökme riskini azaltır. Omurga implantlarında yeterli sertlik, füzyon sürecini destekler ve implantın uzun ömürlü olmasını sağlar.



Şekil 5.4. 1000 N sıkıştırma kuvveti için gözeneklili lomber vücut içi kafes implantlarının toplam deformasyon miktarları a) HMK b) YMK c) Elmas yapı (Bozyiğit ve ark., 2023).

Sonlu elemanlar ile dolu omurga implantının von Mises gerilimi ve toplam deformasyonu Şekil 5.5'de gösterilmiştir. 1000 N yük altında gerilme miktarı 372,48 MPa, toplam deformasyon ise 4,5 μm olarak ölçülmüş ve YMK yapıya yakın bir değer çıkmıştır. Gözenekli HMK yapıda 277,74 MPa gerilme ölçülmüştür. Bu da verimin %65,8 miktarında olduğunu göstermektedir. YMK yapıda en yüksek von

Mises gerilmeleri 476,56 MPa olarak görünmektedir. YMK yapıdaki verimin %128 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.5. Dolu omurga implant yapının a) von Mises gerilimi b) Toplam deformasyonu.

Vücut içi füzyon kafeslerinin üretiminde en çok kullanılan malzemelerden biri Ti6Al4V'dir. Ti6Al4V olağanüstü korozyon direncine ve mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte titanyum alaşımları bozulmaz ve biyolojik olarak inert malzemelere aittir, implantasyondan sonra kalıcıdır, dolayısıyla implantın kırılma riski kümülatiftir. Titanyum alaşımının elastik modülü 113 GPa'dır; insan kortikal kemiğinin ise elastik modülü 13 GPa'dır (Meena ve ark., 2021). Daha yüksek bir elastik modül, kemik ile vücut içi kafes arasında daha önemli bir stres farkına neden olmaktadır. Stres farkı arayüzde azalmaya ve stres kalkanına neden olur, bu da yeni kemiğin büyümesini engeller.

Bu nedenle füzyon kafesi tasarımı, farklı patolojik ortamlara göre özelleştirilmiş ve farklılaştırılmış tasarımlar gibi önemli iyileştirme potansiyeline sahiptir. Sorunlar nedeniyle bu çalışmada, kafes yapılarına sahip topoloji optimizasyon teknolojisini kullanan gelişmiş bir vücut içi füzyon kafeslerin tasarımı uygulanmaktadır. Kafeslerin gözenek yapıları, dahili sabitleme hata riskini azaltabilir. Klinik araştırmalar lomber füzyon cerrahisindeki kafeslerin lomber lordozu ve omurga dengesini iyileştirebildiğini ve füzyon kafesinin yer değiştirmesini önleyebildiğini göstermiştir. Stres ve gerinim dağılımı, kafes ile omurlar arasındaki temas alanındaki vücut içi kafesteki en yüksek stres ve gerinimi tanımlamaktadır. Kafesin maksimum geriliminin düşük olmasının stres koruma etkisini azalttığı ve uygulamaya uygun olan kafesin özellikle osteoporozlu yaşlı hastalarda çökme riskini azalttığı sonucuna varılabilir (Kim ve ark., 2012). Osteoporoz hastalarının kemik yoğunluğu normal hastaların kemik yoğunluğundan daha düşüktür. Kemik yoğunluğu BT görüntüsü ile bulunabilir. Kemik yoğunluğuna göre kemiğin Young modülü hesaplanabilir ve osteoporoz hastaları için en uygun kafes tasarlanabilir. Gözenekli kafes metal implant yapıları, Young modülünü önemli ölçüde azaltırken, mekanik özelliklerini koruduğu görülmektedir (Bozyiğit ve ark., 2023).

HMK ve YMK, elmasla karşılaştırıldığında, gerilimler ve gerinimler YMK gözenek yapılı vücut içi füzyon kafesi, lomber omurga kemikleri için daha iyi gerilim, gerinim ve toplam deformasyonu göstermiştir. SE analizi yalnızca cerrahi operasyon sonrasındaki biyomekaniği analiz edebilir ve kemik büyümesinin neden olduğu sertlik azalması dikkate alınmaz. HMK ve elmas yapılı kafesler %59 poroziteye sahiptir ve bu da iyi bir kemik uyumu yapısını gösterir. 600 µm gözenekli Ti6Al4V implant boyutunun %65 gözenekliliğe sahip olduğunu ve kemik içi büyümesi için umut verici bir seçim olduğu ileri sürülmüştür (Taniguchi ve ark., 2016; Bozyiğit ve ark., 2023). Cerrahi operasyon sonrası kafeslerin mekanik özellikleri, kemik büyüme durumu daha fazla araştırmaya ihtiyaç duymaktadır.

5.1.1. Sonlu elemanlar ile lomber omurga implantının sonuç ve tartışması

Sonlu elemanlar ile lomber omurga implantının sonuçları değerlendirilmiştir. Bunun için vücut içi füzyon gözenekli tasarımı, farklı patolojik ortamların yanı sıra özelleştirilmiş ve seçkin tasarımlar gibi hala önemli ölçüde iyileştirme olasılığı vardır. Yukarıdaki sorunlardan dolayı bu çalışmada yenilikçi bir HMK, YMK ve elmas gözenek yapılı vücut içi füzyon tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Omurganın HMK, YMK ve elmas yapılı vücut içi kafeslerin, 400 N eksenel kuvvet ve 7,5 N.m uygulanan yanal eğilme, bükülme ve burulmaya göre bükülme altında gerilme geriliminin ve toplam deformasyonunun daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. YMK gözenekli vücut içi kafes yapısında bükülme momenti etkisi altında en yüksek gerinim ve gerilim izlenmiştir. Omurga ve gözenekli vücut içi kafes düzeneğindeki en yüksek toplam deformasyon, yanal bükülme momenti altındadır.

Gözlemlenen yapılarda von Mises gerilmeleri incelendiğinde 1000N basma kuvveti için 277,74 MPa ile HMK yapılarının diğer yapılara göre daha düşük yoğunlukta olduğu görülmüştür. Bu durumda gerilmelerin daha az olduğu ve yükün her noktaya eşit olarak dağıtıldığı izlenmiştir. YMK yapısında en yüksek von Mises gerilimi 476,56 MPa olarak ölçülmüş, toplam deformasyonun en yüksek değeri HMK yapısında 6,5 µm, elmas yapısında ise bu değere yakın 5,9 µm bulunmuştur. YMK yapısında ise 4,9 µm gibi daha düşük bir değer ölçülmüştür. YMK yapılı gözenekli kafeste toplam deformasyonun daha düşük olması, istenmeyen gerilim koruma etkilerini ortadan kaldıran en düşük sertliği göstermektedir. HMK ve elmas yapı tasarımının kemik implant aderansını artıracak ve %59 gözeneklilik ile kemik büyümesini desteklemek için iyi bir seçenek olacağı düşünülmektedir (Bozyiğit ve ark., 2023).

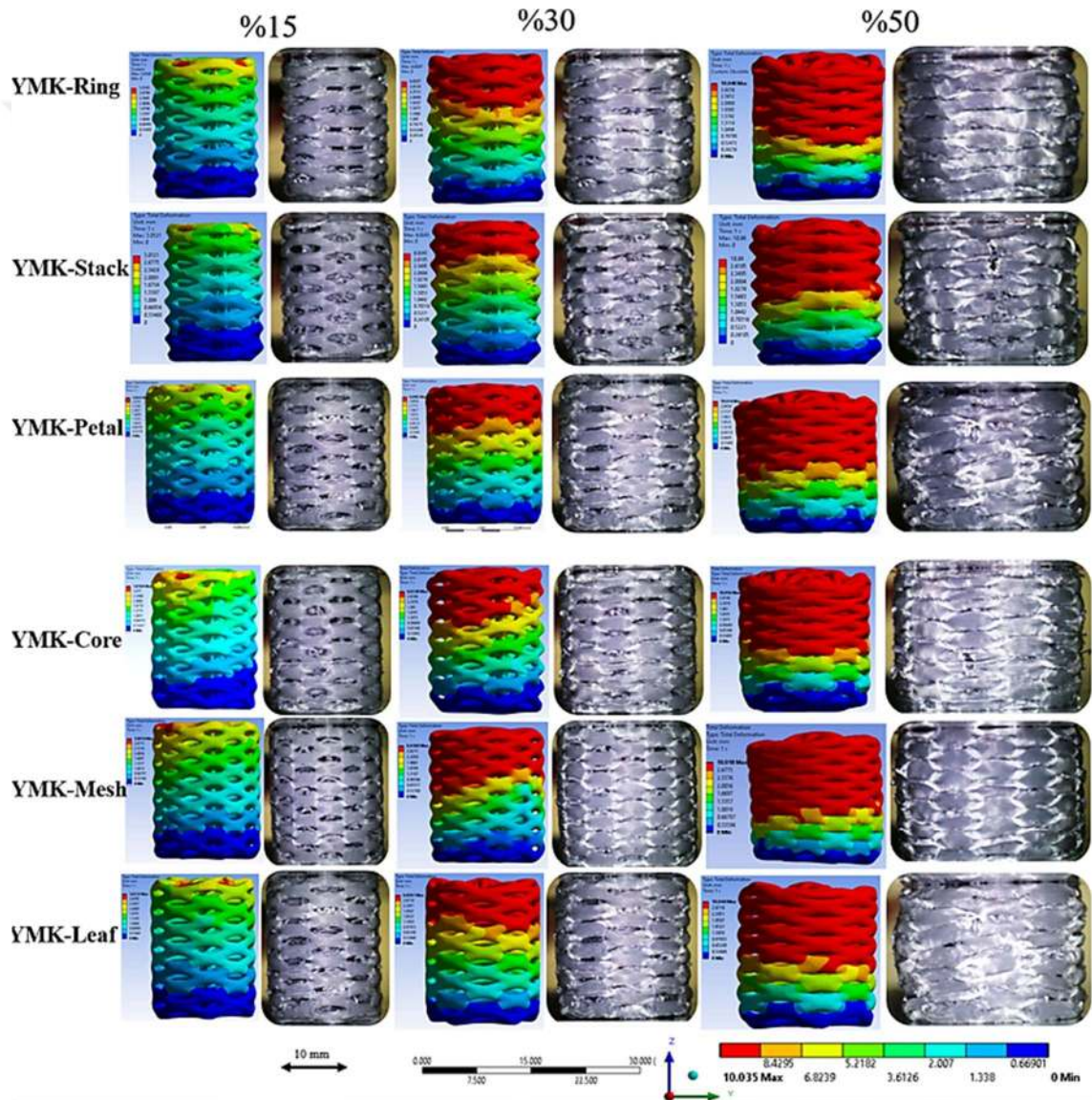
Bu sonuçlar, implantasyon için vücut içi füzyon kafeslerinin gözenek yapılı olarak üretilmesi gerektiğini desteklemektedir. Bu implantlar uzun süre boyunca kemik kırılması riskini önlemek için stresi ve gerilimi azaltabilir. Sonuçlar ayrıca gözenekli füzyon kafeslerinin stres ve gerinim açısından optimize edilebileceğini ve bireysel hastaların kişisel ihtiyaçları ve farklı kemik yapılarına göre özelleştirilebileceğini de göstermektedir.

5.2. Polar YMK Latis Parametrik Dizaynların Sonuç ve Tartışması

Yukarda verilen omurga implant tasarımlarına ilave olarak burada silindirik latis yapılar, omurga segmentlerinin doğal radyal yük taşıma mekanizmasını taklit edebilen, yoğunluk gradyanı uygulanabilir. Silindirik numune geometrisine geçiş, hem üretim hem de mekanik test süreçlerinde standardizasyon sağlayarak, deneysel sonuçların daha güvenilir şekilde elde edilmesine katkı sağlamıştır. Basma testleri sırasında yükün eksenel doğrultuda homojen aktarılması, gerilme dağılımlarının daha kontrollü incelenmesine olanak tanımış ve lokal gerilme yığılmalarının daha net analiz edilmesini mümkün hale getirmiştir. Özellikle latis yapılarda geometrik düzensizliklerin azaltılması, yapının gerçek mekanik davranışının daha doğru değerlendirilmesini sağlamıştır. Sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde kritik gerilme bölgelerinin silindirik alanlarda yoğunlaştığının belirlenmesi üzerine, deneysel prototipleme bu bölge esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece biyomimetik polar latis yapının mekanik performansı, üretilebilirliği ve enerji absorpsiyon davranışı kontrollü bir geometri üzerinden incelenmiştir. Silindirik yapıların hafiflik ve mekanik performans açısından avantaj sağladığı literatürde de belirtilmektedir (Taniguchi ve ark., 2016; Torstrick ve ark., 2018).

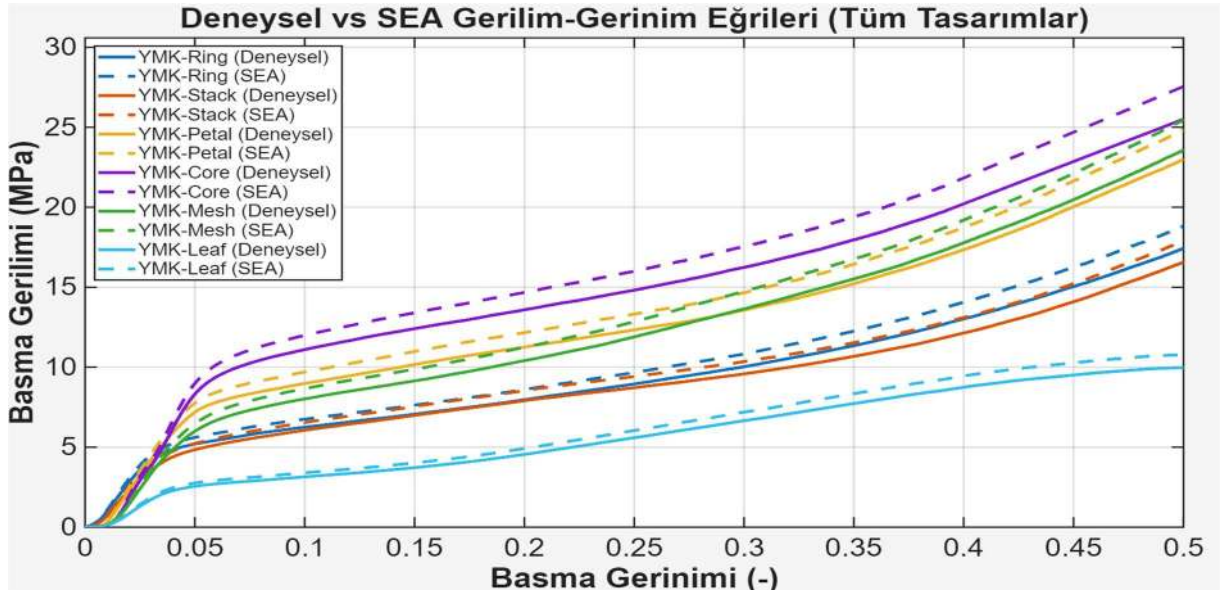
Polar silindirik yapılar eklemeli imalata uygun ve biyomekanik uyum sağlayabilen yapılar oldukları için omurga implant tasarımında tercih edilmiştir. Bu yaklaşım hem mekanik optimizasyon hem de biyolojik entegrasyon açısından geleneksel implantlara üstünlük sağlamaktadır. Yapılan çalışmada yüksek gözeneklilik oranı ile basma yükü altında, daha iyi sonuçları elde etmek için polar YMK latis parametrik tasarımlarına ihtiyaç duyulmuştur. Burada polar YMK latis parametrik dizaynların sonuçları ele alınmış ve tartışılmıştır. Polar YMK parametrik yapılar, YMK latis omurga implantına göre gözeneklilik oranı daha fazla olmasına rağmen, basma testi sonucunda daha iyi yük taşıma sonuçları verebilmiştir. YMK tabanlı altı latis tasarımının (YMK-Ring, YMK-Stack, YMK-Petal, YMK-Core, YMK-Mesh ve YMK-Leaf) %15, %30 ve %50 gerinim seviyelerinde tek eksenli basma yükü altında karşılaştırmalı analizi Şekil 5.6'da gösterilmektedir. SEA ve 3B ile yazdırılmış numuneler kullanılarak yapılan basma deneyleri kullanılmıştır. SEA bir renk gradyanı boyunca toplam deformasyonu gösterirken, deneysel sonuçlar basma yükü sırasındaki mekanik tepkileri ortaya koyarak sayısal modelleri doğrulamış ve geometrinin mekanik davranış üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. %15 gerinim seviyesinde tasarımlar, minimum yer değiştirmeye elastik deformasyon gösterirken, %30 ve %50 gerinimde belirgin deformasyonlar ortaya çıkmıştır. YMK-Ring ve YMK-Mesh yükleri verimli bir şekilde dağıtırken, YMK-Stack ve YMK-Leaf karmaşık geometrileri nedeniyle yerel deformasyon sergilemiştir. Basma yükü gerilimi arttıkça YMK-Ring ve YMK-Mesh düzgünlüğü ve verimli yük dağılımını korurken, YMK-Petal ve YMK-Leaf asimetrik şişkinlik ve gerilim yoğunlaşmaları göstermiştir. %50 gerinimde özellikle YMK-Core, YMK-Stack ve YMK-Petal'de önemli deformasyon

gözlemlenmiştir. Bu da neredeyse tam çökmeyi gösterirken, YMK-Petal ve YMK-Leaf asimetrik burkulmadan dolayı ciddi hasar göstermiştir. Deneysel gözlemler SEA tahminlerini doğrulayarak, modellerin mekanik performansı tahmin etmedeki güvenilirliğini vurgulamaktadır. Bu bulgular yük taşıma kapasitesi ve kontrollü deformasyon özellikleri arasında bir denge gerektiren spinal implantlar gibi, biyomedikal uygulamalar için kafes tasarımlarını optimize etmek açısından önemlidir. Yük taşıma kapasitesinin gözeneklilik ve biyolojik entegrasyonla dengelenmesi gereken spinal implantlar gibi biyomedikal mühendislik uygulamalarında, bu bulgular yalnızca mukavemet için değil, aynı zamanda öngörülebilir deformasyon ve enerji dağılımı özellikleri için de geometriye uyarlamanın önemini ortaya koymaktadır (Oymak ve ark., 2026).



Şekil 5.6. Toplam deformasyon miktarındaki yüzde değişimin deneysel ve SEA karşılaştırılması
(Oymak ve ark., 2026).

Altı farklı YMK tabanlı kafes tasarımı için deneysel ve SEA basma gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin ayrıntılı bir karşılaştırması Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Bunlar: YMK-Ring, YMK-Stack, YMK-Petal, YMK-Core, YMK-Mesh ve YMK-Leaf’dir. Analizde deneysel veriler için düz çizgiler, 0 ila 0,5 gerinim arasındaki basma gerilmeleri ve 25,48 MPa’ya kadar ulaşan gerilme değerleri boyunca SEA simülasyonları için kesikli çizgiler gösteren çift eğrili bir format kullanılmıştır. Tüm latis tasarımları, hücresel katıların göstergesi olan doğrusal olmayan gerilim-şekil değiştirme karakteristikleri sergilemiş ve başlangıçtaki elastik bölgeden doğrusal olmayan bir sertleşme fazına ve bir yoğunlaşma platosuna doğru ilerlemiştir. YMK-Core ve YMK-Mesh tasarımları yüksek basma dayanımları (sırasıyla %50 geriniminde 25,48 MPa ve 23,58 MPa) göstermektedir. Ancak SEA modelleri, simülasyondaki malzeme mükemmelliği ve izotropi ile ilgili varsayımlar nedeniyle daha yüksek gerinim seviyelerinde gözlenen gerilmeleri biraz fazla tahmin edilmektedir. Bu çalışma, SEA’lerinin biyomedikal implantlar gibi enerji emilimi gerektiren uygulamalarda yüksek tahmin kabiliyetini koruduğunu göstermektedir. Yapılar arasında YMK-Leaf %50 gerinimde, 9,97 MPa ile en düşük basma dayanımını sergileyerek yüksek esneklik ve hafiflik avantajı sunmuş, ancak yüksek yük gerektiren uygulamalara uygun olmadığı ortaya çıkmıştır. YMK-Ring %50 gerinimde 17,43 MPa değerle dengeli bir mekanik performans gösterirken, YMK-Mesh sertlik ve esneklik arasında hibrit bir davranış sergilemiştir. Nicel hata analizleri, Kök ortalama kare hatası değerlerinin 0,37–0,9 MPa arasında değiştiğini ve tüm tasarımlarda ortalama hataların %8’in altında kaldığını göstermiştir (Oymak ve ark., 2026). Bu sonuçlar, SEA modellerinin YMK kafes yapıların basma altındaki davranışlarını güvenilir biçimde simüle ettiğini, ancak özellikle YMK-Petal gibi eğrilik veya lokal gerilim konsantrasyonlarına sahip tasarımlar için daha hassas modelleme yaklaşımlarına ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır.



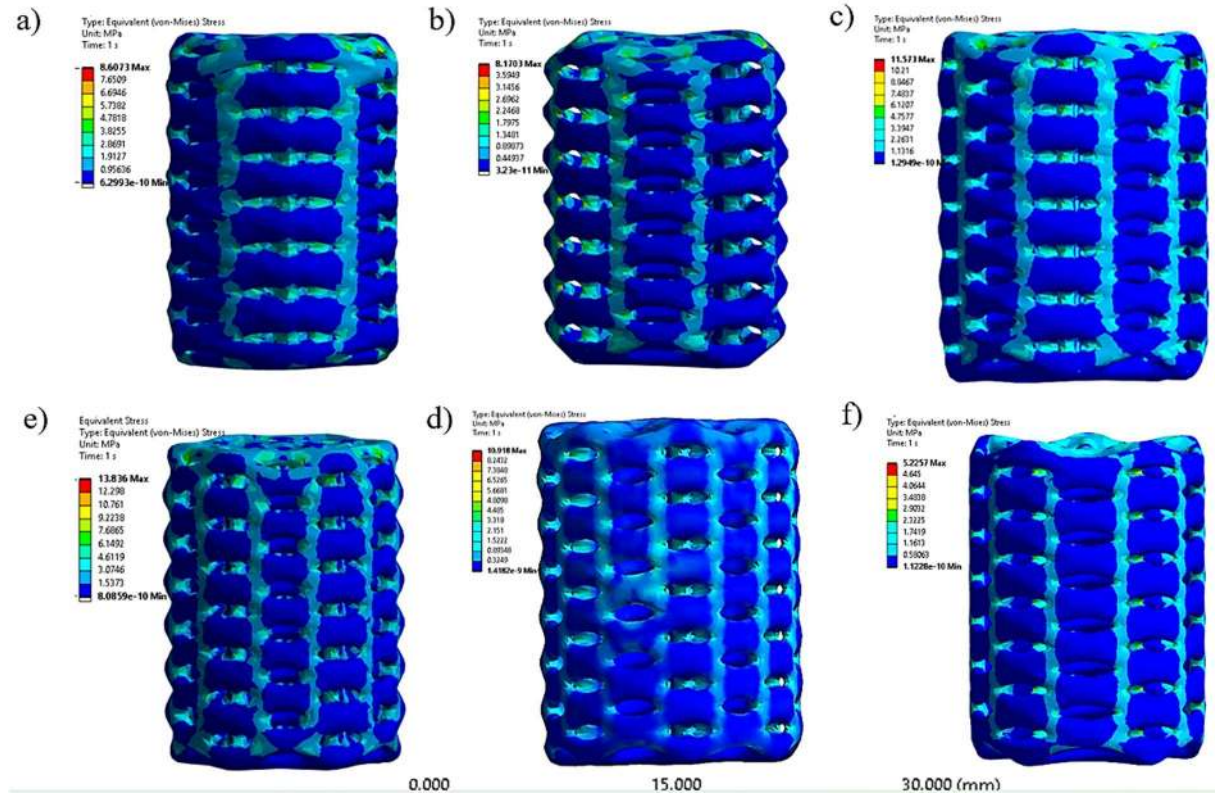
Şekil 5.7. Altı farklı YMK tabanlı kafes tasarımı için deneyisel ve SEA ile simüle edilmiş basma gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (Oymak ve ark., 2026).

Altı farklı YMK-türevi kafes yapısının mekanik davranışlarının analizinde, plato gerilimi ile bağlı yoğunluk arasında belirgin bir ilişki bulunduğu Tablo 5.1’de gösterilmektedir. YMK-Core %50,31 bağlı yoğunlukta 13,41 MPa ile en yüksek plato gerilimine ulaşırken, YMK-Leaf %30,75 bağlı yoğunlukta 4,68 MPa plato gerilmesi ile en düşük değeri göstermiştir. Bu sonuçlar, Gibson-Ashby ölçekleme yasası ($E/E_s = C_1 \rho^n$, $\sigma_p/\sigma_s = C_2 \rho^m$) ile uyumludur. n değerleri (0,88-1,11 aralığında) çoğu yapıda gerilmeye dayalı deformasyonun baskın olduğunu (ideal $n \approx 1$) gösterirken, m değerleri (0,95-1,50 aralığında) YMK-Leaf’in mukavemeti açısından gerilmeye; YMK-Mesh’in ise eğilmeye dayalı bir mekanik tepkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. C_1 ve C_2 Gibson-Ashby katsayıları her kafes topolojisi için elastik modül ve plato geriliminin yoğunlukla olan orantılılığını sayısal olarak tanımlayarak, her yapının kendine özgü geometrik-mekanik karakteristiğini nicel biçimde ifade etmektedir (Oymak ve ark., 2026).

Tablo 5.1. Gibson Ashby sabit parametreleri (Oymak ve ark., 2026).

Tasarım	Bağıl Yoğunluk %	n	m	C_1	C_2
YMK-Ring	37,18	0,9896	1,0923	0,0496	0,0590
YMK-Stack	40,09	0,9359	1,0472	0,0445	0,0520
YMK-Petal	44,50	1,0396	1,1833	0,0612	0,0554
YMK-Core	50,31	1,1122	1,2218	0,0379	0,0394
YMK-Mesh	43,64	1,0442	1,5021	0,0119	0,0162
YMK-Leaf	30,75	0,8785	0,9532	0,0620	0,0561

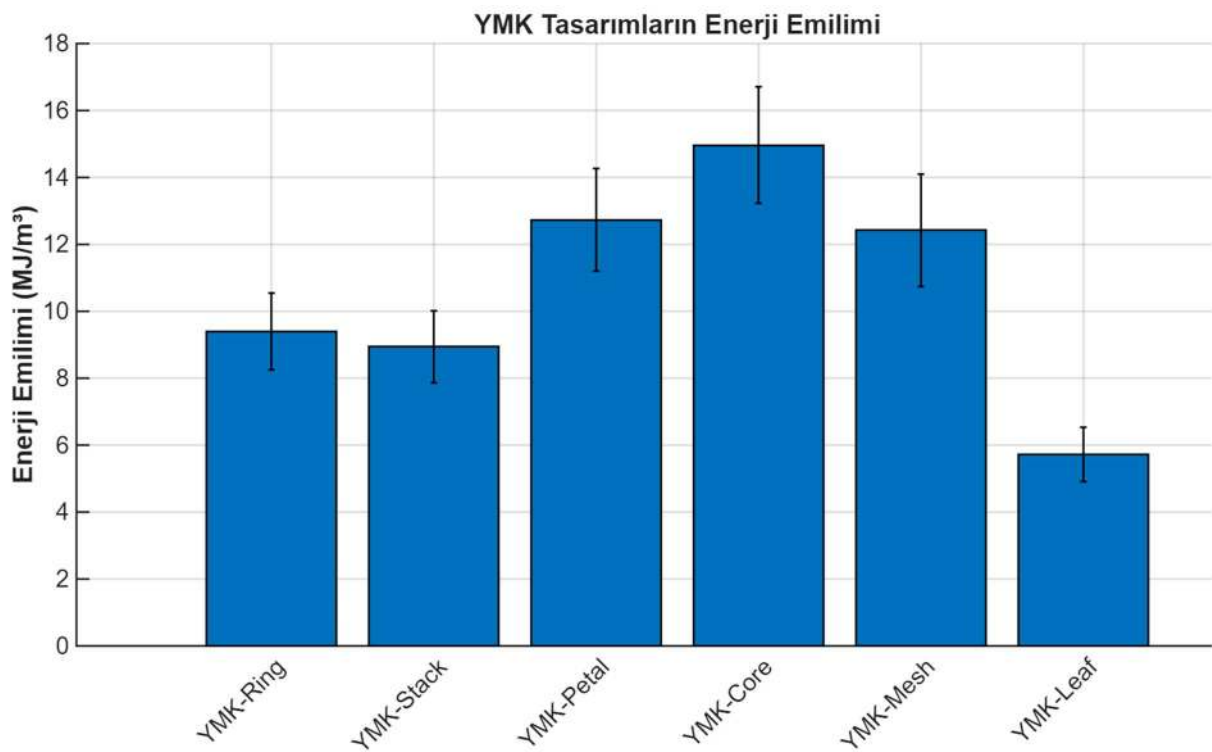
Tüm yapılarda simülasyon sonuçlarının deneysel plato gerilimi, YMK-Leaf %3,7 ile YMK-Ring %6,2 arasında değişen yüzdelik farklarla tahmin edilmiştir. Bu tahmin, idealize edilmiş geometriye ve sonlu eleman modellerinde üretim kusurlarının bulunmamasına ve deneysel basma testlerine kıyasla sınır koşullarındaki potansiyel farklılıklara atfedilmektedir. Ayrıca tasarım topolojisinin performansı, bağıl yoğunluktan daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Örneğin YMK-Petal ve YMK-Mesh yapılar benzer bağıl yoğunluklarına rağmen, farklı plato gerilimi değerleri (deneysel olarak 11,57 MPa'ya karşı 10,91 MPa) sergilemiştir. Bu durumda destek yöneliminin ve bağlantısının plato fazı sırasında yük aktarım mekanizmalarında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Genel olarak simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki güçlü korelasyon (hata $\leq$ %6,2), sayısal modellerin plato gerilimini tahmin etme yeteneğini doğrularak, yük taşıyan implantlar gibi biyomedikal uygulamalarda yinelemeli kafes tasarımı optimizasyonu için uygun hale getirmiştir (Oymak ve ark., 2026). Şekil 5.8'de plato geriliminin başlangıç gerilim dağılımının SEA sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5.8. YMK-tabanlı latis yapıların SEA ile plato gerilimi: a) YMK-Ring b) YMK-Stack c) YMK-Petal d) YMK-Core e) YMK-Mesh f) YMK-Leaf (Oymak ve ark., 2026).

Altı farklı YMK tabanlı kafes yapısının (YMK-Ring, YMK-Stack, YMK-Petal, YMK-Core, YMK-Mesh ve YMK-Leaf) basma deneyi altındaki enerji emilim tepkileri Şekil 5.9'da karşılaştırılmıştır. Her tasarıma ait enerjinin emilim bulguları sütunlarda gösterilmiştir.

YMK -Core yapısı basma yükü altında mekanik enerjiye dayanma ve dağıtma konusunda üstün kabiliyetini kanıtlayan $14,96 \text{ MJ/m}^3$ ile en yüksek enerji emilim değerini sergilemiştir. YMK -Petal ($12,72 \text{ MJ/m}^3$) ve YMK -Mesh ($12,42 \text{ MJ/m}^3$) tasarımları da güçlü bir enerji emilim davranışı gösterirken, YMK -Ring ($9,40 \text{ MJ/m}^3$) ve YMK -Stack ($8,95 \text{ MJ/m}^3$) orta düzeyde sergilediği performans Şekil 5.9'da gösterilmiştir. YMK-Leaf tasarımı, $5,72 \text{ MJ/m}^3$ ile en düşük enerji emilimini kaydetmiş, bu da eğilme-hakim deformasyon tepkisini göstermiştir. Bu sonuçlar genel olarak gerilme-hakim topolojilerin, özellikle YMK -Core'un, eğilme-hakim tasarımlara kıyasla daha iyi bir enerji emilim potansiyeline sahip olduğunu doğrulayarak, kafes geometrisinin mekanik performansı belirlemedeki kritik rolünü vurgulamaktadır (Oymak ve ark., 2026).



Şekil 5.9. Polar YMK kafes tasarımının energy absorbe etme özellikleri (Oymak ve ark., 2026).

Simülasyon sonuçları Tablo 5.2'de görüldüğü gibi, altı YMK tabanlı kafes yapısının tamamında, hem elastiklik modülü hem de plato gerilimi için deneysel değerlerle tutarlı bir şekilde güçlü bir uyum göstermektedir. Elastiklik modülü için hata yüzdeleri biraz daha yüksek olup, YMK-Leaf yapısı için %5,9'dan YMK-Ring yapısı için %8,2'ye kadar değişmektedir. Buna karşılık plato gerilimi için simülasyonlar daha da yüksek doğruluk göstermekte olup, tüm hatalar %6,5'in altına düşmekte ve YMK-Leaf ve YMK-Mesh yapıları sırasıyla %3,7 ve %3,8 değerlerle en küçük tutarsızlıkları göstermektedir. Bu yüksek korelasyon seviyesi, kullanılan hesaplamalı modelleri doğrulayarak, bu karmaşık mimarili malzemelerin mekanik performansını tahmin etmedeki güvenilirliklerini teyit etmektedir. Buna ilave olarak veriler, kafes topolojisi ve bağlı yoğunluktaki ince değişikliklerin mekanik

özellikleri ne kadar önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Örneğin %44,50'lik bağıl yoğunluğa sahip YMK-Petal yapısı benzer yoğunluğa sahip olmasına rağmen, YMK-Stack'ı (112,8 MPa) önemli ölçüde geride bırakarak, yüksek bir elastiklik modülüne (140,1 MPa) ulaşmıştır. Benzer şekilde %50,31 ile en yüksek bağıl yoğunluğa sahip olan YMK-Core, buna bağlı olarak en yüksek plato gerilimini (13,41 MPa) göstermektedir. Bu durum, metamatizme tasarımının temel bir ilkesini vurgulamaktadır. Mekanik performans yalnızca yoğunluğun bir fonksiyonu değildir, aynı zamanda malzemenin özel mimari düzenlemesinden de derinden etkilenmiştir. Bu da stratejik geometrik tasarım yoluyla sertlik ve mukavemet gibi özelliklerin uyarlanmasına imkan sağlamaktadır (Oymak ve ark., 2026).

Tablo 5.2. Polar YMK kafes silindir yapılarının elastik modülü ve plato gerilimi (Oymak ve ark., 2026).

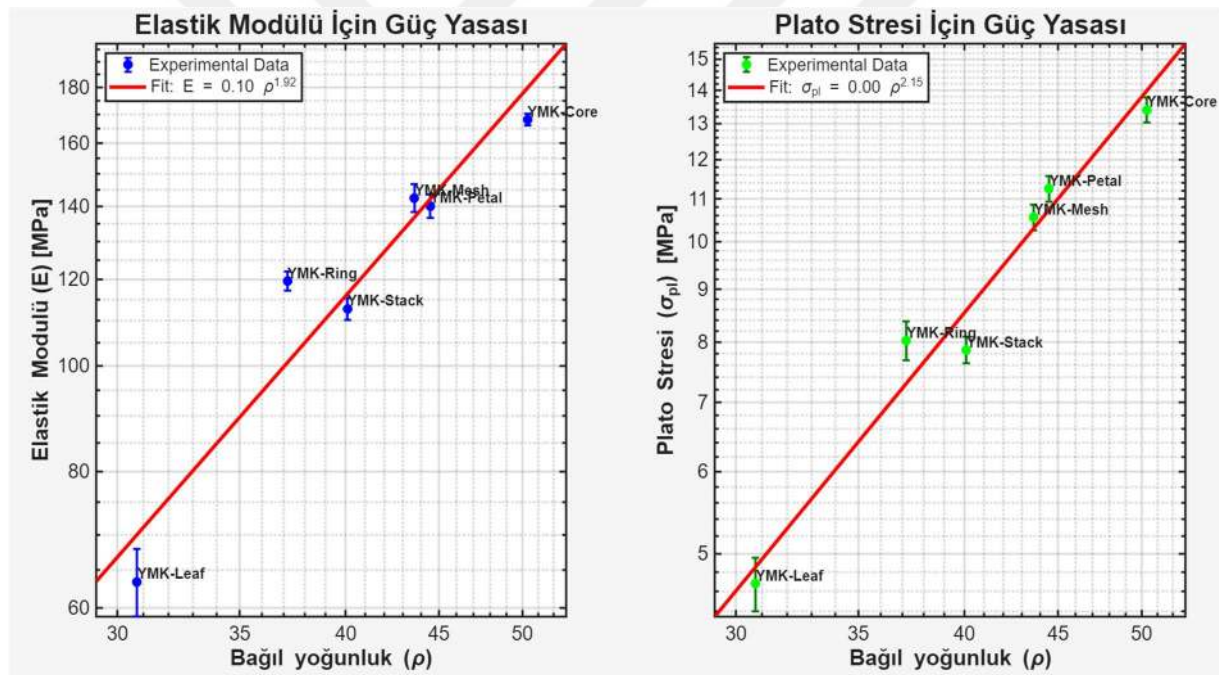
Structure	Bağıl yoğunluk	Elastik Modülü (MPa)			Plato Stres (MPa)		
		Deneysel	Simülasyon	Hata (%)	Deneysel	Simülasyon	Hata (%)
YMK-Ring	37,18	119,6 ± 2,4	130,2 ± 3,6	%8,2	8,03 ± 0,35	8,29 ± 0,20	%6,2
YMK-Stack	40,09	112,8 ± 2,6	120,6 ± 3,9	%6,9	7,86 ± 0,23	8,19 ± 0,21	%4,8
YMK-Petal	44,50	140,1 ± 3,4	152,4 ± 4,8	%6,7	11,25 ± 0,32	11,74 ± 0,29	%5,1
YMK-Core	50,31	168,1 ± 2,1	175,6 ± 4,7	%7,2	13,41 ± 0,37	13,89 ± 0,33	%4,6
YMK-Mesh	43,64	142,5 ± 4,2	149,1 ± 4,2	%6,3	10,56 ± 0,30	10,92 ± 0,27	%3,8
YMK-Leaf	30,75	63,4 ± 4,5	68,8 ± 3,4	%5,9	4,68 ± 0,28	5,04 ± 0,16	%3,7

Değerlendirilen altı kafes tasarımı arasında YMK-Core, yaklaşık %50,31'lik orta düzeyde bir bağıl yoğunlukta yüksek elastik modülü ve plato gerilimi nedeniyle mekanik olarak en verimli tasarım olarak öne çıkmaktadır. YMK-Core hem sertlik hem de mukavemette trend çizgisini aştığı için onu mukavemet ve hafiflik özelliklerinin bir kombinasyonunu gerektiren uygulamalar için ideal duruma getirmektedir. YMK-Mesh ise iyi mekanik verimliliğe sahip dengeli bir yapı sunmaktadır. YMK-Core en yüksek plato gerilimine (13,41 MPa) ve en yüksek bağıl yoğunluğa (%50,31) sahip olduğundan, ağırlık tasarrufu pahasına maksimum mukavemeti önceliklendiren uygulamalar için daha uygundur. Ancak YMK-Leaf en düşük sertliği (63,4 MPa) ve plato gerilimini (4,68 MPa) kaydetmekle beraber en düşük yoğunluğa (%30,75) sahiptir. Bu da onu yalıtım gibi yapısal olmayan veya ultra hafif kullanımlar için konumlandırmaktadır. YMK-Ring ve YMK-Stack belirgin avantajlar olmaksızın trend çizgisine yakın kalarak, orta düzeyde bir performans sergilemektedir. Yapısal ve çarpışmaya dayanıklı uygulamalar için YMK-Petal, sertlik ve enerji emilimindeki verimliliği nedeniyle en iyi tasarım olarak derecelendirilmektedir. YMK-Core, yüksek yük veya enerji dağıtıcı kullanımlar için idealdir. Güç yasası uyum analizi, mekanik özellikler ile bağıl yoğunluk arasındaki ilişkiyi göstererek, mukavemetin

sertlikten ziyade yoğunluk değişimlerine daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır (Oymak ve ark., 2026).

Güç yasası uyum denklemi (5.1) gösterilmiştir. Şekil 5.10'da gösterilen güç yasası uyum analizi, mekanik özellikler ve bağıl yoğunluk arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak, mukavemetin sertliğe kıyasla yoğunluk değişimlerine daha duyarlı olduğunu doğrulamaktadır. YMK-Petal ve YMK-Mesh üstün sertlik ve mukavemet gösterirken, YMK-Core yüksek bir plato gerilimi ve daha düşük gözeneklilik sergileyerek mukavemet merkezli bir yük aktarımına işaret etmektedir. YMK-Leaf beklenen performanstan saparak, eğilme ağırlıklı geometrisine ve düşük yük kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bulgular, YMK kafesleri arasındaki geometrik değişimlerin sertlik-mukavemet dinamiklerini önemli ölçüde etkilediğini vurgulamaktadır (Oymak ve ark., 2026).

$$E = 15,715 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1,421} \quad \sigma_p = 0,615 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1,867} \quad (5.1)$$



Şekil 5.10. Polar YMK desteklerinin kuvvet yasası uyum grafikleri.

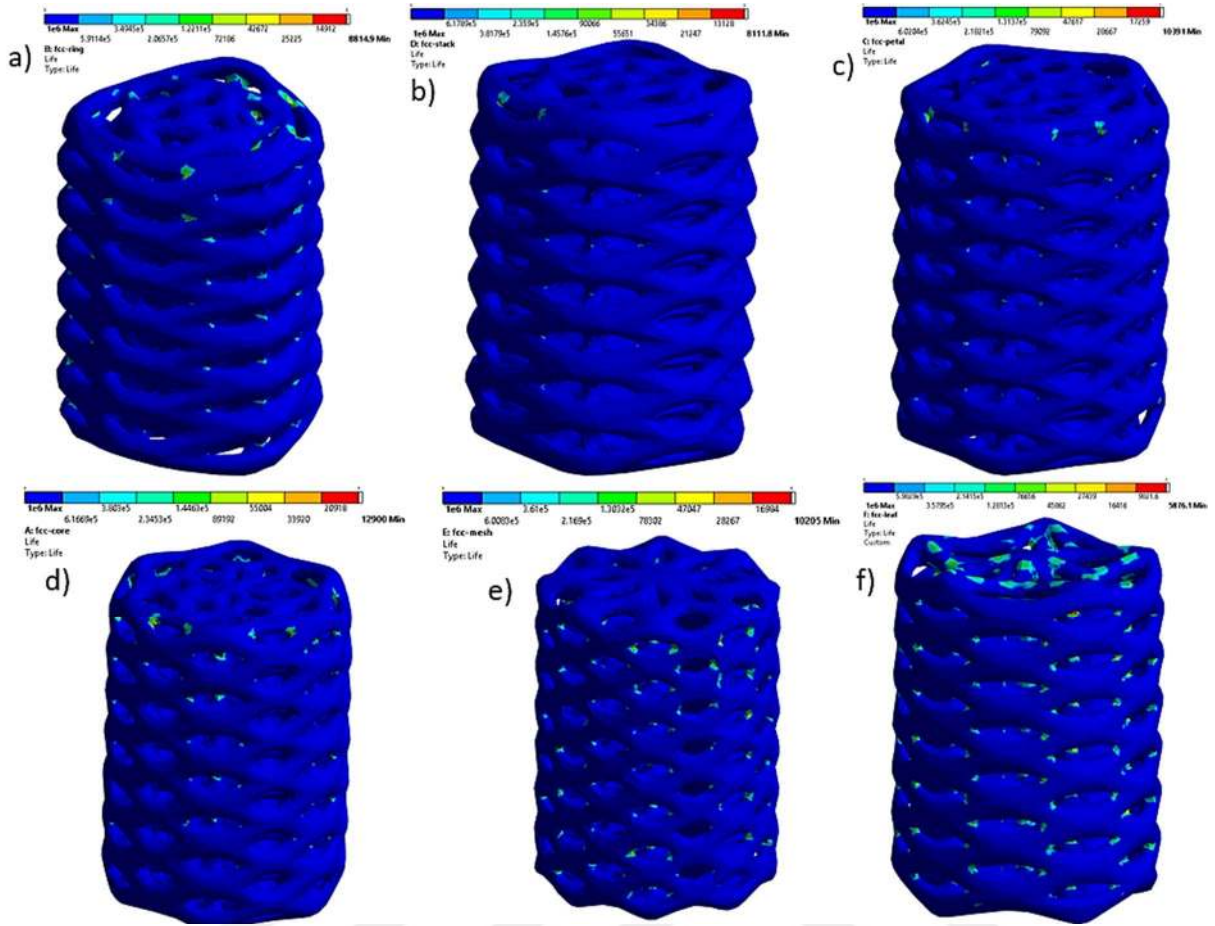
Sonuç olarak deneysel ve SEA gerilim-şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırmalı analizi, altı YMK tabanlı kafes yapısı arasında mekanik performansta belirgin farklılıklar ortaya koymaktadır. YMK-Core mukavemet ve enerji emiliminde lider konumda olup zorlu uygulamalar için idealken, YMK-Leaf hafif ve esnektir. YMK-Petal ve YMK-Mesh yüksek mukavemet ve tutarlı performanslarıyla darbeye dayanıklı veya yük dağıtıcı işlevler için uygun bir orta yol bulmaktadır. SEA tahminleri deneysel verilerle iyi bir uyum göstermekte, simülasyon metodolojisini doğrulamakta ve modellerin daha ileri optimizasyon veya üretken tasarım için güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Oymak ve ark., 2026).

Bu bilgiler biyomedikal ve mühendislik uygulamalarında kafes yapılarının belirli mekanik gereksinimlere göre seçilmesi ve uyarlanması için bir temel sunmaktadır.

Sonlu elemanlar ile 6 farklı YMK tasarımının yorulma analizleri de karşılaştırılmıştır. Şekil 5.11’de SEA sonuçları incelendiğinde, farklı hücresel kafes (latis) topolojilerinin dinamik yükler altındaki mikro-yapısal davranışları ve yorulma ömürleri arasında doğrusal olmayan varyasyonlar tespit edilmiştir. Malzemelerin yorulma mukavemetini belirleyen ve literatürde yapısal hasarın ilk başladığı nokta olarak kabul edilen minimum yorulma ömür değerleri, topolojilerin geometrik formlarına bağlı olarak belirgin bir ayrışma sergilemiştir. Elde edilen sayısal verilere göre YMK-Core topolojisi 12900 çevrim ile ilk makroskopik hasarın en geç meydana geleceği yorulma direnci, en iyi tasarım olarak belirlenmiştir. Buna karşın YMK-Leaf yapısı ise 5876,1 çevrimlik minimum yorulma ömrü değeriyle, tekrarlı yüklemeler altında yapısal bütünlüğünü hızlı kaybeden ve erken çatlak ilerlemesine en yatkın geometri olarak öne çıkmaktadır.

Mühendislik tasarımlarında yapıların yorulma ömrü sınır durumları, gerilmelerin homojen dağıldığı makro alanlara göre değil, lokalize gerilme yığılmalarının olduğu ve simülasyonda kırmızı/turuncu renklerle temsil edilen bu “minimum” sınır değerlerine göre optimize edilmiştir. Analiz edilen altı farklı modelin genel gövde yapısında mavi renk dalgaları 1×10^6 çevrim, yüksek bir yorulma limiti sergilese de, kırılgan kesim bölgelerinde ve düğüm noktalarında gerilme yığılmaları nedeniyle minimum ömür eşiklerine hızla ulaşılmıştır (Burr ve ark., 2020). Özellikle YMK-Petal (10391) ve YMK-Mesh (10205) topolojilerindeki düğüm noktalarında yumuşak geçişleri sayesinde gerilmeyi daha geniş bir alana yayarak, yüksek minimum bir ömür eşiği yakalarken; YMK-Stack (8111,8) ve YMK-Ring (8814,9) topolojilerindeki ani kesit değişimleri minimum yorulma mukavemetini negatif yönde etkilemiştir.

Elde edilen minimum yorulma verileri, özellikle havacılık, savunma ve biyomedikal gibi döngüsel yüklerin baskın olduğu ileri mühendislik uygulamalarında, topoloji seçim kriterleri için önemli bir kılavuz niteliğindedir (Gandhi ve ark., 2022). En yüksek minimum yorulma ömrünü sunan YMK-Core yapısı, hafiflik ile yüksek yorulma direncinin eş zamanlı arandığı dinamik bileşenlerin imalatı için en optimal aday olarak değerlendirilmiştir. Buna karşılık minimum yorulma sınır değerleri kritik derecede düşük çıkan YMK-Leaf gibi topolojilerin ise, erken yorulma kırılması riskini minimize etmek adına yüksek frekanslı dinamik operasyonlardan ziyade, statik yük taşıyıcı paneller veya enerji sönümleyici dolgu yapıları olarak kullanılması, güvenlik toleransları açısından daha uygun bir yaklaşımdır.



Şekil 5.11. YMK-tabanlı latis yapıların SEA ile yorulma verileri a) YMK-Ring b) YMK-Stack c) YMK-Petal d) YMK-Core e) YMK-Mesh f) YMK-Leaf

5.2.1. Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapıların klinik faydaları ve yenilikleri

Biyomimetik kafes yapılarının geliştirilmesi, ortopedik ve spinal implantların tasarımında özellikle stres kalkanı, zayıf osseointegrasyon ve implant kaynaklı mekanik arıza gibi uzun süredir devam eden klinik zorlukların ele alınmasında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Geleneksel katı implantlar, genellikle çevredeki doğal kemiğin özelliklerini önemli ölçüde aşan mekanik özellikleri sebebiyle sertlik veya elastik modül sergilemektedir. Bu uyumsuzluk, implantın mekanik yükünün çoğunu emerek kemiğin kütlesini ve yapısını korumak için gerekli fizyolojik streslerden etkili bir şekilde “koruduğu” bir stres kalkanına yol açar. Sonuç olarak, kemik erimesi ve lokal zayıflama meydana gelebilir, bu da implantın gevşemesi veya felaket düzeyinde arıza riskini artırır.

Stres kalkanı ile mücadele etmek için önerilen kafes yapıları, tipik olarak 50-500 MPa aralığında bir elastik modül ve %50-90 arasında gözeneklilik seviyeleri sergileyen süngerimsi (trabeküler) kemiğin mekanik davranışını yakından taklit edecek şekilde titizlikle tasarlanmıştır (Kujala ve ark., 2003). Grasshopper ve Rhino'daki parametrik modelleme yoluyla bağıl yoğunluk, destek kalınlığı, eksenel ve

açısal bölünmeler, eğrilik gibi parametrelerin genetik algoritmalar ile ayarlanmasıyla implantın sertliği, konak kemik dokusunun sertliğine daha yakın bir şekilde eşleştirilmiştir. Örneğin YMK-Core, kortikal kemiğin alt sınırları ve trabeküler kemiğin üst sınırları arasında rahatlıkla yer alan 168,1 MPa'lık elastik modülünü göstermiştir. Bu mekanik uyumluluk, fizyolojik yüklerin implant ve kemik arasında paylaşılmasını sağlayarak sağlıklı bir stres dağılımını desteklediği gibi stres kalkanını da azaltmıştır.

Mekanik uyumluluğa ek olarak biyomimetik kafes tasarımları, yüksek yüzey alanı ve birbirine bağlı gözenekli bir ağın entegrasyonu sayesinde gelişmiş biyolojik performans sunmaktadır. Yüzey alanı maksimizasyonu, hem makro gözenekliliği hem de mikro gözenekliliği destekleyen YMK tabanlı birim hücrelerin stratejik konfigürasyonu sayesinde elde edilmiştir. Bu açık ve iyi dağılmış gözenek ağları, osteogenez ve başarılı uzun vadeli biyolojik fiksasyon için gerekli olan vaskülarizasyonu ve hücrel infiltrasyonu desteklemektedir. Deneysel çalışmalar ve literatür 300-600 µm aralığındaki gözenek boyutlarının kemik büyümesi için ideal olduğunu ve hem osteoblastların göçüne hem de kılcal ağların oluşumuna olanak sağladığını göstermiştir (Taniguchi ve ark., 2016). YMK-Petal ve YMK-Mesh tasarımlarının ölçülen geometrileri yük altında yapısal bütünlüğünü korurken, bu gözenek boyutu yönergelerine sıkı sıkıya bağlı kalmış ve bu da hızlı ve sağlam osseointegrasyon potansiyellerini göstermiştir.

Yapısal açıdan bakıldığında, kafes implantlarının silindirik form faktörü çift yönlü bir avantaj sunmaktadır. İlk olarak omurga disklerinin veya uzun kemik boşluklarının geometrisini doğal olarak taklit ederek cerrahi implantasyon sırasında daha sezgisel bir uyum sağlamaktadır. İkinci olarak silindirik kafesler, eksenel yönde gelişmiş yük dağılımı sağlar, bu da omurga gövdesi replasmanı gibi ağırlık taşıyan uygulamalarda önemli bir husustur. Kafes mimarisindeki radyal simetri ve çevresel güçlendirme, lokalize hasara veya kırığa yol açabilecek stres konsantrasyonlarını en aza indirmektedir. Örneğin YMK-Petal ve YMK-Core konfigürasyonları, deneysel verilerde gözlemlenen doğrusal elastik ve gerilim sertleştirme fazlarından da anlaşılacağı gibi yükleri radyal ve eksenel yönlerde eşit olarak dağıtmaktadır.

Bu çalışmanın en yenilikçi yönlerinden biri, parametrik ve hastaya özel implant tasarımı kabiliyetinde yatmaktadır. Sabit geometriye ve sınırlı uyarlanabilirliğe sahip geleneksel implantların aksine burada kullanılan hesaplamalı yaklaşım, kafes parametrelerinin bireysel anatomik ve biyomekanik kısıtlamalara uyacak şekilde gerçek zamanlı olarak özelleştirilmesini sağlamaktadır. Bu durum özellikle travma, tümör rezeksiyonları veya implantların yeterli destek veya hizalama sağlayamadığı konjenital deformitelerin söz konusu olduğu vakalarda değerlidir. Hastaya özgü görüntüleme verilerinin (örneğin: BT veya MR taramaları) tasarım sürecine entegre edilmesiyle implantlar, etkilenen bölgenin eğrilik, çap ve yoğunluk gereksinimlerine tam olarak uyacak şekilde tersine mühendislikle üretilebilir. Böylece implant stabilitesi artar, cerrahi süreyi azaltır ve işlemin uzun vadeli başarısını artırır (Taniguchi ve ark., 2016). Çok işlevlilik potansiyeli, bu kafes tasarımlarının bir

diğer dikkat çekici yeniliğidir. Örneğin kontrollü gözenek mimarisi yalnızca osseointegrasyonu desteklemekle kalmaz, aynı zamanda ilaç iletimi veya biyoaktif kaplamalar için kanal görevi de görebilir. İç yüzeylerin kemik morfogenetik proteinleri (BMP'ler) veya antibiyotik salan polimerler gibi Osteindüktif ajanlarla kaplanması, rejeneratif yanıtı daha da artırabilir ve ameliyat sonrası enfeksiyon riskini azaltabilir.

Ayrıca yorulma performansı ve uzun vadeli güvenilirlik, klinik uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Çoğu YMK tasarımında basma altında gözlemlenen kademeli, ilerleyici deformasyon (gerinim sertleştirme bölgelerinde yansıtıldığı gibi), kırılma olmaktan ziyade sünek olan uygun bir hasar modunu göstermektedir. Bu da özellikle yıllar içinde döngüsel yüklemenin malzeme yorgunluğuna yol açabileceği, in vivo koşullarda faydalıdır. Katmanlı ve birbirine bağlı mimarileriyle YMK-Petal ve YMK-Mesh gibi tasarımlar yalnızca yüksek tepe dayanımı değil, aynı zamanda plastik çökmeye karşı dayanıklılık da göstererek fizyolojik koşullar altında uzun ömürlüklü potansiyel gösterir .

Son olarak bu kafes yapılarını üretmek için kullanılan üretim stratejisi, PLA gibi biyoyoumlu polimerler kullanılarak katmanlı üretim yöntemiyle, klinik kullanımları desteklenmektedir. Katmanlı üretim, karmaşık geometrilerin yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlikle üretilmesine olanak tanıyarak, en karmaşık kafes özelliklerinin bile tasarlandığı gibi gerçekleştirilmesini sağlar. Değişen duvar kalınlıklarına, yön gradyanlarına ve iç boşluklara sahip bu tür yapıları geleneksel talaşlı veya döküm teknikleri kullanılarak üretmek son derece zor, hatta imkansız olduğu da söylenebilir. Tasarımdan baskıya geçiş süreci, hızlı prototipleme ve yinelemeli doğrulamayı da destekleyerek geliştirme döngülerini kısaltır ve laboratuvardan klinik uygulamaya geçişi hızlandırır. Özetle mekanik biyomimikri, yüksek gözeneklilik, parametrik uyarlanabilirlik ve katkısız üretimin entegrasyonu, bu kafes yapılarını ortopedik ve spinal implant tasarımı için yeni nesil bir çözüm haline getirmektedir. Bu çalışmalar hem mekanik hem de biyolojik talepleri aynı anda karşılayarak, geleneksel implantların temel sınırlamalarının üstesinden gelir ve daha dayanıklı, kişiselleştirilmiş ve rejeneratif klinik sonuçların önünü açacağı düşünülmektedir (Meena ve ark., 2021).

5.2.2. Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapıların sonuçları

Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapılarla ilgili deneysel verilerin analizi, SEA simülasyonları ve polar YMK kafesin Gibson-Ashby katsayıları, parametrik genetik tasarımla birleştirilerek kafes topolojisinin mekanik performansı nasıl etkilediğine dair önemli bir anlayış elde edilmiştir.

Yapılan çalışmada YMK yapılar arasında %50,31'lik en yüksek bağıl yoğunluğa ve $n/m \approx 1,1 - 1,2$ Gibson-Ashby üslerine sahip olan YMK-Core, 168,1 MPa'lık en yüksek elastik modülüne, 13,41 MPa'lık plato gerilimine ve 14,96 MJ/m³ enerji emilimine ulaşarak yük taşıyan spinal veya ortopedik implantlar için potansiyelini doğrulamaktadır. %44,5'lik bağıl yoğunluk ile YMK-Petal yapısı, 11,25

MPa'lık bir plato gerilimi ve pürüzsüz kavisli eleman deformasyonu yoluyla 12,72 MJ/m³'lük bir enerji emilimini bir araya getirerek, darbe emici veya şok emici implant geometrileri için idealdir. YMK-Mesh ve YMK-Ring, Gibson-Ashby oranları $n/m \approx 1,0$ ile hibrit bir deformasyon rejimini gösteren dengeli bir mekanik performans sunmaktadır (Oymak ve ark., 2026).

Aynı çalışmada YMK-Leaf, en düşük bağıl yoğunluk (%30,75) ve $n/m \approx 0,9$ üs değerleriyle eğilme baskın bir davranış sergilemiştir. Düşük elastik modül (63,4 MPa) ve plato gerilimi (4,68 MPa) sergilemesine rağmen, yüksek sünekliği ve düşük gerilim iletimi, onu yumuşak doku-implant arayüz bölgeleri veya yastıklama biyomedikal katmanları için ideal hale getirmektedir. YMK-Ring, YMK-Stack'dan biraz daha düşük bir bağıl yoğunluğa sahip olsa da, daha yüksek elastik modül ve plato gerilimi elde etmiş ve bu da birim yoğunluk başına daha iyi sertlik ve yük taşıma verimliliğini göstermiştir. Elastik modül simülasyonu hata yüzdeleri en fazla %8,2 olarak bulunmuştur. Plato gerilimi simülasyonları, tüm hataların %6,5'in altına düşmesiyle daha da yüksek doğruluk göstermektedir. Gibson-Ashby üslerine ($n/m \approx 1$) sahip gerilmenin baskın olduğu tasarımlar (YMK-Core, Mesh, Petal, Ring) gelişmiş yük taşıma verimliliği sunmuştur. (Oymak ve ark., 2026).

YMK-Mesh, hibrit bir mekanik sistem olduğu için ayarlanabilir çökmeye izin veren, eğilme-hakim plastisiteye sahip gerilme benzeri elastikiyet göstermiştir. Performans, yoğunluktan ziyade topolojiden etkilenmiştir. Benzer yoğunluklarda gerilmenin baskın olduğu kafesler, eğilmenin baskın olduğu kafeslerden daha iyi performans sergilemiştir.

5.3. HAp katkılı SLA ile Üretilen Genetik Algoritmalarla Parametrik Modellemeli Polar YMK Latis Yapıların Bulguları

Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapıların üretiminde öncelikle biyo malzeme olarak saf reçine ile, daha sonra belli oranlarda HAp katılarak üretilen ürünlere basma testi uygulanmıştır. Şekil 5.12'de görüldüğü gibi basma testinde saf reçine ile üretilen latis yapı eğri, daha stabil ve sürekli artış göstermiştir. Bu ürün yapı olarak, sünek davranış sergileyerek yüksek uzama değerlerine kadar deformasyona uğramıştır. Malzemenin gerilme artışı dengeli olup, latis yapının elastik-plastik geçişi daha kontrollü gerçekleşerek, 10 mm sıkışmada 100 MPa basma gerilimine ulaşmıştır.

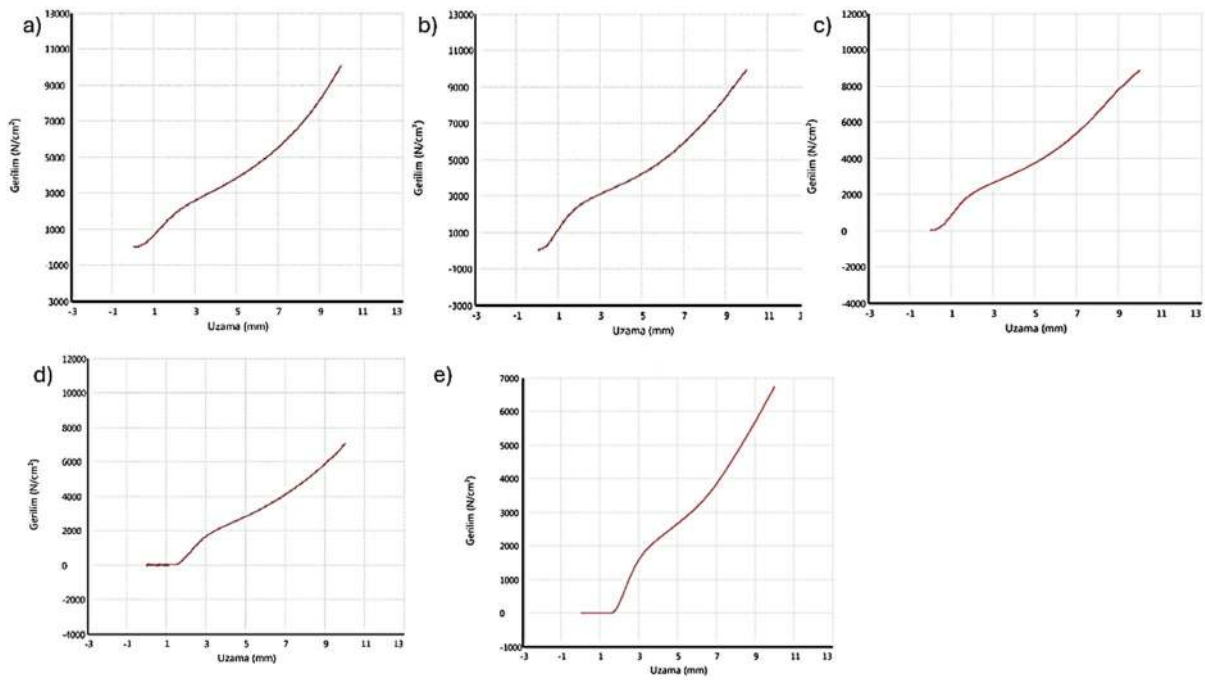
Basma testinde %0,5 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin düşük oranlı HAp katkısı, yapının rijitliğini artırdığını göstermiştir. Malzemedeki eğrinin başlangıç bölgesindeki gerilme artışı saf reçineye göre daha belirgin olup mekanik dayanım artarken süneklik büyük ölçüde korunmuştur. 10 mm sıkışmada %0,5 HAp katkılı numune 100 MPa değerini korumuştur. Yapıya eklenen az miktardaki HAp, malzemenin basma altındaki mukavemetini olumsuz etkilememiştir.

Basma testinde %1 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemede dengeli mekanik davranış gözlemlenmiştir. Üretilen malzemenin gerilme taşıma kapasitesi yüksek olup deformasyon boyunca

kararlı bir artış göstermiştir. Bu oran, rijitlik ve enerji absorpsiyonu açısından optimum bölge olarak değerlendirilebilir. 10 mm sıkıştırmada basma direnci 90 MPa seviyesine inmiştir.

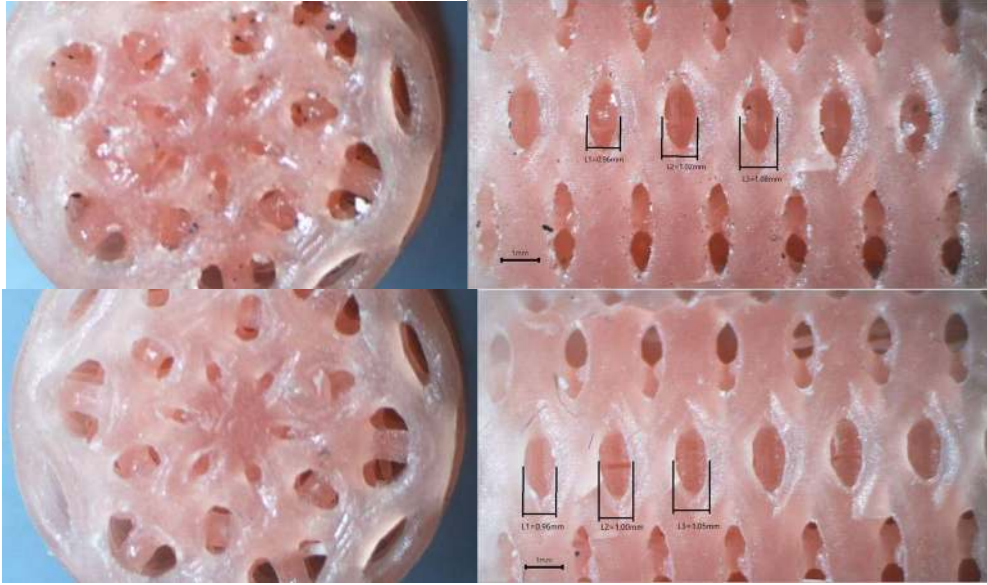
Basma testinde %1,5 HAp katkılı reçine ile elde edilen üründe, yapı daha rijit davranış sergilemiş ancak deformasyon kapasitesi azalmıştır. Malzemedeki gerilme artışı devam etse de eğrinin daha erken sertleştiği görülmüştür. Bu durum seramik fazın artmasıyla kırılmalık eğiliminin başladığını göstermiş, 10 mm sıkıştırmada basma direnci 71 MPa seviyesine gerilemiştir.

Basma testinde %3 en yüksek HAp katkılı reçine ile üretilen üründe, başlangıç rijitliği artsa da toplam gerilme kapasitesi düşmüştür. Eğrinin daha keskin yükselmesi ve düşük maksimum gerilme değeri, partikül aglomerasyonu ve gevrek davranışın arttığını göstermiştir. Malzemedeki yüksek HAp oranı ışık geçirgenliğini azaltarak baskı kalitesini ve katman bağlanmasını da olumsuz etkilemiştir. En yüksek katkıda basma gerilimi 67 MPa seviyesine kadar düşmüştür. Reçine sistemlerinde katkı miktarının artmasının mekanik davranışı önemli ölçüde değiştirdiği ifade edilmektedir (Aldabib ve Ishak, 2020).



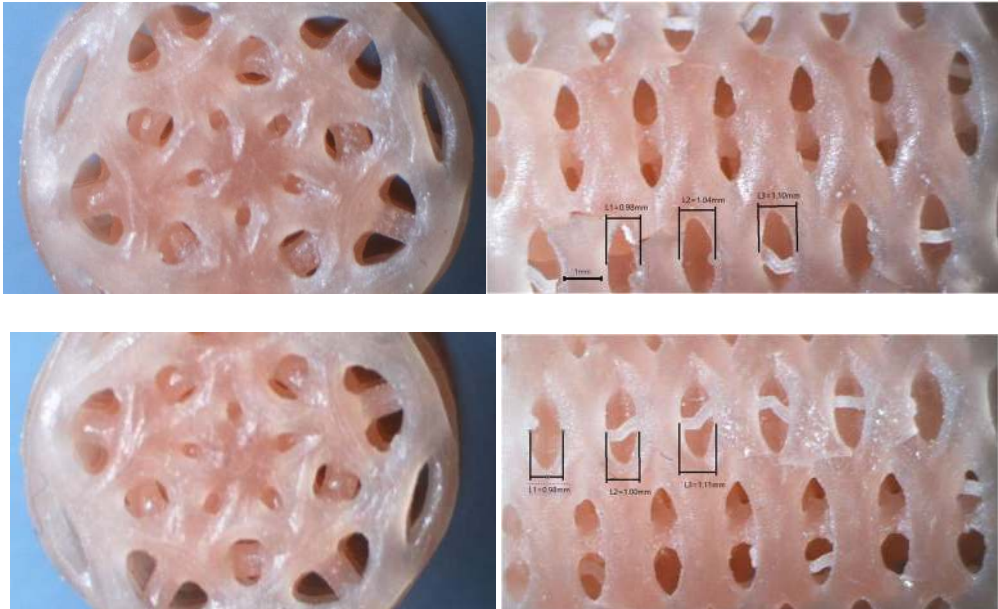
Şekil 5.12. SLA ile üretilmiş YMK-Core'a basma testi sonuçları a) saf reçine b) %0,5 HAp katkılı c) %1 HAp katkılı d) %1,5 HAp katkılı e) %3 HAp katkılı

Saf reçine ile elde edilen malzemenin basma testi sonucunda oluşan gözenek boyutları 0,96mm ve 1,08mm olarak ölçülmüştür. Gözenekler arasında %12,5 değişim tespit edilmiş, reçine ile beraber %0,5 HAp katkılı malzemede ise gözenek boyutları 0,96mm ve 1,05mm olarak gözlemlenmiştir. Gözenekler arasında %9 değişim oluşmuştur. Bu durum, düşük oranlı HAp katkısının gözenek yapısında daha homojen bir dağılım sağladığını göstermektedir. Bu değerler şekil 5.13'de gösterilmiştir.



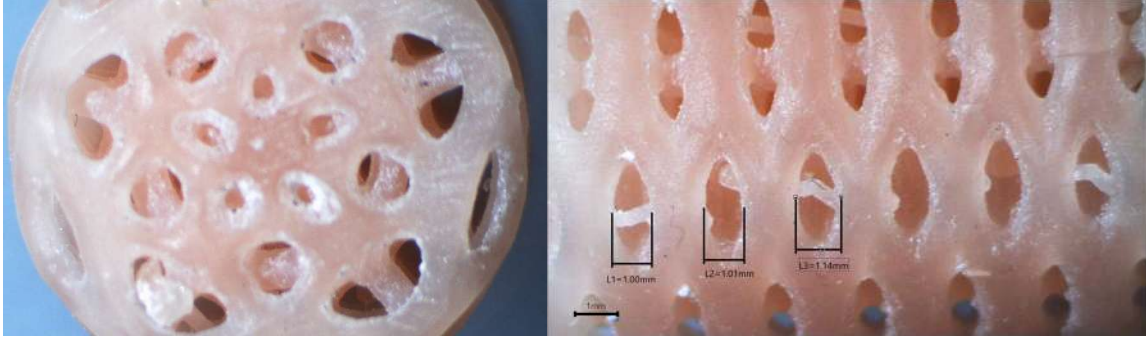
Şekil 5.13. Saf reçine ve %0.5 HAp katkılı reçine ile üretilen ürünler basma sonucunda gözenek boyutları

%1 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin basma testi sonucunda oluşan gözenek boyutları 0,98mm ve 1,10mm olarak ölçülmüştür. Gözenekler arasında boyut farkı %12,2'dir. %1,5 HAp katkılı reçine ile üretilen üründe ise gözenek boyutları 0,98 ve 1,11mm olarak ölçülmüştür. Gözenekler arasındaki değişim %13,2'dir. Bu sonuçlar, HAp katkısının belirli oranlarda yapısal düzenliliği artırdığını göstermektedir. Bu değerler Şekil 5.14'de gösterilmiştir.



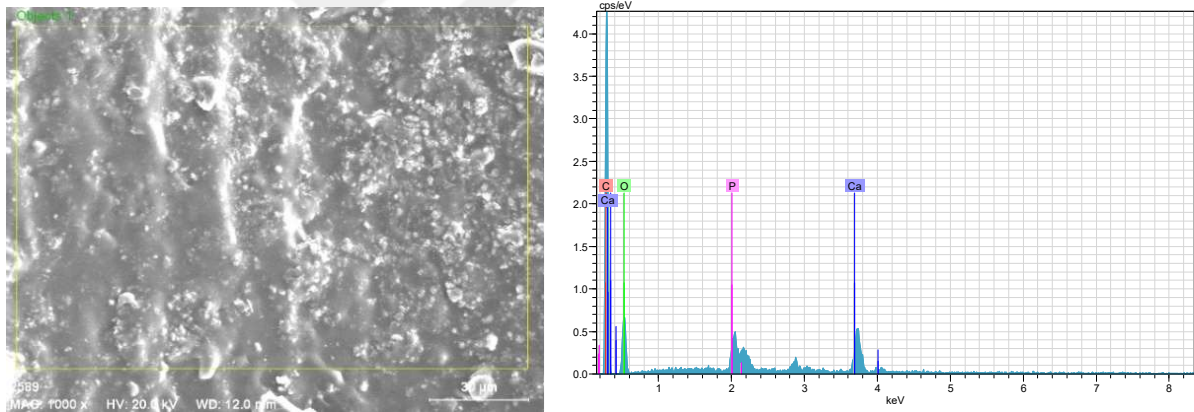
Şekil 5.14. %1 ve %1.5 HAp katkılı reçine ile üretilen ürünlerin basma testi sonucundaki gözenek boyutları

Basma testi sonucunda %3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemede oluşan gözenek boyutları 1mm ve 1,14 mm olarak ölçülmüştür. Gözenekler arasındaki boyut değişimi %14'tür. Belirtilen değerler Şekil 5.15'da gösterilmiştir. Bu sonuç, yüksek HAp içeriğinin reçine matrisi içerisinde aglomerasyon oluşturabileceğini ve yapısal homojenliği olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir.



Şekil 5.15. %3 HAp katkılı reçine ile üretilen ürünün basma testi sonucunda gözenek boyutları

EDS analizi sonucunda ortaya çıkan görüntü ve malzemenin içeriği ile ilgili değerler Şekil 5.16'de verilmektedir.



Şekil 5.16. %3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin görüntü ve değerler grafiği.

Reçine ile üretilen %3 HAp katkılı malzemenin iç yapısı ile ilgili değerler Tablo 5.3'de bütünüyle gösterilmiştir. EDS analizi sonuçlarına göre numunenin temel olarak karbon (C) ve oksijen (O) elementlerinden oluştuğu görülmektedir. Karbon oranı ağırlıkça %44,85 ve atomik olarak %53,81 iken, oksijen oranı ağırlıkça %48,04 ve atomik olarak %43,26 olarak belirlenmiştir. Bu durum, analiz edilen yapının organik esaslı reçine matrisi içerdiğini göstermektedir.

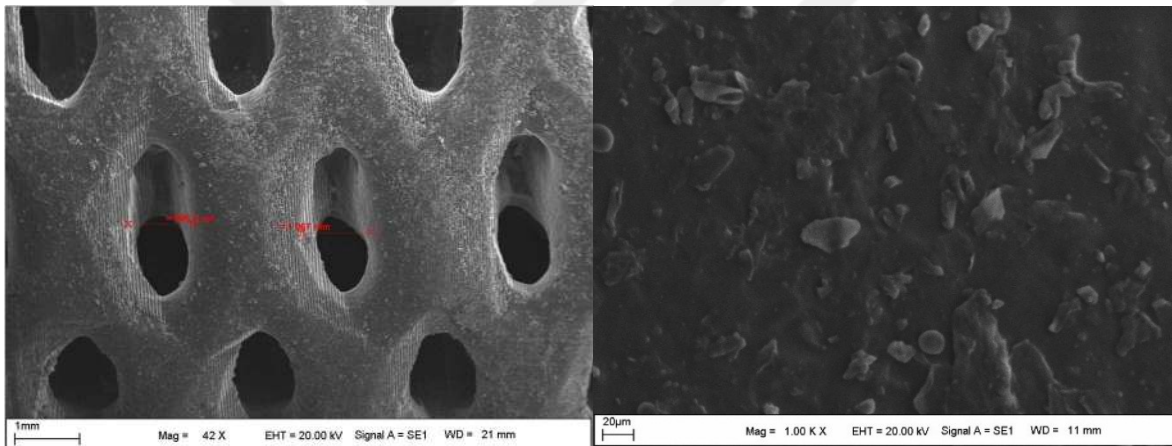
Numunede kalsiyum (Ca) elementi ağırlıkça %3,61 ve fosfor elementi ağırlıkça (P) %3,49 oranında tespit edilmiştir. Ca elementinin varlığı, yapıya hidroksiapatit (HAp) katkısının başarıyla dahil edildiğini göstermektedir. Atomik yüzde olarak Ca miktarının düşük olması, HAp katkısının reçine matrisi içerisinde dağılmış halde bulunduğunu ifade etmektedir. EDS sonuçları genel olarak

değerlendirildiğinde, HAp katkısının reçine yapı içerisinde başarıyla dağıldığı ve SEM/EDS analizlerinin biyokompozit yapının kimyasal içeriğini doğruladığı ifade edilebilir.

Tablo 5.3. %3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin iç yapısı

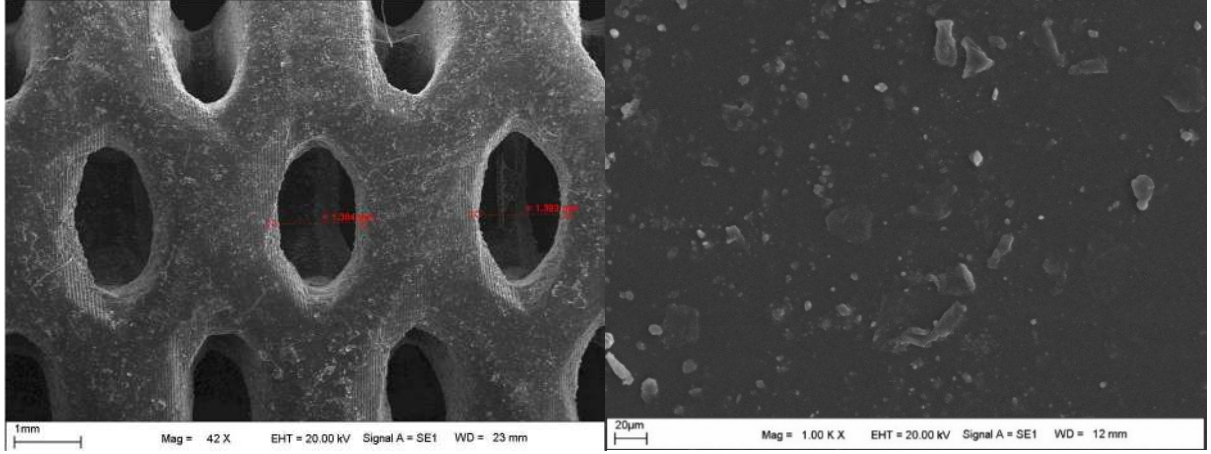
El AN	Series	unn. C [wt.-%]	Norm.C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
C 6	K-series	44,85	44,85	53,81	15,6
Ca 20	K-series	3,61	3,61	1,30	0,2
P 15	K-series	3,49	3,49	1,63	0,2
O 8	K-series	48,04	48,04	43,26	17,0
Total		100	100	100	

Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK Latis Yapılardan saf reçine ile ve belli oranlarda HAp katılarak üretilen malzemelerin SEM analizleri yapılmıştır. Şekil 5.17’deki analizde saf reçine ile üretilen ürünün gözenek boyutları 0,996 ve 1,067 mm olarak ölçülmüştür. Gözenekler arasında %7,1 oranında boyut değişimi gözlemlenmiştir.



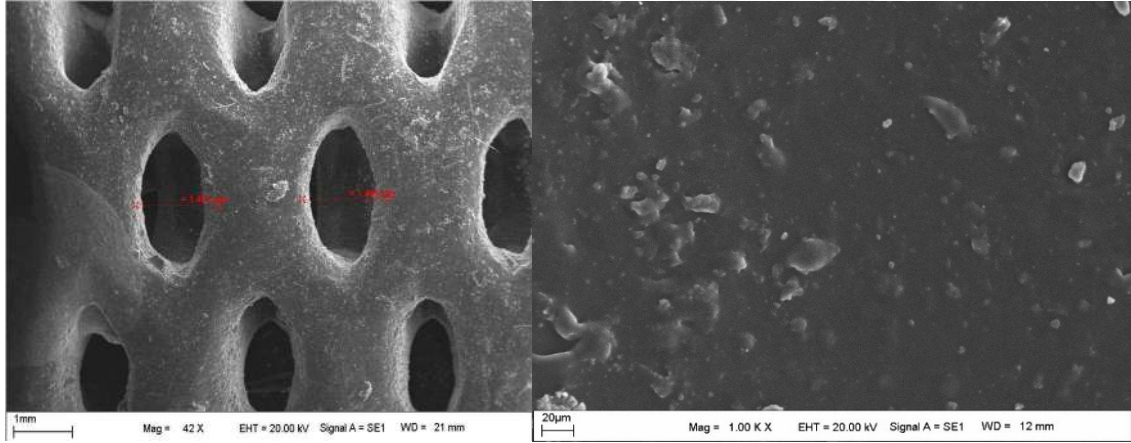
Şekil 5.17. Saf reçine ile elde edilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.

SEM analizinde %0,5 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemede, gözenek boyuttu 1,384 ve 1,393 mm olarak Şekil 5.18’de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Malzemenin gözenekler arasında %0,65 oranında boyut değişimi gözlemlenmiştir.



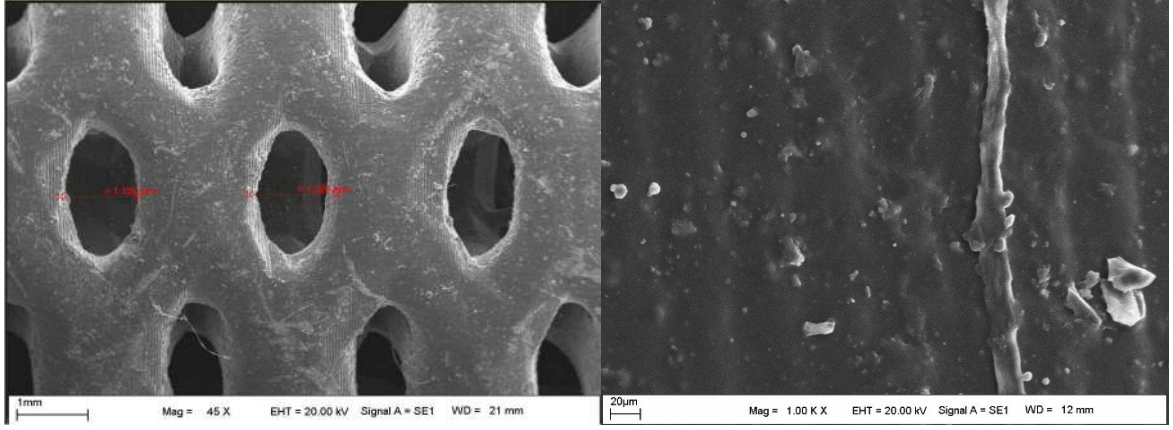
Şekil 5.18. %0.5 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.

SEM analizinde %1 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemedeki gözenek boyutları, Şekil 5.19’de görüldüğü gibi 1,401 ve 1,446 olarak ölçülmüştür. Malzemenin gözenekleri arasında %3,2 boyut değişimi gözlemlenmiştir.



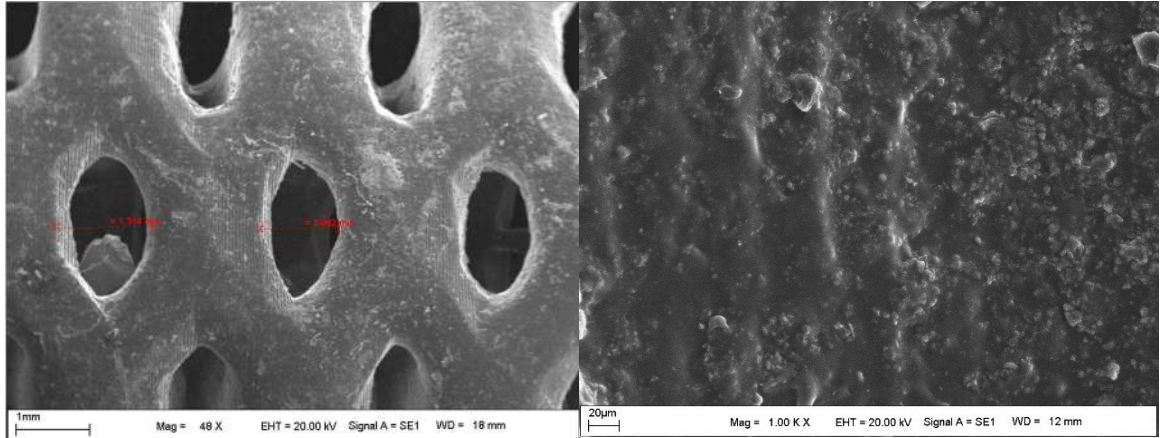
Şekil 5.19. %1 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.

SEM analizinde %1,5 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemedeki gözenek boyutları 1,105 ve 1,228 mm olarak ölçülmüştür. Malzemenin 1000x büyütmedeki iç yapısında HAp dağılımı gözükmemektedir. Gözenekler arasında ise %11,1 oranında boyut değişimi Şekil 5.20’de görüldüğü gibi ölçülmüştür.



Şekil 5.20. %1.5 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.

SEM analizinde % 3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemede gözenek boyutları 1,314 ve 1,092 mm olarak Şekil 5.21’de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Malzemenin 1000x büyütmede iç yapısında HAp dağılımı gözlemlenmiştir. Gözenekler arasında ise %20 oranında boyut değişimi izlenmiştir.



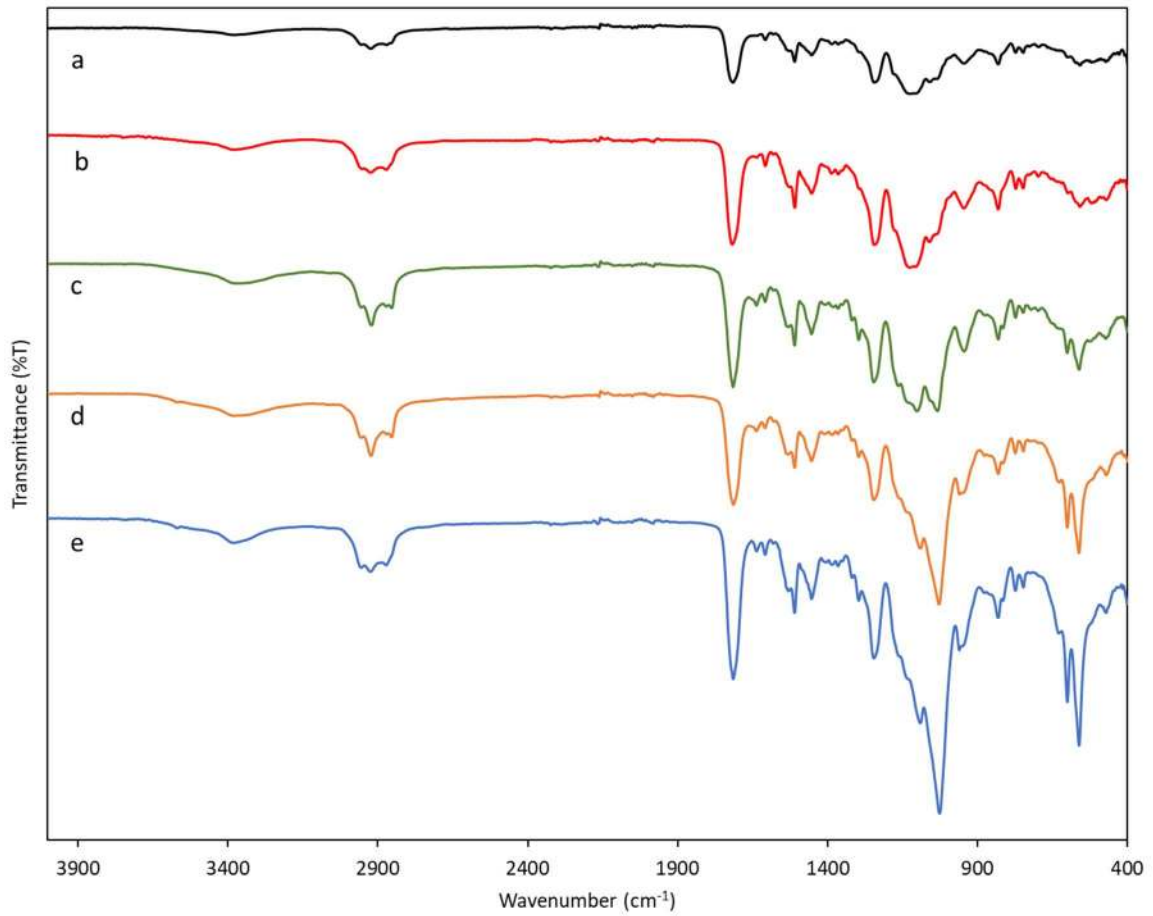
Şekil 5.21. %3 HAp katkılı reçine ile üretilen malzemenin gözenek boyutu ve 1000x büyütmedeki iç yapısı.

5.3.1. HAp katkılı SLA ile üretilen YMK latis yapının FTIR analizi

HAp katkılı SLA ile üretilen genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK bir latis yapının FTIR analizleri yapılmıştır. Analizlerin sonuçları şöyledir: Saf reçineye ait olan a spektrumunda, yaklaşık $2950-2850\text{ cm}^{-1}$ aralığında alifatik C-H gerilme titreşimleri, 1720 cm^{-1} civarında ester gruplarına ait karakteristik C=O piki ve $1450-1150\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde C-O ve C-O-C bağlarına ait titreşimler görülmüştür. HAp ilavesiyle birlikte (b, c, d ve e spektrumları) reçineye ait bu karakteristik bantlar korunmuş, ancak bazı piklerin şiddetlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu durum HAp katkısının

reçinenin temel kimyasal yapısını değiştirmediğini, ancak matris içerisinde fiziksel ve kimyasal etkileşimler oluşturduğu şekil 5.22’de gösterilmektedir.

Özellikle HAp içeriği arttıkça 1090-1030 cm^{-1} , 960 cm^{-1} , 603 cm^{-1} ve 565 cm^{-1} civarında fosfat (PO_4^{3-}) gruplarına ait karakteristik bantların belirginleştiği görülmektedir. Bu bantlar HAp’ın yapısal olarak numune içerisinde başarıyla bulunduğunu doğrulamaktadır. En yüksek HAp oranına sahip olan e spektrumunda (%3 HAp) bu piklerin şiddeti belirgin şekilde artmış olup, HAp miktarındaki artışın FTIR sonuçlarıyla uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yaklaşık 3400 cm^{-1} bölgesindeki geniş bant ve 1630 cm^{-1} civarındaki pikler hidroksil grupları ve adsorbe su molekülleri ile ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak FTIR analizleri, HAp katkısının reçine matrisi içerisinde başarılı şekilde dağıldığını ve katkı oranı arttıkça hidroksiapatite özgü fosfat bantlarının daha belirgin hale geldiği şekil 5.22’de gösterilmektedir. Reçineye ait karakteristik piklerin korunması,üretim sürecinde yeni bir kimyasal faz oluşmadığını ve HAp’ın matrise takviye fazı olarak entegre olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durumda HAp katkısı, biyoyumluluğu artırırken reçinenin temel kimyasal yapısını koruduğunu göstermesi açısından önemlidir.



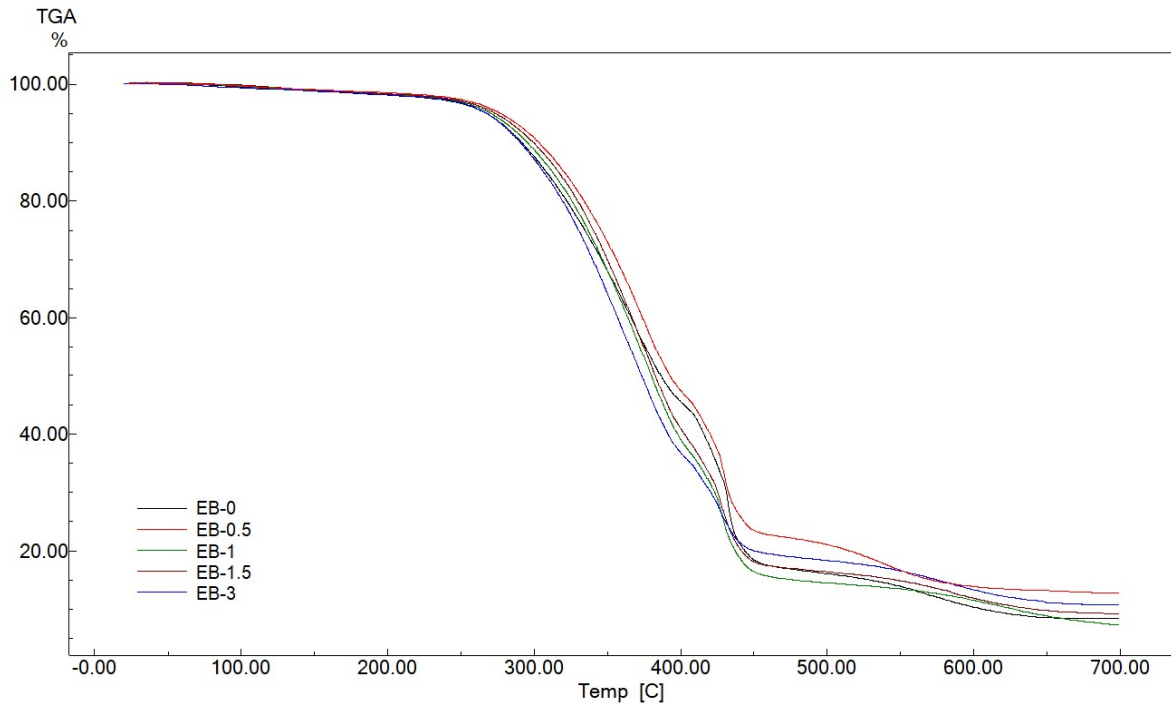
şekil 5.22. FTIR spektrumunda a) saf reçine b) %0.5 c) %1 d) %1.5 e) %3 HAp katkılı

Malzemenin TGA analizinde elde edilen veriler üç farklı boyutta değerlendirilmiştir. Bunlar giriş ve termal kararlılık öncesi, ana bozunma katkı etkisi, son aşama ve karbon kalıntısı şeklinde sıralanmaktadır. Analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

Giriş ve Termal Kararlılık Öncesi: Şekil 5.23'deki TGA eğrileri, saf epoksi reçine ile farklı oranlarda (%0,5, %1, %1,5, %3) HAp katkısı içeren numunelerin ısı kararlılığını göstermektedir. Oda sıcaklığından yaklaşık 250°C'ye kadar, tüm numunelerde nem veya uçucu bileşenlerin uzaklaşmasından kaynaklanan %2-4 civarında hafif bir kütle kaybı gözlemlenmiştir. Bu durum tüm karışımlarda benzer ve kararlı bir seyir izlemektedir.

Ana Bozunma ve Katkı Etkisi: 250°C ile 450°C arasındaki ana bozunma aşamasında polimer zincirleri kırılmakta ve keskin bir kütle kaybı yaşanmaktadır. Şekil 5.23'deki grafik incelendiğinde, düşük oranda eklenen %0,5 HAp katkısının ana eğriyi sağa kaydırarak termal kararlılığı belirgin şekilde artırdığı görülmüştür. Ancak katkı oranı %3'e ulaştığında, omuz noktası sola kaymakta ve malzeme daha düşük sıcaklıklarda bozunmaya başlamaktadır.

Son Aşama ve Karbon Kalıntısı: 450°C'den 700°C'ye uzanan son aşamada ise bozunma hızı yavaşlar ve eğriler nihai kül miktarına doğru düzleşir. En yüksek kalıntı miktarı, termal kararlılığı en iyi olan %0,5 HAp katkılı numunede (%13) elde edilmiştir. Şekil 5.23'de gösterilen bu durum, optimum seviyedeki katkının polimer matrisiyle güçlü bir etkileşim kurduğunu ortaya koymaktadır.

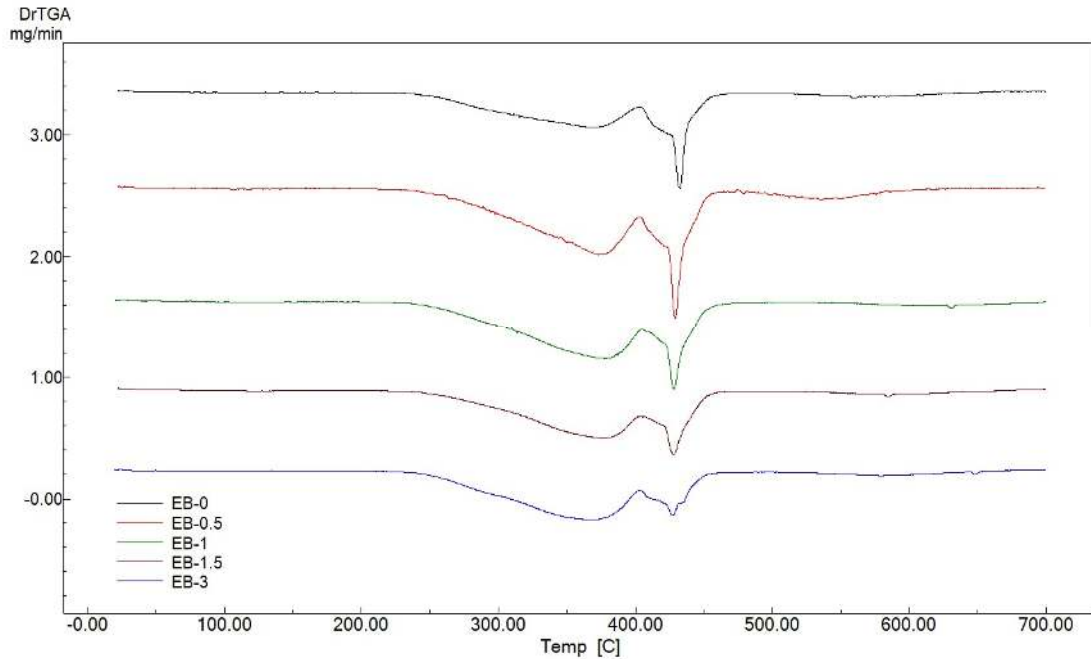


Şekil 5.23. TGA eğrileri

Malzemenin DTGA eğrileri incelendiğinde, Şekil 5.24’de tüm numunelerde ana bozunma olayının yaklaşık 420-450 °C sıcaklık aralığında gerçekleştiği görülmektedir. EB-0 (saf reçine) numunesi en keskin ve en yüksek bozunma pikine sahip olup, bu sıcaklık aralığında hızlı bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu durum, polimer matrisin temel termal ayrışmasının bu bölgede gerçekleştiğini göstermektedir.

HAp katkısı ilave edilen numunelerde (EB-0,5, EB-1, EB-1,5 ve EB-3) ana bozunma piki korunmakla birlikte, pik şiddetinde ve şeklinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Özellikle %0,5 ve %1 HAp katkılı numunelerde bozunma piki daha geniş bir karakter göstermekte, bu da termal ayrışmanın daha kontrollü gerçekleştiğini düşündürmektedir. HAp parçacıklarının polimer zincir hareketlerini sınırlandırması ve ısı transferine karşı bariyer etkisi oluşturması nedeniyle, bozunma hızında azalma meydana geldiği düşünülmektedir.

%1,5 HAp katkılı numunede ana bozunma piki daha belirgin olmakla birlikte, ayrışma sıcaklığının büyük ölçüde korunduğu görülmüştür. Bu durum, HAp katkısının yapıda homojen dağıldığını ve termal kararlılığı olumsuz etkilemediğini göstermektedir. %3 HAp katkılı numunede ise pik şeklindeki değişimler ve eğri karakterindeki farklılıklar, yüksek katkı oranlarında parçacık aglomerasyonlarının oluşabileceğini düşündürmektedir. Bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, HAp katkısının reçinenin bozunma mekanizmasını tamamen değiştirmede, ancak bozunma hızını ve termal kararlılığı etkileyerek özellikle düşük ve orta katkı oranlarında daha kontrollü bir termal davranış sağladığı ifade edilebilir.

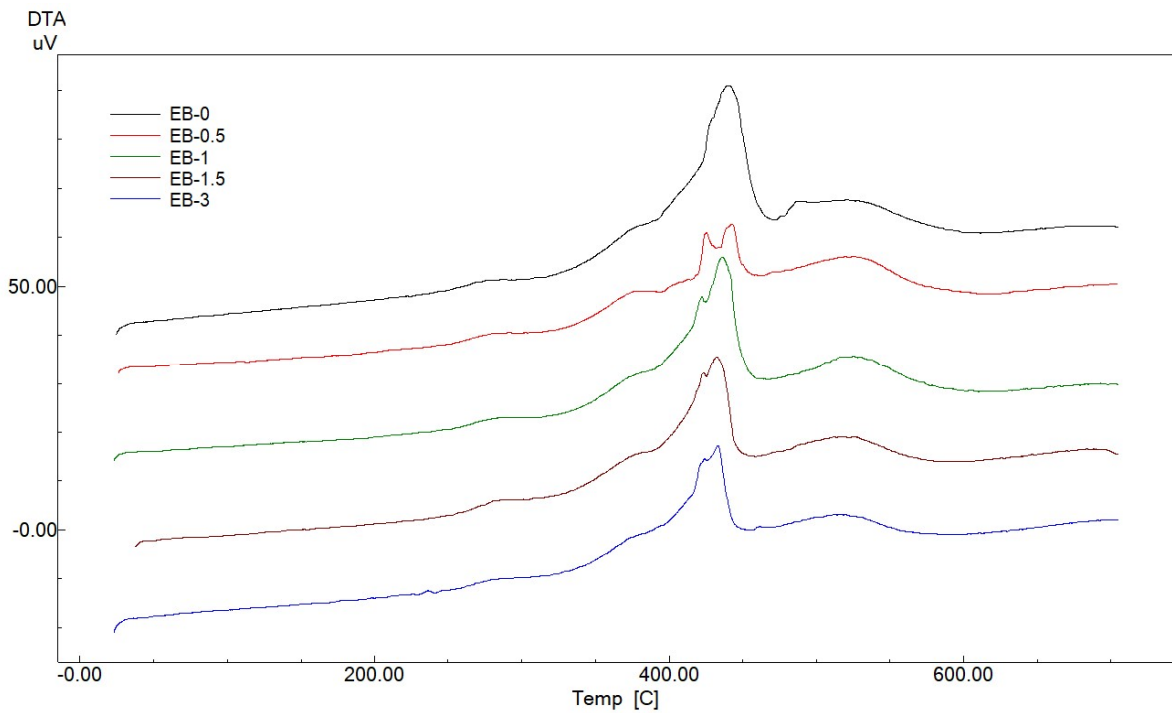


Şekil 5.24. DTGA eğrileri

Malzemenin DTA eğrileri incelendiğinde, Şekil 5.25’de görüldüğü gibi tüm numunelerde yaklaşık 380-460 °C aralığında belirgin bir termal olayın gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu bölge TGA ve DTGA analizlerinde gözlenen ana bozunma aşamasıyla uyumlu olup, polimer matrisin termal ayrışmasıyla ilişkilendirilebilir. Saf reçineye ait EB-0 numunesi en yüksek pik şiddetini göstermiştir. Bu durum, saf reçinede bozunma sırasında daha yüksek miktarda enerji değişimi meydana geldiğini ortaya koymaktadır.

HAp katkısının artmasıyla birlikte numunelerin pik yüksekliklerinde azalma gözlenmektedir. Özellikle EB-0,5 ve EB-1 numunelerinde ana termal geçiş korunurken, pik şiddetinin azalması HAp’in polimer matris içerisinde ısı bariyer görevi gördüğünü ve bozunma sürecini daha kontrollü hale getirdiğini düşündürmektedir. EB-1,5 numunesinde de benzer davranış gözlenmiş olup, termal olay daha geniş bir sıcaklık aralığına yayılmıştır.

En yüksek katkı oranına sahip EB-3 numunesinde ise ana pik önemli ölçüde küçülmüş ve eğri daha düşük enerji değişimi göstermiştir. Bu durum, yüksek HAp içeriğinin polimer miktarını azaltması ve kompozitin termal davranışını değiştirmesi ile açıklanabilir. Ayrıca 500-600 °C bölgesindeki ikincil geçişlerin katkı oranına bağlı olarak zayıfladığı görülmüştür. Genel olarak DTA sonuçları, HAp katkısının reçinenin temel bozunma mekanizmasını değiştirmediğini ancak enerji değişimini azaltarak termal kararlılığı iyileştirdiğini göstermiştir. En dengeli termal davranışın %0,5-1 HAp katkılı numunelerde elde edildiği söylenebilir.



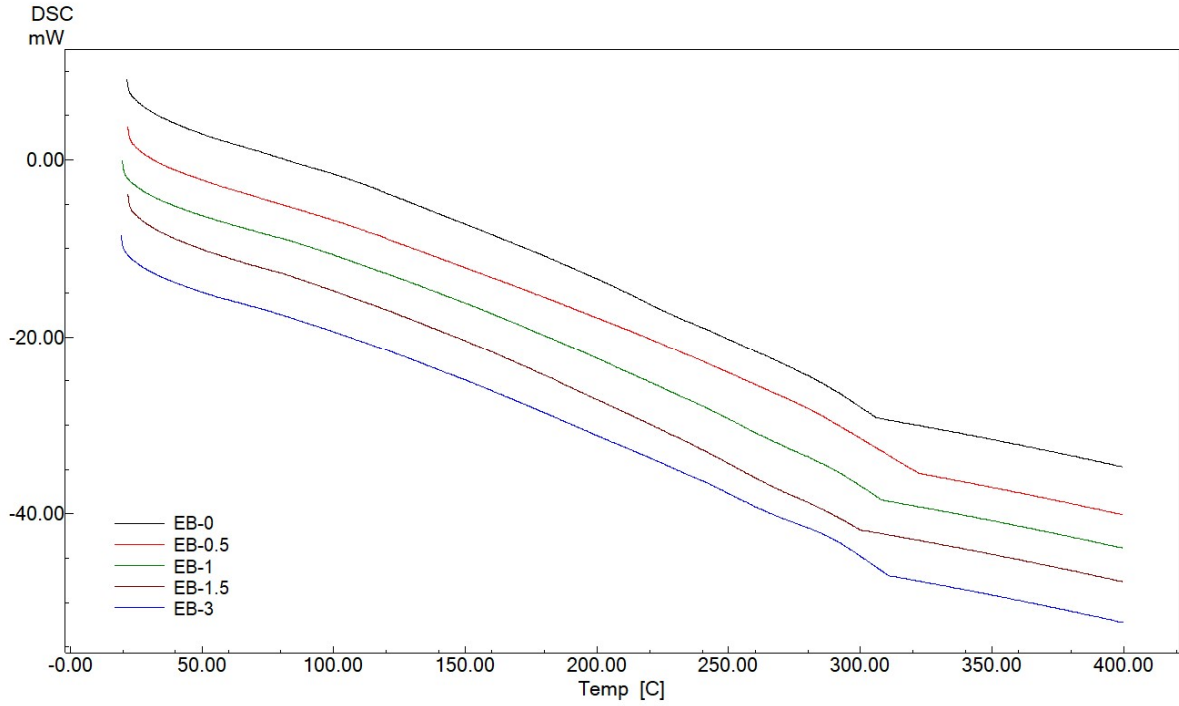
Şekil 5.25. DTA eğrileri

Malzemenin Şekil 5.26'de verilen DSC eğrileri, saf reçine (EB-0) ve farklı oranlarda HAp katkı reçine numunelerinin (EB-0,5, EB-1, EB-1,5 ve EB-3) sıcaklığa bağlı termal davranışlarını göstermektedir. Tüm numunelerde sıcaklık arttıkça ısı akışında düzenli bir azalma gözlemlenmiş, yaklaşık 290-320 °C aralığında belirgin bir termal geçiş bölgesi ortaya çıkmıştır. Bu bölge polimer matrisin termal bozunmasının başlaması ve zincir yapısındaki kırılmaların hızlanması ile ilişkilendirilebilir.

Saf reçineye ait EB-0 numunesi, tüm sıcaklık aralığında en yüksek DSC değerlerine sahip iken, termal geçiş bölgesini daha belirgin şekilde göstermektedir. HAp katkısının artmasıyla birlikte eğrilerin daha düşük DSC değerlerine kaydığı Şekil 5.26'de görülmektedir. Özellikle EB-3 numunesinde eğrinin daha aşağıda yer alması, kompozit yapının ısı kapasitesinde ve termal enerji depolama davranışında değişiklik meydana geldiğini göstermektedir. HAp parçacıklarının polimer zincir hareketlerini sınırlandırması ve matris içerisinde dolgu fazı olarak görev yapmasından dolayı ısı transfer mekanizmasının değiştiği düşünülmektedir.

Yaklaşık 300 °C civarında tüm numunelerde benzer bir geçiş gözlenmesi, HAp katkısının reçinenin temel bozunma mekanizmasını değiştirmediğini, ancak termal davranışın şiddetini etkilediğini göstermektedir. Özellikle %0,5 ve %1 HAp katkı numunelerin eğrileri daha düzenli bir karakter sergilerken, bu durum HAp'in matriste daha homojen dağıldığını ve termal kararlılığa olumlu katkı sağladığını düşündürmektedir. Buna karşılık %3 HAp katkı numunede eğrinin daha fazla sapma göstermesi, yüksek katkı oranlarında parçacık aglomerasyonu ve yapısal heterojenlik oluşabileceğine işaret etmektedir.

Genel olarak DSC sonuçları, hidroksiapatit katkısının reçinenin temel termal geçiş sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmediğini, ancak kompozitin termal davranışını modifiye ederek özellikle %0,5-1 HAp katkı oranlarında daha dengeli ve kararlı bir termal performans sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, TGA ve DTGA analizlerinde gözlenen termal kararlılık eğilimleriyle de uyumludur.



Şekil 5.26. DSC eğrileri

5.3.2. HAp katkılı SLA ile üretilen genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapıların sonuç ve tartışmaları

Genetik algoritmalarla parametrik modellemeli polar YMK latis yapılardan saf reçine ile ve belli oranlarda HAp katılarak üretilen malzemelerin SEM analizlerinde, gözenek boyutlarında farklılıklar tespit edilmiştir. Üretilen malzemelerin gözenekler arasında boyut değişimi gözlemlenmiştir. HAp katkısının artması ile gözenek boyutlarında ve gözenekler arasında değişim izlenmiştir. Genel olarak sonuçlar, düşük HAp katkı oranlarının (%0,5-%1) daha homojen ve düzenli gözenek yapısı oluşturduğunu, yüksek katkı oranlarının ise parçacık aglomerasyonu ve gözenek boyutu farklılıklarını artırarak mikroyapısal düzensizliklere yol açabileceğini göstermektedir. Bu nedenle gözenek homojenliği açısından optimum katkı oranının %0,5-%1 HAp aralığında olduğu söylenebilir.

Malzemenin basma testi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, HAp katkısının gözenek boyutu, dağılım üzerinde belirgin bir etki oluşturduğu görülmektedir. En düşük değişim %0,5 HAp katkılı numunede (%9) elde edilerek en homojen yapı bu oranda sağlanmıştır. Saf reçineye kıyasla HAp katkısı belirli bir seviyeye kadar (özellikle %0,5) yapısal düzenliliği artırmıştır. Ancak %1 ve üzeri katkı oranlarında gözenekler arası değişimin tekrar arttığı (%12,2-14) görülmektedir. Bu durum, yüksek HAp oranlarının matris içinde homojen dağılımı zorlaştırarak mikroyapısal düzensizlik oluşturduğunu göstermektedir. Genel olarak optimum gözenek homojenliği için düşük HAp oranlarının daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayrıca SLA üretim yönteminin yüksek hassasiyetli üretim kabiliyeti sayesinde, parametrik olarak oluşturulan polar YMK geometrilerinin başarılı şekilde üretilebildiği gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde HAp parçacıklarının yapı içerisinde homojen dağılımı, biyomalzeme açısından uygun bir iç mimari oluşturduğunu göstermektedir. Genetik algoritma destekli parametrik modelleme yaklaşımı, gözenek boyutu ve yapısal yoğunluk gibi parametrelerin optimize edilmesine olanak sağlayarak, kemik doku benzeri kontrollü bir latis yapı elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu nedenle geliştirilen polar YMK yapının, gelecekte biyomedikal implant uygulamaları için potansiyel taşıdığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada ayrıca FTIR analizi ile üretilen numunelerin kimyasal bağ yapıları incelenmiş, hidroksiapatit katkısının reçine matrisi üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve karakteristik pik değişimleri analiz edilmiştir.

FTIR analizleri, hidroksiapatit (HAp) katkısının reçine matrisi içerisine başarılı bir şekilde entegre edildiğini ve kompozit yapının kimyasal özelliklerini etkilediğini ortaya koymuştur. Saf reçine ve HAp katkılı numunelerde reçineye ait karakteristik C-H, C=O ve C-O-C bantlarının korunması, üretim sürecinde polimer matrisin temel kimyasal yapısının değişmediğini göstermiştir. Ayrıca analizler, HAp katkısının artmasıyla birlikte $1090-1030\text{ cm}^{-1}$, 960 cm^{-1} , 603 cm^{-1} ve 565 cm^{-1} bölgelerinde fosfat (PO_4^{3-}) gruplarına ait karakteristik piklerin belirginleşmesi, hidroksiapatitin yapı içerisinde başarıyla dağıldığını doğrulamıştır. Özellikle %0,5 ve %1 HAp katkılı numunelerde reçine ve HAp fazları arasında daha dengeli bir etkileşim gözlenirken, %3 HAp katkılı numunede fosfat bantlarının şiddetindeki artış, yüksek HAp içeriğini göstermiştir. Genel olarak FTIR analiz sonuçları, HAp katkısının reçinenin temel kimyasal yapısını bozmadan kompozit yapıya başarıyla dahil edildiğini ve biyomedikal uygulamalar açısından gerekli kimyasal bütünlüğün korunduğunu ortaya koymuştur.

6. SONUÇ

6.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada biyomimetik yaklaşım temel alınarak geliştirilen HMK, YMK ve elmas gözenek yapılı lomber interbody füzyon kafesleri, sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Ayrıca YMK silindirik yapılar parametrik modelleme, genetik algoritma optimizasyonu ve deneysel çalışmalarla kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, gözenekli yapıların omurga implantlarında gerilme dağılımını düzenlediğini, stres koruma etkisini azalttığını ve kemik büyümesini destekleyen biyomekanik bir ortam oluşturduğunu göstermiştir. Özellikle YMK yapılar, düşük deformasyon değerleri ve kontrollü gerilme dağılımları sayesinde diğer topolojilere göre daha dengeli bir mekanik performans sergilemiştir. Kafes yapıların doğrusal olmayan elastik davranış göstermesi nedeniyle mekanik performanslarının büyük ölçüde topolojiye bağlı olduğu ortaya konmuştur.

YMK yapılar arasında özellikle YMK-Core tasarımı, %50,31 bağıl yoğunluk ve $n/m \approx 1,1-1,2$ Gibson–Ashby üs değerleri ile en yüksek elastik modül (168,1 MPa), plato gerilimi (13,41 MPa) ve enerji absorpsiyonu (14,96 MJ/m³) değerlerine ulaşmıştır. Bu durum, YMK-Core yapısının yük taşıyan spinal implant uygulamalarında yüksek rijitlik, dayanım ve enerji sönümleme kapasitesi sunduğunu göstermektedir. Gerilmenin strutlar boyunca daha homojen dağılması sayesinde lokal gerilme yığılmaları azaltılmış, yük taşıma verimliliği artırılmıştır. Özellikle gerilme baskın davranış gösteren YMK-Core, YMK-Mesh, YMK-Petal ve YMK-Ring yapılarının, eğilme baskın latis yapılara kıyasla daha yüksek mekanik performans sağladığı belirlenmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş latis yapıların enerji absorpsiyon kapasitesini artırdığı ve biyomedikal uygulamalarda avantaj sağladığını literatür de desteklemektedir.

YMK-Petal yapısı, kavisli strut geometrileri sayesinde kontrollü deformasyon davranışı göstermiş ve 12,72 MJ/m³ enerji absorpsiyonu ile darbe emici implant tasarımları için uygun bulunmuştur. YMK-Mesh ve YMK-Ring yapıları ise hibrit deformasyon mekanizması sayesinde rijitlik ve süneklik arasında dengeli bir davranış sergilemiştir. Buna karşın YMK-Leaf yapısı düşük bağıl yoğunluk (%30,75) ve eğilme baskın davranışı nedeniyle daha düşük elastik modül göstermesine rağmen, yüksek sünekliği sayesinde yumuşak doku geçiş bölgeleri için avantaj sağlamıştır. Bu sonuçlar, implant performansının yalnızca yoğunluğa değil, doğrudan latis topolojisine bağlı olduğunu göstermektedir. Benzer yoğunluk değerlerinde de gerilme baskın YMK yapıların, eğilme baskın yapılardan daha üstün performans göstermesi, parametrik polar latis tasarım yaklaşımının önemini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, parametrik genetik algoritma destekli polar YMK latis yapılarının hafiflik, yüksek enerji absorpsiyonu, optimize gerilme dağılımı ve biyomekanik uyumluluk özellikleri sayesinde geleceğin hasta-özel spinal ve ortopedik implant uygulamaları için yüksek potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmadaki diğer bir deneysel üretim aşamasında ise biyomimetik polar YMK latis yapılar, hidroksiapatit (HAp) katkılı denture pembe reçine kullanılarak Anyubic Photon Mono M7 Pro ile başarılı şekilde üretilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde kritik gerilme bölgelerinin silindirik alanlarda yoğunlaşması nedeniyle, deneysel prototipleme silindirik geometri üzerinden gerçekleştirilmiştir. %0,5 ve %1 HAp katkılı numunelerde rijitlik ve gerilme taşıma kapasitesinin belirgin şekilde arttığı, ancak %1,5 ve %3 HAp katkılı numunelerde kırılma davranışının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 2,00 saniye pozlama süresi ve 9 dakikalık UV kürleme işleminin latis yapılar için yeterli üretim kalitesi ve mekanik stabilite sağladığı belirlenmiştir.

Malzeme ile ilgili yapılan FTIR analizinde HAp katkısının yapıya başarıyla entegre olduğu (PO_4^{3-} pikleri ile) gösterilmiştir. Termal analizler ile ilgili bütün grafikleri (TGA, DTG, DTA ve DSC) bir araya getirdiğimizde ortaya çıkan bütünsel tablo şu şekilde özetlenebilir: TGA ve DTG’da düşük HAp katkısının (%0,5) polimer zincirlerini kısıtlayarak termal kararlılığı maksimuma çıkardığı, yüksek HAp katkısının (%1,5 - %3) ise muhtemel topaklanmalardan dolayı bozunmayı biraz öne çektiği gözlemlenmiştir. DTA ve DSC’de bozunmanın $\sim 300^\circ\text{C}$ ’de endotermik bir kırılma (DSC) ile başladığı ve ardından $400-450^\circ\text{C}$ arasında, ana zincirlerin yanmasıyla çok şiddetli eksotermik (DTA) tepkimelere dönüştüğü; HAp miktarının artmasının bu ısısal salınımları sönmülediği ortaya konmuştur.

6.2.Öneriler

Bu çalışma kapsamında geliştirilen biyomimetik polar YMK latis yapılarının gelecekte daha geniş kapsamlı biyomekanik analizlerle desteklenmesi önerilmektedir. Özellikle omurga implantlarının gerçek fizyolojik koşullar altında maruz kaldığı tekrarlı yükleme, yorulma davranışı, titreşim ve uzun dönem deformasyon etkilerinin incelenmesi, implantların klinik dayanımını daha güvenilir şekilde ortaya koyacaktır. Bunun yanında farklı bağıl yoğunluk, strut kalınlığı ve hücresel topoloji kombinasyonlarının parametrik optimizasyon ile değerlendirilmesi, mekanik performansın daha ileri seviyeye taşınmasına katkı sağlayabilir.

Gelecek çalışmalarda yalnızca mekanik performans değil, aynı zamanda biyolojik performans kriterlerinin de detaylı şekilde incelenmesi önem taşımaktadır. Hidroksiapatit katkılı reçinelerin osteointegrasyon, hücre proliferasyonu ve biyouyumluluk üzerindeki etkilerinin in-vitro ve in-vivo deneylerle araştırılması önerilmektedir. Ayrıca implant yüzey morfolojisinin kemik büyümesine etkisi

incelenerek biyomimetik yüzey tasarımları geliştirilebilir. Böylece hasta-özel implantların kemik doku ile daha güçlü biyolojik bağ oluşturmaları sağlanabilir.

Bunun yanında Eriyik filametli üretim, Stereolitografi ve metal eklemeli imalat gibi farklı üretim teknolojilerinin biyomimetik latis yapılar üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Özellikle üretim hassasiyeti, yüzey kalitesi, mikro gözeneklilik ve mekanik dayanım arasındaki ilişkinin detaylı incelenmesi, spinal implant üretim süreçlerinin optimize edilmesine katkı sağlayacaktır. Yapay zekâ destekli tasarım algoritmaları ve hasta görüntüleme verilerinin parametrik modelleme sistemleriyle entegre edilmesi sayesinde gelecekte tamamen kişiselleştirilmiş spinal implantların geliştirilmesi mümkün olabilir.

PLA ve HAp katkılı biyoreçine esaslı latis yapıların biyobozunurluk davranışlarının daha kapsamlı şekilde değerlendirilmesi için gelecek çalışmalarda uzun süreli in-vitro ve in-vivo testlerin yapılması önerilmektedir. Özellikle simüle edilmiş vücut sıvısı (SBF) ve fosfat tamponlu salin (PBS) ortamlarında kütle kaybı, mekanik dayanım azalması ve yüzey morfolojisindeki değişimlerin zamana bağlı olarak incelenmesi, malzemenin klinik kullanım potansiyelini daha net ortaya koyacaktır.

Ayrıca malzemedeki HAp katkı oranının biyobozunma kinetiği üzerindeki etkisinin detaylı olarak araştırılması önemlidir. Düşük ve orta seviyedeki HAp katkıları (örneğin %0,5–1) yapısal kararlılığı artırırken, yüksek katkı oranlarının bozunma hızını ve mikroyapısal bütünlüğü olumsuz etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanında latis topolojisinin biyobozunma sürecine etkisi de karşılaştırmalı olarak analiz edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Afridi, A., Al Rashid, A. ve Koç, M.** (2024) "Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges", *Bioprinting*, 43, e00360.
- Aldabib, J. M. ve Ishak, Z. A. M.** (2020) "Effect of hydroxyapatite filler concentration on mechanical properties of poly (methyl methacrylate) denture base", *SN Applied Sciences*, 2(4), 732.
- Alemayehu, D. B. ve Todoh, M.** (2024) "Enhanced Energy Absorption with Bioinspired Composite Triply Periodic Minimal Surface Gyroid Lattices Fabricated via Fused Filament Fabrication (FFF)", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3), 86.
- Ali, A., Zhang, N. ve Santos, R. M.** (2023) "Mineral Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the Fundamentals, Advancements, and Research Directions", *Applied Sciences*, 13(23), 12600.
- Alizadeh-Osgouei, M., Li, Y., Vahid, A., Ataee, A. ve Wen, C.** (2021) "High strength porous PLA gyroid scaffolds manufactured via fused deposition modeling for tissue-engineering applications", *Smart Materials in Medicine*, 2, 15–25.
- Almesmari, A., Alagha, A. N., Naji, M. M., Sheikh-Ahmad, J. ve Jarrar, F.** (2023) "Recent Advancements in Design Optimization of Lattice-Structured Materials", *Advanced Engineering Materials*, 25(17).
- Ben Amara, H., Martinez, D. C., Shah, F. A., Loo, A. J., Emanuelsson, L., Norlindh, B., Willumeit-Römer, R., Plocinski, T., Swieszkowski, W., Palmquist, A., Omar, O. ve Thomsen, P.** (2023) "Magnesium implant degradation provides immunomodulatory and proangiogenic effects and attenuates peri-implant fibrosis in soft tissues", *Bioactive Materials*, 26(March), 353–369.
- Amaya-Rivas, J. L., Perero, B. S., Helguero, C. G., Hurel, J. L., Peralta, J. M., Flores, F. A. ve Alvarado, J. D.** (2024) "Future trends of additive manufacturing in medical applications: An overview", *Heliyon*, 10(5), e26641.
- Antoniac, I., Manescu (Paltanea), V., Paltanea, G., Antoniac, A., Fosca, M., Laptoiu, D. ve Rau, J. V.** (2025) "Advancements in biomaterials and bioactive solutions for lumbar spine fusion cages: Current trends and future perspectives", *Bioactive Materials*, 53, 656.
- Ataollahi, S.** (2023) "A review on additive manufacturing of lattice structures in tissue engineering", *Bioprinting*, 35, e00304.
- Bai, L., Gong, C., Chen, X., Sun, Y., Zhang, J., Cai, L., Zhu, S. ve Xie, S. Q.** (2019) "Additive Manufacturing of Customized Metallic Orthopedic Implants: Materials, Structures, and Surface Modifications", *Metals*, 9(9), 1004.
- Bandyopadhyay, A., Mitra, I., Goodman, S. B., Kumar, M. ve Bose, S.** (2023) "Improving biocompatibility for next generation of metallic implants", *Progress in Materials Science*, 133,

- Bilhère-Dieuzeide, M., Chaves-Jacob, J., Buhon, E., Biguet-Mermet, G. ve Linares, J. M.** (2022) "Stress-driven method bio-inspired by long bone structure for mechanical part mass reduction by removing geometry at macro and cell-unit scales", *Materials and Design*, 213.
- Bozyiğit, B., Oymak, M. A., Bahçe, E. ve Uzunyol, Ö. F.** (2023) "Finite element analysis of lattice designed lumbar interbody cage based on the additive manufacturing", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 237(8), 991–1000.
- Burr, A., Persenot, T., Dautre, P.-T., Buffiere, J.-Y., Lhuissier, P., Martin, G. ve Dendievel, R.** (2020) "A numerical framework to predict the fatigue life of lattice structures built by additive manufacturing A numerical framework to predict the fatigue life of lattice structures built by additive manufacturing", *International Journal of Fatigue*, 139.
- Cai, X. yi, Sun, M. si, Huang, Y. peng, Liu, Z. xuan, Liu, C. jie, Du, C. fei ve Yang, Q.** (2020) "Biomechanical Effect of L4–L5 Intervertebral Disc Degeneration on the Lower Lumbar Spine: A Finite Element Study", *Orthopaedic Surgery*, 12(3), 917–930.
- Cano-Vicent, A., Tambuwala, M. M., Hassan, S. S., Barh, D., Aljabali, A. A. A., Birkett, M., Arjunan, A. ve Serrano-Aroca, Á.** (2021) "Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects", *Additive Manufacturing*, 47(7), 102378.
- Cao, Y., Lai, S., Wu, W., Sang, L. ve Lin, Y.** (2023) "Design and mechanical evaluation of additively-manufactured graded TPMS lattices with biodegradable polymer composites", *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 2868–2880.
- Cheers, G. M., Weimer, L. P., Neuerburg, C., Arnholdt, J., Gilbert, F., Thorwachter, C., Holzapfel, B. M., Mayer-Wagner, S. ve Laubach, M.** (2024) "Advances in implants and bone graft types for lumbar spinal fusion surgery", *Biomaterials Science*, 12(19), 4875–4902.
- Cheikho, K., Laurent, C. ve Ganghoffer, J. F.** (2022) "An advanced method to design graded cylindrical scaffolds with versatile effective cross-sectional mechanical properties", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 125(September 2021), 104887.
- Chen, L., Zhang, J., Du, B., Zhou, H., Liu, H., Guo, Y., Li, W. ve Fang, D.** (2018) "Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load", *Thin-Walled Structures*, 127, 333–343.
- Chen, Q., Zou, B., Wang, X., Zhou, X., Yang, G., Lai, Q. ve Zhao, Y.** (2024) "SLA-3d printed building and characteristics of GelMA/HAP biomaterials with gradient porous structure", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 155, 106553.
- Cheng, L., Zhang, P., Biyikli, E., Bai, J., Robbins, J. ve To, A.** (2017) "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: Theory and experimental validation", *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 660–677.

- Chmielewska, A. ve Dean, D.** (2024) "The role of stiffness-matching in avoiding stress shielding-induced bone loss and stress concentration-induced skeletal reconstruction device failure", *Acta Biomaterialia*, 173, 51–65.
- Deng, Y., Li, B., Huang, Z., Lin, Y. ve Li, Y.** (2022) "Experimental and numerical studies on the compression responses of novel mixed lattice structures", *Materials Today Communications*, 33(September), 104439.
- Devi, N., Srivastava, S., Yogi, B. ve Kumar Gupta, S.** (2021) "A Review on Differential Thermal Analysis", *Chemistry Research Journal*, 6(4), 71–80.
- Distefano, F., Mineo, R. ve Epasto, G.** (2023) "Mechanical behaviour of a novel biomimetic lattice structure for bone scaffold", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 138, 105656.
- Distefano, F., Pasta, S. ve Epasto, G.** (2023) "Titanium Lattice Structures Produced via Additive Manufacturing for a Bone Scaffold: A Review", *Journal of Functional Biomaterials*, 14(3), 125.
- Domínguez-Rodríguez, G., Ku-Herrera, J. J. ve Hernández-Pérez, A.** (2018) "An assessment of the effect of printing orientation, density, and filler pattern on the compressive performance of 3D printed ABS structures by fuse deposition", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5–8), 1685–1695.
- Dumic-Cule, I., Pecina, M., Jelic, M., Jankolija, M., Popek, I., Grgurevic, L. ve Vukicevic, S.** (2015) "Biological aspects of segmental bone defects management", *International Orthopaedics*, 39(5), 1005–1011.
- Egan, P., Wang, X., Greutert, H., Shea, K., Wuertz-Kozak, K. ve Ferguson, S.** (2019) "Mechanical and Biological Characterization of 3D Printed Lattices", *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(2), 73–81.
- Feng, J., Fu, J., Yao, X. ve He, Y.** (2022) "Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: From multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications", *International Journal of Extreme Manufacturing*, 4(2), 022001.
- Fogel, G., Martin, N., Lynch, K., Pelletier, M. H., Wills, D., Wang, T., Walsh, W. R., Williams, G. M., Malik, J., Peng, Y. ve Jekir, M.** (2022) "Subsidence and fusion performance of a 3D-printed porous interbody cage with stress-optimized body lattice and microporous endplates - a comprehensive mechanical and biological analysis", *The Spine Journal*, 22(6), 1028–1037.
- Frost, A., Bagouri, E., Brown, M. ve Jasani, V.** (2011) "Osteolysis following resorbable poly-L-lactide-co-D, L-lactide PLIF cage use: a review of cases", *European Spine Journal*, 21(3), 449–454.
- Gandhi, R., Maccioni, L. ve Concli, F.** (2022) "Significant Advancements in Numerical Simulation of Fatigue Behavior in Metal Additive Manufacturing-Review", *Applied Sciences*, 12(21), 11132.
- Gao, M., Yao, J., Wang, Y., Liang, M., Liu, T., Zhang, Z., Liu, X. ve Sun, Y.** (2025) "UV-cured 3D printing

- interbody fusion cage based on polymer composite”, *Journal of Materials Research*, 40(4), 610–621.
- Girolami, M., Boriani, S., Bandiera, S., Barbanti-Bródano, G., Ghermandi, R., Terzi, S., Tedesco, G., Evangelisti, G., Pipola, V. ve Gasbarrini, A.** (2018) “Biomimetic 3D-printed custom-made prosthesis for anterior column reconstruction in the thoracolumbar spine: a tailored option following en bloc resection for spinal tumors: Preliminary results on a case-series of 13 patients”, *European Spine Journal*, 27(12), 3073–3083.
- Gong, Y., Chen, X. ve Wu, W.** (2024) “Application of fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in sample preparation: Material characterization and mechanism investigation”, *Advances in Sample Preparation*, 11, 100122.
- Gorji, N. E., Pieniżek, A., Iancu, A., Norek, M., Couteau, C., Deturche, R., Tavkhelidze, A., Bibilashvili, A. ve Jangidze, L.** (2025) “SEM, EDX, AFM, and XPS analysis of surface microstructure and chemical composition of nanograting patterns on silicon substrates”, *Optical and Quantum Electronics*, 57(4).
- Günther, F., Pilz, S., Hirsch, F., Wagner, M., Kästner, M., Gebert, A. ve Zimmermann, M.** (2023) “Shape optimization of additively manufactured lattices based on triply periodic minimal surfaces”, *Additive Manufacturing*, 73, 103659.
- Guo, W., Xu, H., Liu, D., Dong, L., Liang, T., Li, B., Meng, B. ve Chen, S.** (2023) “3D-Printed lattice-inspired composites for bone reconstruction”, *Journal of Materials Chemistry B*, 11(31), 7353–7363.
- Guo, X., Li, X., Wang, E., Fuh, J. Y. H., Lu, W. F. ve Zhai, W.** (2023) “Bioinspired hierarchical diamond triply periodic minimal surface lattices with high energy absorption and damage tolerance”, *Additive Manufacturing*, 76, 103792.
- Ha, N. S. ve Lu, G.** (2020) “A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications”, *Composites Part B: Engineering*, 181, 107496.
- Hamouda, I., Tayefi, M., Eesaee, M., Hassanipour, M. ve Nguyen-Tri, P.** (2025) “Kinetic Analysis of Thermal Degradation of Styrene–Butadiene Rubber Compounds Under Different Aging Conditions”, *Journal of Composites Science*, 9(8), 420.
- Han, S. ve Sun, X.** (2024) “Optimizing Product Design Using Genetic Algorithms and Artificial Intelligence Techniques”, *IEEE Access*, 12(October), 151460–151475.
- Han, Z., Ma, C., Li, B., Ren, B., Liu, J., Huang, Y., Qiao, L. ve Mao, K.** (2022) “Biomechanical studies of different numbers and positions of cage implantation on minimally invasive transforaminal interbody fusion: A finite element analysis”, *Frontiers in Surgery*, 9(November), 1–9.
- Heo, M., Yun, J., Kim, H., Lee, S. S. ve Park, S.** (2022) “Optimization of a lumbar interspinous fixation device for the lumbar spine with degenerative disc disease”, *PLoS ONE*, 17(4 April), 1–18.

- Hollern, D. A., Woods, B. I., Shah, N. V., Schroeder, G. D., Kepler, C. K., Kurd, M. F., David Kaye, I., Millhouse, P. W., Diebo, B. G., Paulino, C. B., Hilibrand, A. S., Vaccaro, A. R. ve Radcliff, K. E.** (2019) "Risk Factors for Pseudarthrosis After Surgical Site Infection of the Spine", *International Journal of Spine Surgery*, 13(6), 507.
- Huang, H., Liu, J., Wang, L. ve Fan, Y.** (2021) "A critical review on the biomechanical study of cervical interbody fusion cage", *Medicine in Novel Technology and Devices*, 11(December 2020), 100070.
- Huang, S.-F., Chang, C.-M., Liao, C.-Y., Chan, Y.-T., Li, Z.-Y. ve Lin, C.-L.** (2023) "Biomechanical evaluation of an osteoporotic anatomical 3D printed posterior lumbar interbody fusion cage with internal lattice design based on weighted topology optimization", *International Journal of Bioprinting*, 9(3), 697.
- Hussain, S., Nazir, A., Waqar, S., Ali, U. ve Gokcekaya, O.** (2023) "Effect of additive manufactured hybrid and functionally graded novel designed cellular lattice structures on mechanical and failure properties", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(11–12), 4873–4891.
- Javaid, M. ve Haleem, A.** (2019) "Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review", *Alexandria Journal of Medicine*, 54(4), 411–422.
- Jayakumar, J., Manickam, P. S., Ghosh, G., Balamurugan, S., Ray, B. ve Roy, S.** (2024) "Optimized the stress shielding reduction of different lattice structures in cervical spine implants using FEA and VIKOR fuzzy MCDM analysis", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 33(1), 2435053.
- Kennedy, B. M., De Barra, E., Hampshire, S. ve Kelleher, M. C.** (2023) "Investigation of oleic acid as a dispersant for hydroxyapatite powders for use in ceramic filled photo-curable resins for stereolithography", *Journal of the European Ceramic Society*, 43(15), 7146–7166.
- Khan, N. ve Riccio, A.** (2024) "A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions", *Progress in Aerospace Sciences*, 149(April), 101021.
- Kim, T., See, C. W., Li, X. ve Zhu, D.** (2020) "Orthopedic implants and devices for bone fractures and defects: Past, present and perspective", *Engineered Regeneration*, 1, 6–18.
- Kim, Y. H., Choi, D. K. ve Kim, K.** (2012) "Investigation of the compressive stiffness of spinal cages in various experimental conditions based on finite element analysis", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 226(4), 341–344.
- Kladovasilakis, N., Tsongas, K. ve Tzetzis, D.** (2021) "Mechanical and fea-assisted characterization of fused filament fabricated triply periodic minimal surface structures", *Journal of Composites Science*, 5(2).
- Koç, E., Abdulai, D., Batgerel, O. E., Yazicioğlu, O., Suradi, R., & Moghbel, M.** (2026) "Hydroxyapatite Nanoparticle Modification of 3D-Printed Crown Resin: Effects of Concentration on Surface

- Roughness and Vickers Hardness After Thermocycling”, *Journal of Functional Biomaterials*, 17(5), 223.
- Kos, N., Gradisnik, L. ve Velnar, T.** (2019) “A Brief Review of the Degenerative Intervertebral Disc Disease”, *Medical Archives*, 73(6), 421.
- Kouhi-Lakeh, K., Teimouri, M. ve Asgari, M.** (2024) “Bio-inspired topology optimization driven design for 3D printed radially graded meta-structures; Design, modeling and mechanical characteristics”, *Composite Structures*, 346, 118435.
- Kujala, S., Ryhänen, J., Danilov, A. ve Tuukkanen, J.** (2003) “Effect of porosity on the osteointegration and bone ingrowth of a weight-bearing nickel–titanium bone graft substitute”, *Biomaterials*, 24(25), 4691–4697.
- Kuleshov, A. A., Vetrile, M. S., Shkarubo, A. N., Docenko, V. V., Es’kin, N. A., Lisyanskiy, I. N., & Makarov, S. N.** (2018) “Additive technologies in surgical treatment of spinal deformities”, *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*, 25(3–4), 19–29.
- Kumar, R., Lerski, R. A., Gandy, S., Clift, B. A. ve Abboud, R. J.** (2006) “Safety of orthopedic implants in magnetic resonance imaging: an experimental verification”, *Journal of orthopaedic research : official publication of the Orthopaedic Research Society*, 24(9), 1799–1802.
- Laubach, M., Kobbe, P. ve Hutmacher, D. W.** (2022) “Biodegradable interbody cages for lumbar spine fusion: Current concepts and future directions”, *Biomaterials*, 288.
- Lazennec, J. Y., Fourniols, E., Lenoir, T., Aubry, A., Pissonnier, M. L., Issartel, B. ve Rousseau, M. A.** (2011) “Infections in the operated spine: Update on risk management and therapeutic strategies”, *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 97(6), S107–S116.
- Leary, O. P., Crozier, J., Liu, D. D., Niu, T., Pertsch, N. J., Camara-Quintana, J. Q., Svokos, K. A., Syed, S., Telfeian, A. E., Oyelese, A. A., Woo, A. S., Gokaslan, Z. L. ve Fridley, J. S.** (2021) “Three-Dimensional Printed Anatomic Modeling for Surgical Planning and Real-Time Operative Guidance in Complex Primary Spinal Column Tumors: Single-Center Experience and Case Series”, *World Neurosurgery*, 145, e116–e126.
- Lee, N. K., Oh, H. J., Hong, C. M., Suh, H. ve Hong, S. H.** (2009) “Comparison of the synthetic biodegradable polymers, polylactide (PLA), and polylactic-co-glycolic acid (PLGA) as scaffolds for artificial cartilage”, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 14(2), 180–186.
- Li, C., Guo, C., Fitzpatrick, V., Ibrahim, A., Zwierstra, M. J., Hanna, P., Lechtig, A., Nazarian, A., Lin, S. J. ve Kaplan, D. L.** (2020) “Design of biodegradable, implantable devices towards clinical translation”, *Nature Reviews Materials*, 5(1), 61–81.
- Li, N., Xue, C., Chen, S., Aiyiti, W., Khan, S. B., Liang, J., Zhou, J. ve Lu, B.** (2023) “3D Printing of Flexible Mechanical Metamaterials: Synergistic Design of Process and Geometric Parameters”, *Polymers*, 15(23).

- Liang, L., Zhu, H., Wei, D., Wu, Y. ve Li, W.** (2023) "Energy absorption and multi-objective optimization of TPMS filled cylinder shell structures", *Electronic Research Archive*, 31(5), 2834–2854.
- Loenen, A. C. Y., Noailly, J., Ito, K., Willems, P. C., Arts, J. J. ve van Rietbergen, B.** (2022) "Patient-Specific Variations in Local Strain Patterns on the Surface of a Trussed Titanium Interbody Cage", *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 1461.
- Lutzweiler, G., Halili, A. N. ve Vrana, N. E.** (2020) "The overview of porous, bioactive scaffolds as instructive biomaterials for tissue regeneration and their clinical translation", *Pharmaceutics*, 12(7), 1–29.
- Ma, K., Zhuang, Z. G., Wang, L., Liu, X. G., Lu, L. J., Yang, X. Q., Lu, Y., Fu, Z. J., Song, T., Huang, D., Liu, H., Huang, Y. Q., Peng, B. G. ve Liu, Y. Q.** (2019) "The Chinese Association for the Study of Pain (CASP): Consensus on the Assessment and Management of Chronic Nonspecific Low Back Pain", *Pain Research and Management*, 2019, 8957847.
- Masood, S. H.** (2014) "Advances in Fused Deposition Modeling", *Comprehensive Materials Processing*, 10, 69-91.
- McGilvray, K. C., Waldorff, E. I., Easley, J., Seim, H. B., Zhang, N., Linovitz, R. J., Ryaby, J. T. ve Puttlitz, C. M.** (2017) "Evaluation of a polyetheretherketone (PEEK) titanium composite interbody spacer in an ovine lumbar interbody fusion model: biomechanical, microcomputed tomographic, and histologic analyses", *Spine Journal*, 17(12), 1907–1916.
- Meena, V. K., Kalra, P. ve Sinha, R. K.** (2022) "Finite element study on the influence of pore size and structure on stress shielding effect of additive manufactured spinal cage", *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 25(5), 566–577.
- Meena, V. K., Kumar, P., Kalra, P. ve Sinha, R. K.** (2021) "Additive manufacturing for metallic spinal implants: A systematic review", *Annals of 3D Printed Medicine*, 3, 100021.
- Mehboob, H.** (2023) "Biomechanical performance evaluation of composite metamaterial implant with 3D printing approach for lumbar interbody fusion surgery: A finite element study", *Composite Structures*, 303, 116379.
- Mener, A., Runner, R. P., Michael, K. W. ve Boden, S. D.** (2020) "Spine Infections Reduced at Dedicated Orthopaedics and Spine Hospital", *International Journal of Spine Surgery*, 14(3), 403.
- Meyers, M. A., Chen, P. Y., Lin, A. Y. M. ve Seki, Y.** (2008) "Biological materials: Structure and mechanical properties", *Progress in Materials Science*, 53(1), 1–206.
- Millecamps, M., Tajerian, M., Naso, L., Sage, E. H. ve Stone, L. S.** (2012) "Lumbar intervertebral disc degeneration associated with axial and radiating low back pain in ageing SPARC-null mice", *PAIN*, 153(6), 1167–1179.
- Morozov, E. V., Lopatin, A. V. ve Nesterov, V. A.** (2011) "Finite-element modelling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells", *Composite Structures*, 93(2), 308–323.

- Myers, D., Abdel-Wahab, A., Hafeez, F., Kovacev, N. ve Essa, K.** (2022) "Optimisation of the additive manufacturing parameters of polylactic acid (PLA) cellular structures for biomedical applications", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 136, 105447.
- Noronha, J., Dash, J., Leary, M., Watson, M., Qian, M., Kyriakou, E. ve Brandt, M.** (2023) "Additively Manufactured Functionally Graded Lattices: Design, Mechanical Response, Deformation Behavior, Applications, and Insights", *JOM*, 75(12), 5729–5754.
- Ohtori, S., Inoue, G., Miyagi, M. ve Takahashi, K.** (2015) "Pathomechanisms of discogenic low back pain in humans and animal models", *Spine Journal*, 15(6), 1347–1355.
- Oymak, M. A., Bahce, E. ve Singh, G.** (2025) "Bio-Inspired Graded and Uniform Cylindrical Lattices Fabricated by Material Extrusion 3D Printing: An Experimental and Numerical Investigation", *Journal of Applied Polymer Science*, 142(10).
- Oymak, M. A., Bahce, E. ve Singh, G.** (2026) "Additive manufacturing of bioinspired cylindrical polar lattice structures: generative design and parametric algorithm", *Progress in Additive Manufacturing*, 1–17.
- Özsın, G.** (2025) "Exploring the Thermal Degradation of Bakelite: Non-Isothermal Kinetic Modeling, Thermodynamic Insights, and Evolved Gas Analysis via Integrated In Situ TGA/MS and TGA/FT-IR Techniques", *Polymers*, 17(16), 2197.
- Palhares, T. N., Lovo, J. F. P., Rodrigues, G. C., Poli, A. L., Sabino, M. A., Rozental, R. ve Schmitt, C. C.** (2024) "Development of PCLMA/Hap-Si composite resin for vat photopolymerization 3D printing", *International Journal of Advances in Medical Biotechnology - IJAMB*, 6(2), 77–90.
- Pan, C., Han, Y. ve Lu, J.** (2020) "Design and Optimization of Lattice Structures: A Review", *Applied Sciences*, 10(18), 6374.
- du Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., Hands, C. H., Kunju, R. ve Bhate, D.** (2019) "Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing*, 27, 408–427.
- Ponnambalam, S. G., Aravindan, P. ve Mogileeswar Naidu, G.** (2000) "Multi-objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(5), 341–352.
- Rahatuzzaman, M., Mahmud, M., Rahman, S. ve Hoque, M. E.** (2024) "Design, fabrication, and characterization of 3D-printed ABS and PLA scaffolds potentially for tissue engineering", *Results in Engineering*, 21, 101685.
- Rahman, M. M., Sultana, J., Rayhan, S. Bin ve Ahmed, A.** (2023) "Optimization of FDM manufacturing parameters for the compressive behavior of cubic lattice cores: an experimental approach by Taguchi method", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(3–4), 1329–1343.

- Raju, B., Chandrashekar, U., Drakshayani, D. ve Kumjan, C.** (2010) "Determining the influence of layer thickness for rapid prototyping with Stereolithography (SLA) process", *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(7), 3199–3205.
- Sadeghinia, P., Roshan, A. S., Goudarzi, P. K. ve Nikkhoo, M.** (2022) "Finite Element Modeling and Optimization of The Lumbar Interbody CAGE Based on the Additive Manufacturing Method", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 63(2), 231–239.
- Sharma, D. ve Hiremath, S. S.** (2023) "Experimental and FEM study on the in-plane and out-plane loaded reversible dual-material bio-inspired lattice structures with improved energy absorption performance", *Composite Structures*, 303, 116353.
- Shu, T., Zhang, Y., Sun, G., Pan, Y., He, G., Cheng, Y., Li, A. ve Pei, D.** (2021) "Enhanced Osseointegration by the Hierarchical Micro-Nano Topography on Selective Laser Melting Ti-6Al-4V Dental Implants", *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 1457.
- Siddique, S. H., Hazell, P. J., Wang, H., Escobedo, J. P. ve Ameri, A. A. H.** (2022) "Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption – A review", *Additive Manufacturing*, 58, 103051.
- Singh, M. K. ve Singh, A.** (2022) "Thermal characterization of materials using differential scanning calorimeter", *Characterization of Polymers and Fibres*, 201–222.
- Siu, T. L., Rogers, J. M., Lin, K., Thompson, R. ve Owbridge, M.** (2018) "Custom-Made Titanium 3-Dimensional Printed Interbody Cages for Treatment of Osteoporotic Fracture-Related Spinal Deformity", *World neurosurgery*, 111, 1–5.
- Sokollu, B., Gulcan, O. ve Konukseven, E. I.** (2022) "Mechanical properties comparison of strut-based and triply periodic minimal surface lattice structures produced by electron beam melting", *Additive Manufacturing*, 60(PA), 103199.
- Sui, G., Yang, X., Mei, F., Hu, X., Chen, G., Deng, X. ve Ryu, S.** (2007) "Poly-L-lactic acid/hydroxyapatite hybrid membrane for bone tissue regeneration", *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 82(2), 445–454.
- Talukdar, R. G., Saviour, C. M., Tiwarekar, K., Dhara, S. ve Gupta, S.** (2022) "Bone Remodeling Around Solid and Porous Interbody Cages in the Lumbar Spine", *Journal of biomechanical engineering*, 144(10).
- Taniguchi, N., Fujibayashi, S., Takemoto, M., Sasaki, K., Otsuki, B., Nakamura, T., Matsushita, T., Kokubo, T. ve Matsuda, S.** (2016) "Effect of pore size on bone ingrowth into porous titanium implants fabricated by additive manufacturing: An in vivo experiment", *Materials Science and Engineering C*, 59, 690–701.
- Telfer, S., Pallari, J., Munguia, J., Dalgarno, K., McGeough, M. ve Woodburn, J.** (2012) "Embracing additive manufacture: implications for foot and ankle orthosis design", *BMC Musculoskeletal*

Disorders, 13(1), 84.

- Torstrick, F. B., Lin, A. S. P., Potter, D., Safranski, D. L., Sulchek, T. A., Gall, K. ve Guldberg, R. E.** (2018) "Porous PEEK improves the bone-implant interface compared to plasma-sprayed titanium coating on PEEK", *Biomaterials*, 185, 106–116.
- Tung, C. C., Chen, Y. S., Chen, W. F. ve Chen, P. Y.** (2022) "Bio-inspired, helically oriented tubular structures with tunable deformability and energy absorption performance under compression", *Materials & Design*, 222, 111076.
- Vanaclocha-Saiz, A., Vanaclocha, V., Atienza, C. M., Clavel, P., Jorda-Gomez, P., Barrios, C. ve Vanaclocha, L.** (2022) "Finite Element Analysis of a Bionate Ring-Shaped Customized Lumbar Disc Nucleus Prosthesis", *ACS Applied Bio Materials*, 5(1), 172–182.
- Verma, R., Virk, S. ve Qureshi, S.** (2020) "Interbody Fusions in the Lumbar Spine: A Review", *HSS Journal*, 16(2), 162–167.
- Veronesi, F., Sartori, M., Griffoni, C., Valacco, M., Tedesco, G., Davassi, P. F., Gasbarrini, A., Fini, M. ve Barbanti Brodano, G.** (2022) "Complications in Spinal Fusion Surgery: A Systematic Review of Clinically Used Cages", *Journal of Clinical Medicine*, 11(21), 6279.
- Waizy, H., Seitz, J. M., Reifenrath, J., Weizbauer, A., Bach, F. W., Meyer-Lindenberg, A., Denkena, B. ve Windhagen, H.** (2013) "Biodegradable magnesium implants for orthopedic applications", *Journal of Materials Science*, 48(1), 39–50.
- Wang, F., Cai, F., Shi, R., Wang, X. H. ve Wu, X. T.** (2016) "Aging and age related stresses: A senescence mechanism of intervertebral disc degeneration", *Osteoarthritis and Cartilage*, 24(3), 398–408.
- Wei, Q., Sun, D., Yang, R., Wang, Yanmei, Zhang, J., Li, X. ve Wang, Yanen** (2022) "Influence of Fused Deposition Molding Printing Process on the Toughness and Miscibility of Polylactic Acid/Polycaprolactone Blends", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(2), 1338–1345.
- Wei, Y. L., Yang, Q. S., Liu, X. ve Tao, R.** (2022) "Multi-bionic mechanical metamaterials: A composite of FCC lattice and bone structures", *International Journal of Mechanical Sciences*, 213, 106857.
- Wu, Y., Liu, J., Kang, L., Tian, J., Zhang, X., Hu, J., Huang, Y., Liu, F., Wang, H. ve Wu, Z.** (2023) "An overview of 3D printed metal implants in orthopedic applications: Present and future perspectives", *Heliyon*, 9(7), e17718.
- Xia, B., Liu, Y., Xing, Y., Shi, Z. ve Pan, X.** (2025) "Biodegradable Medical Implants: Reshaping Future Medical Practice", *Advanced Science*, 12(35), e08014.
- Xu, C., Xu, W., Li, Q., Zhang, L., Zhou, X., Liu, Q. ve Ren, L.** (2025) "High-performance Face-centered Cubic Bone Scaffolds Via Selective Laser Melting: Enhancing Energy Absorption and Load Capacity", *Journal of Bionic Engineering*, 22(5), 2615–2629.
- Xu, N., Wei, F., Liu, X., Jiang, L., Cai, H., Li, Z., Yu, M., Wu, F. ve Liu, Z.** (2016) "Reconstruction of the

- upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with ewing sarcoma”, *Spine*, 41(1), E50–E54.
- Xu, Y., Huang, Y., Yan, H., Gu, Z., Zhao, T., Zhang, R., Pan, B., Dong, L., Liu, M. ve Jiang, L.** (2023) “Sunflower-pith-inspired anisotropic auxetic mechanics from dual-gradient cellular structures”, *Matter*, 6(5), 1569–1584.
- Yu, Z., Savinov, R., Matura, M., Zhang, P. ve Shi, J.** (2025) “Current research status on advanced lattice structures for impact and energy absorption applications: A systematic review”, *Thin-Walled Structures*, 215(PA), 113490.
- Yu, Z., Thakolkaran, P., Shea, K. ve Stanković, T.** (2023) “Artificial neural network supported design of a lattice-based artificial spinal disc for restoring patient-specific anisotropic behaviors”, *Computers in Biology and Medicine*, 152.
- Zhang, H., Jiang, Y., Wang, B., Zhao, Q., He, S. ve Hao, D.** (2018) “Direction-changeable lumbar cage versus traditional lumbar cage for treating lumbar spondylolisthesis”, *Medicine (United States)*, 97(7), 697.
- Zhang, H., Wang, Z., Wang, Y., Li, Z., Chao, B., Liu, S., Luo, W., Jiao, J. ve Wu, M.** (2022) “Biomaterials for Interbody Fusion in Bone Tissue Engineering”, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 900992.
- Zhang, Y., He, S., Wang, P., Gu, J., Jiang, Q., Liu, M. ve Wen, C.** (2024) “Impacts of permeability and effective diffusivity of porous scaffolds on bone ingrowth: In silico and in vivo analyses”, *Biomaterials Advances*, 161, 213901.
- Zhu, H., Wang, P., Wei, D., Si, J. ve Wu, Y.** (2022) “Energy absorption of diamond lattice cylindrical shells under axial compression loading”, *Thin-Walled Structures*, 181, 110131.
- Zolpakar, N. A., Lodhi, S. S., Pathak, S. ve Sharma, M. A.** (2020) “Application of Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA) Optimization in Machining Processes”, *Springer Series in Advanced Manufacturing*, 185–199.

ÖZGEÇMİŞ

Öğrenim Bilgileri

Lisans, , Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Pr. (2016)

Yüksek Lisans, Tezli Program, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (2021)

Doktora Giriş, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (2022)

Deneyim / İşyeri Bilgileri: Ocak 2022 - Ekim 2023 (1 yıl 10 ay) (Tam Zamanlı)

MÜHENDİS, OTTOMAN GRUP İMPLANT END. SAĞLIK SAN. VE TİC.LTD.ŞTİ

Makaleler

1. B. BOZYIGIT, M. A. OYMAK, E. BAHCE & G. SINGH, Patient-Specific Lattice Cage Design for Cervical Spinal Fusion, TURKISH NEUROSURGERY, 2026, 1019-5149, 36, 1, 8.

2. M. A. OYMAK, E. BAHCE & G. SINGH, Additive manufacturing of bioinspired cylindrical polar lattice structures: generative design and parametric algorithm, PROGRESS IN ADDITIVE MANUFACTURING, 2026, 2363-9512, 17.

3. M. A. OYMAK, E. BAHCE & G. SINGH, Bio-Inspired Graded and Uniform Cylindrical Lattices Fabricated by Material Extrusion 3D Printing: An Experimental and Numerical Investigation, JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE, 2025, 0021-8995, 142, 10, 15.

4. M. CAN, M. A. OYMAK, S. KOLUACIK, E. BAHCE & O. F. UZUNYOL, CASE STUDY OF A DISTAL FEMUR Ti6Al4V LOCKED COMPRESSION PLATE FAILURE SURFACE INVESTIGATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS, JOURNAL OF MECHANICS IN MEDICINE AND BIOLOGY, 2024, 0219-5194, 24, 04, 13.

5. M. A. OYMAK, E. BAHCE & I. GEZER, Experimental and numerical study on micro-milling of CoCrW alloy produced by selective laser melting and casting, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE, 2024, 0954-4054, null, 16.

6. B. BOZYIGIT, M. A. OYMAK, E. BAHCE & O. F. UZUNYOL, Finite element analysis of lattice designed lumbar interbody cage based on the additive manufacturing, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART H-JOURNAL OF ENGINEERING IN MEDICINE, 2023, 0954-4119, 237, 8, 10.

7. M. A. OYMAK, E. BAHÇE & İ. GEZER, Investigation Of Cryogenic Cooling Effect With Finite Element Method In Micro Milling Of Ti6Al4V Material, International Journal of Innovative Engineering Applications, 2021, 2587-1943, 5, 2, 93-100.

Bildiriler

1. M.A. Oymak, vd. Genetik algoritmalarla polar silindirik tasarlanan yapıların deneysel incelenmesi ve sonlu elemanlar analizi, Tam Metin Bildiri, 6th INTERNATIONAL CONGRESS ON KHAZAR SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION 1-3 Şubat 2026, 310-316.

2. M. A. Oymak, vd. Kübik Hacim Merkezli Yapı İskeleli Kalça Protezinin Yürüme Anındaki Biyomekanik Performansının Sonlu Elemanlar Analizi İle İncelenmesi, Tam Metin Bildiri, 2. Uluslararası Gap

Matematik - Mühendislik - Fen Ve Sağlık Bilimleri Kongresi, 21 Haziran 2019, 23 Haziran 2023, 405 - 413.

3. M. A. Oymak, Mikro İmalat Teknolojileri Ve Mikro Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi, Tam Metin Bildiri, 2. Uluslararası 1 Mayıs Sosyal Politikalar Ve Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 01 Mayıs 2021.

4. M. A. Oymak, Cocr Alaşımının 3D Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Mikro Frezeleme İşleminde Takım Kesme Açılarının Kesme Sıcaklıkları Üzerinde Etkisinin İncelenmesi, Tam Metin Bildiri, 2. Uluslararası 1 Mayıs Sosyal Politikalar Ve Bilimsel Araştırmalar Kongresi 1 Mayıs 2021.

5. M. A. Oymak, M. Can & S. Koluçak, Kemik Kırıklarının Tedavisinde Kullanılan Lcp Plaklarında Kilitli Ve Kilitli Vidaların Kullanımı Ve Farklı Vida Açılarının Plagın Mekanik Dayanımına Etkisinin Araştırılması, Tam Metin Bildiri, Uluslararası Ispec Mühendislik Ve Fen Bilimleri Kongresi, 03 Mayıs 2019, 04 Mayıs 2019, 18 - 23.

6. M. A. Oymak, Kemik Kırıklarının Tedavisinde Kullanılan Lcp Plaklarında Kilitli Vidaların Plak Kırılmasında Etkisi Ve Sonlu Elemanlar Analizi İle Araştırılması, Tam Metin Bildiri, III. Uluslararası Avrasya Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, 04 Nisan 2019, 07 Nisan 2019.

BİDEB Destekleri: Mehmet Akif Oymak, Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı, 2214-A Yurt Dışı Araştırma Burs Programı (Doktora öğrencileri için), Türkiye'ye Döndü, 2024 - 1, 15.10.2024 - 15.10.2025.