



T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANOKRİSTALİN SELÜLOZ TAKVİYELİ LATTİCE DENTAL GREFTLERİN TASARIMI,3B ÜRETİMİ,
MEKANİK KARAKTERİZASYONU VE BİYOLOJİK ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI.**

DOKTORA TEZİ

Özgün Ceren AKBAY

Malatya-2026

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANOKRİSTALİN SELÜLOZ TAKVİYELİ LATTİCE DENTAL GREFTLERİN TASARIMI,3B ÜRETİMİ,
MEKANİK KARAKTERİZASYONU VE BİYOLOJİK ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI.**

DOKTORA TEZİ

Özgün Ceren AKBAY

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Erkan BAHÇE**

Bu araştırma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2025-4056 proje numarası ile desteklenmiştir.

Malatya-2026

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

ETİK ve YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

14/05/2026

İnönü Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak, Doç.Dr.Erkan BAHÇE danışmanlığında hazırlayıp sunduğum **“Nanokristalin Selüloz Takviyeli Lattice Dental Greftlerin Tasarımı,3B Üretimi, Mekanik Karakterizasyonu ve Biyolojik Etkinliğinin Araştırılması.”** 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 gösteriminde 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,
- Kullanımın hipotez geliştirme, teorik tartışma ve yorumlama gibi üst düzey akademik becerileri içermediğini,
- Kullanımın 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 Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber’de belirtilen ilkelere riayet ettiğimi,

kabul ve taahhüt ederim.

Özgün Ceren AKBAY
İmza

ÖNSÖZ

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

Deneyisel çalışmalarında bana destek olan kıymetli hocalarım **Prof.Dr. Süleyman KÖYTEPE, Prof.Dr. Ali Adnan HAYALOĞLU, Prof.Dr. Dilek ASMA, Doç.Dr. Mahmut DAŞKIN, Dr.Öğr.Üyesi Canbolat GÜRSES, Dr.Öğr.Üyesi Elif ÖZBEY, Öğr.Gör.Dr.Tuğba UTKU, Yük. Biyolog Ali ÖLÇEKÇİ ve Arş.Gör. Hilal KANMAZ'a,**

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi doktora eğitimim süresince de benden desteklerini esirgemeyen başta canım kız kardeşim olmak üzere aileme, dostlarıma ve varlıklarıyla hayatıma neşe katan sevgili yeğenlerim **İpek AKBAY ile Umay ÖZDEMİR'e,**

Tez çalışmam süresince sağladıkları maddi ve manevi desteklerden dolayı **TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı'na, ön deneylerimde destek veren Türkiye Sağlık Enstitüleri Başkanlığı'na (TÜSEB) (Proje No: 47203) ve tezimin uygulama aşamasında destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne (Proje No: FDK-2025-4056)**

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Çalışmanın Amacı.....	7
2.2. Çalışmanın Önemi ve Özgünlüğü.....	8
2.3. Çalışmanın Organizasyon Şeması	9
3.GENEL BİLGİLER.....	10
3.1. Alveolar Kemik Anatomisi.....	10
3.2. Alveolar Kemik Ogmentasyon Teknikleri.....	11
3.2.1. Yönlendirilmiş Kemik Rejenerasyonu	11
3.2.2. Otojen Onlay Blok Kemik Greftleme	12
3.2.3. Alveolar Kret Ayırma.....	12
3.2.4. Maksiller Sinüs Ogmentasyonu	12
3.2.5. Distraksiyon Osteogenezi	13
3.3. Kemik Greft Materyalleri	13
3.3.1. Otojen Greftler	13
3.3.2. Allojen Greftler	13
3.3.3. Ksenojen Greftler.....	14
3.3.4. Alloplastik Greftler.....	14
3.4. Doku Mühendisliğinde Nanokristalin Selüloz Kullanımı.....	14
3.5. Polimer Biyomateryallerin Üretiminde Kullanılan 3B Baskı Teknikleri	15
3.5.1. Erimiş Biriktirme Modellemesi (FDM)	17
3.5.2. Stereolitografi (SLA).....	18
3.5.3. Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	19
3.5.4. Dijital Işık İşleme (DLP)	19
3.5.5. Malzeme Püskürtme (MJ).....	20

3.6. İskele (Scaffold) Yapılar	21
4. MATERYAL VE METOT	25
4.1. Kimyasal Analizler	25
4.1.1. Hurma Çekirdeğinden Soxhlet Ekstraksiyonu Yöntemiyle Nanokristalin Selüloz Eldesi.....	25
4.1.2 Nanokristalin Selüloz Karakterizasyon Analizleri.....	27
4.2. Mekanik Testler	28
4.2.1. Lattice Greftlerin 3B Baskı İşlemi.....	28
4.2.2. Boyut Hassasiyeti Ölçümü Ve Yüzey Defektlerinin Tespiti	33
4.2.3. Basma Testi Ve Dinamik Nokta Takibi	34
4.2.4. Mikro Sertlik Testi.....	35
4.2.5. Termal Yorulma Testi.....	36
4.2.6. Sonlu Elemanlar Analizi	37
4.2.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	38
4.3. Biyolojik Değerlendirmeler	38
4.3.1. In Vitro Hücre Adezyon, Morfoloji Ve AO/EB İle Canlılık Analizi.....	38
4.3.2. Kitosan Kaplama İşlemi.....	39
4.3.3. Antibakteriyel Aktivitenin Disk Difüzyon Yöntemi İle Değerlendirilmesi	41
4.3.4. Temas Açısı Ölçümü.....	42
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	44
5.1. Kimyasal Analizlerin Sonuçları	44
5.1.1. Nanokristalin Selüloz Karakterizasyon Sonuçları.....	44
5.1.2. Saf Reçine Ve Selüloz Katkılı Recineden Üretilen Lattice Greftlerin Karakterizasyonu	49
5.2. Mekanik Testlerin Sonuçları	56
5.2.1. Greftlerin Yüzey Defektlerinin Değerlendirilmesi	56
5.2.2. Greftlerin Boyut Hassasiyetinin Değerlendirilmesi	58
5.2.3. Basma Testi Ve Dinamik Nokta Takibi Sonuçları	60
5.2.4. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları	67
5.2.5. Termal Yorulma Testi Sonuçları.....	68
5.2.6. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	71
5.2.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	73

5.3. Biyolojik Değerlendirme Sonuçları	75
5.3.1. Greftlerin Hücre Gelişim Sonuçları	75
5.3.2. Greft Geometrisinin Hücre Çoğalması Üzerindeki Rolü	79
5.3.3. Kitosan Kaplama Sonuçları	81
5.3.4. Antibakteriyel Aktivite Sonuçları	89
5.3.5. Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	89
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91
6.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	91
6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler.....	93
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	114

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo No	Sayfa No
Tablo 1. Selüloz kaynaklarının maliyet, çevresel etki, erişilebilirlik ve selüloz oranları açısından karşılaştırılması.	6
Tablo 2. Hurma çekirdeğinden CNC selüloz üretimi örnek maliyet analizi.....	7
Tablo 3. Çalışmanın konuya olan bilimsel katkısı ve literatürdeki boşluklar.	8
Tablo 4. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırması.....	17
Tablo 5. Literatürde yaygın olarak kullanılan kafes yapıları.....	22
Tablo 6. Farklı hammaddelerden üretilen nanokristalin selülozun özellikleri.....	25
Tablo 7. CAD tasarımı ile üretilen lattice greftler arasındaki boyutsal sapma değerleri.	59
Tablo 8. Lattice greftlere ait bölgesel elastik modül değerleri.	63
Tablo 9. Lattice greftlerin dinamik nokta takibi sonuçları.	66
Tablo 10. Lattice greftlere ait Shore D sertlik değerleri.....	67
Tablo 11. Lattice greftlerin termal yorulma çevrimlerine bağlı akma dayanımı ve elastik modül değerlerinin değişimi.	69
Tablo 12. Lattice greftlere ait yüzey pürüzlülük değerleri.	73
Tablo 13. Lattice greftlerin hücre tutunma davranışının karşılaştırılması.	78
Tablo 14. Greftlere ait EDX elementel kompozisyon özeti (C, O, N, Na, Cl)	85
Tablo 15. İnhibisyon zon çapları.....	89
Tablo 16. Lattice greftlerin temas açısı ölçüm sonuçları.	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
Şekil 1. Literatür taraması haritalandırması.....	6
Şekil 2. Dental implant uygulamaları öncesi kemik dokusu hasarının giderilmesinde 3B yazıcı ile üretilmiş CNC katkılı lattice greftlerin kullanımını ve kemik rejenerasyon süreci. .	7
Şekil 3. Tez çalışması iş akışı.....	9
Şekil 4. Dişin anatomik bileşenleri.	11
Şekil 5. Eklemeli imalatın sektörlere göre yüzdelik dağılımı.....	16
Şekil 6. Üretilcek örnek selüloz katkılı lattice greftin eklemeli imalat aşamaları.....	16
Şekil 7. FDM sistem şematığı.	18
Şekil 8. SLA sistem şematığı.	18
Şekil 9. SLS sistem şematığı.....	19
Şekil 10. DLP sistem şematığı.....	20
Şekil 11. MJ sistem şematığı.	21
Şekil 12. Soxhlet cihazı kullanılarak gerçekleştirilen ekstraksiyon işlemi.	26
Şekil 13. Hidroliz işlemi sonrası elde edilen nanokristalin selüloz.	27
Şekil 14. Nanokristalin selüloz içeren reçine formülasyonu şematik gösterim.	29
Şekil 15. Bilgisayar destekli tasarım yazılımı ile oluşturulan ve 1×1×1 cm boyutlarında silindirik olarak tasarlanmış üç farklı hücre tipine sahip lattice greft modelleri	30
Şekil 16. Selüloz katkılı lattice greft modellerinin 3B baskı işlemi.	31
Şekil 17. Üretilen selüloz katkılı lattice greftler.	31
Şekil 18. Selüloz katkılı lattice greftlerin ultrasonik banyoda temizlenme işlemi.	32
Şekil 19. Selüloz katkılı lattice greft modellerine UV ışık altında son kütleme işlemi uygulanması.	32
Şekil 20. Boyut hassasiyeti ölçümleri	33
Şekil 21. Basma testi deney düzeneği.....	34
Şekil 22. Dinamik nokta takibi analizi için örnek lattice greft modeli üzerinde referans noktalarının belirlenmesi.	35
Şekil 23. Lattice greftlerin Shore D yöntemiyle sertlik ölçümleri.	36
Şekil 24. 24 kuyucuklu kültür plakasında lattice greftlerin yerleşimi.	39
Şekil 25. Daldırma yöntemiyle lattice greftlere kitosan kaplama işleminin uygulanması.	40

Şekil 26. Kitosan kaplama işlemi yapılan lattice greftler.	41
Şekil 27. <i>E. faecalis</i> ile ekim yapılmış Nutrient Agar (NA, Merck) plakları üzerinde lattice greftlerin ve pozitif kontrol Cefadroxil (Bioanalyse) antibiyotik disklerinin yerleşimi.	42
Şekil 28. Lattice greft yüzeyi üzerinde deiyonize su damlasının temas açısı ölçümü.	43
Şekil 29. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeği yapısından saflaştırılmış selüloz yapılarına ait FTIR spektrumları.	45
Şekil 30. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeği yapısından saflaştırılmış selüloz yapılarına ait X-ray spektrumları.....	46
Şekil 31. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz yapılarına ait TGA termogramları ve diferansiyel TGA eğrileri (iç grafik).....	47
Şekil 32. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz yapılarına ait DTA eğrileri.	48
Şekil 33. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz yapılarına ait DSC eğrileri.	49
Şekil 34. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait FTIR spektrumları.	51
Şekil 35. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait X-ray spektrumları.	52
Şekil 36. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait TGA termogramları ve diferansiyel TGA eğrileri (iç grafik).	53
Şekil 37. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait DTA eğrileri.	54
Şekil 38. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait DSC eğrileri.	55
Şekil 39. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait düşük büyütme SEM görüntüleri.	56
Şekil 40. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait yüksek büyütme SEM görüntüleri.....	56
Şekil 41. Üretilen lattice greftlerde selüloz oranına göre meydana gelen yüzey defektleri....	57
Şekil 42. Örnek DICOM dosyasını STL formata dönüştürme.....	58
Şekil 43. Lattice greftlere ait gerilme-gerinim eğrileri.	60

Şekil 44. Greftlere ait maksimum gerilme ve enerji soğurma kapasitesi karşılaştırması.	63
Şekil 45. Greftlere ait bölgesel elastik modül değerleri.	64
Şekil 46. Lattice greftlerin X ve Y yönlü sertlik değişimleri.	68
Şekil 47. Termal yorulma çevrimleri sonrası greftlerde meydana gelen elastik modül ve akma dayanımı değişimi.	70
Şekil 48. Greftlerin von Mises gerilme dağılım sonuçları.	72
Şekil 49. Lattice greftlere ait karşılaştırmalı yüzey pürüzlülüğü grafiği.	74
Şekil 50. Kelvin lattice greftlerinin AO/EB ile boyandıktan sonraki L-929 hücrelerinin yapışmalarına ait 40X ve 100X büyütmelelerdeki floresans görüntüleri.	76
Şekil 51. BCC lattice greftlerinin AO/EB ile boyandıktan sonraki L-929 hücrelerinin yapışmalarına ait 40X ve 100X büyütmelelerdeki floresans görüntüleri.	77
Şekil 52. FCC lattice greftlerinin AO/EB ile boyandıktan sonraki L-929 hücrelerinin yapışmalarına ait 40X ve 100X büyütmelelerdeki floresans görüntüleri.	78
Şekil 53. Lattice greftlerin farklı bölgelerindeki hücre tutunma davranışlarının karşılaştırmalı analizi.	79
Şekil 54. BCC lattice greftlerinde hücre dağılımı.	80
Şekil 55. FCC lattice greftlerinde hücre dağılımı.	80
Şekil 56. Kelvin lattice greftlerinde hücre dağılımı	81
Şekil 57. BCC5, Kelvin5, FCC5 lattice greftlerinin gözenek yapılarının kaplama sonrası SEM görüntüsü.	82
Şekil 58. BCC10, Kelvin10, FCC10 lattice greftlerinin gözenek yapılarının kaplama sonrası SEM görüntüsü.	83
Şekil 59. BCC15, Kelvin15, FCC15 lattice greftlerinin gözenek yapılarının kaplama sonrası SEM görüntüsü.	84
Şekil 60. BCC lattice greftlerinin element haritalama sonuçları.	86
Şekil 61. FCC lattice greftlerinin element haritalama sonuçları.	87
Şekil 62. Kelvin lattice greftlerinin element haritalama sonuçları.	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

-OH	: Hidroksil
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
AO	: Akridin Turuncusu
ATR	: Attenuated Total Reflectance
BCC	: Body Cubic Center
C	: Karbon
CAD	: Computer Aided Design
Cl	: Klor
cm	: Santimetre
CNC	: Nanokristalin Selüloz
CNF	: Selüloz Nano Lif
CO₂	: Karbondioksit
CoCrMo	: Kobalt-Krom-Molibden
DLP	: Dijital Işık İşleme
DMEM	: Dulbecco's Modified Eagle Medium
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
EB	: Etidyum Bromür
EBM	: Elektron Işınli Eritme
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını
FCC	: Face Cubic Center
FDM	: Erimiş Biriktirme Modellemesi
FTIR	: Fourier Infrared Spektroskopisi
gr	: Gram
H	: Hidrojen
J	: Joule
kV	: Kilovolt
LOM	: Laminasyonlu Nesne Üretimi
mg	: Miligram
Micro-CT	: Bilgisayarlı Mikro Tomografi

MJ	: Malzeme Püskürtme
mL	: Mililitre
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Pascal
MSLA	: Maskeli Stereolitografi
N	: Azot
Na	: Sodyum
NaClO	: Sodyum Hipoklorit
NaOH	: Sodyum Hidroksit
nm	: Nanometre
O	: Oksijen
PBS	: Fosfat Tamponlu Tuz Çözeltisi
PC	: Polikarbonat
PETG	: Polietilen Tereftalat Glikol
PLA	: Polilaktik Asit
PTFE	: Politetrafloroetilen
px	: Piksel
Ra	: Ortalama Pürüzlülük
rpm	: Dakika Başına Devir
Rq	: Ortalama Karekök Pürüzlülük
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLA	: Stereolitografi
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
STL	: Stereolitografi
Tg	: Camı Geçiş Sıcaklığı
TGA	: Termogravimetrik Analiz
UV	: Ultraviyole
UV-C	: Ultraviyole-C
μA	: Mikro Amper
μg	: Mikrogram
μl	: Mikrolitre
μm	: Mikrometre
°C	: Santigrat

ÖZET

Nanokristalin Selüloz Takviyeli Lattice Dental Greftlerin Tasarımı,3B Üretimi, Mekanik Karakterizasyonu ve Biyolojik Etkinliğinin Araştırılması

Alveolar kemik ogmentasyonundaki defektlerin onarılması ve mekanik bütünlüğün sağlanması için biyouyumlu ve yüksek dayanımlı greft kullanımı kritik öneme sahiptir. Doğal bir polimer olan selüloz üstün mekanik özellikleri ve hidrofilik karakteri sayesinde kemik doku mühendisliği uygulamalarında umut verici bir takviye malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada hurma çekirdeğinden saflaştırılan nanokristalin selüloz katkılı 3B lattice greftler; BCC, FCC ve Kelvin birim hücre geometrileri kullanılarak MSLA yöntemiyle üretilmiştir. Karakterizasyon analizleri (FTIR, XRD, TGA/DTA, DSC) sonucunda, elde edilen selülozun ticari formlarla uyumlu yapısal ve termal özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Mekanik testler ise selüloz oranının artmasıyla sertliğin ve yük taşıma kapasitesinin arttığı, BCC15 greftinin yaklaşık 51 MPa ile en yüksek basma dayanımını ve en iyi termal kararlılığı sergilediği saptanmıştır. Kelvin15 greftinin ise en yüksek Shore D sertlik değerlerini ve en dengeli gerilme dağılımına sahip olduğu görülmüştür. Biyolojik analizlerde selüloz katkısının yüzey ıslanabilirliğini artırarak hidrofilik karakteri güçlendirdiği, BCC15 ve FCC greftlerinde hücre tutunmasının en yüksek düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, BCC15 greftinin *Enterococcus faecalis*'e karşı %48 oranında antibakteriyel etki gösterdiği saptanmıştır. Sonuç olarak, hurma çekirdeğinden elde edilen selülozun lattice greftlerde kullanımı alveolar kemik rejenerasyonu için gerekli olan mekanik dayanım, biyouyumluluk ve antibakteriyel korumayı bir arada sunan başarılı bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Alveolar kemik ogmentasyonu, BCC/FCC/Kelvin geometrileri, Lattice greft tasarımı, Nanokristalin selüloz.

ABSTRACT

Design, 3D Production, Mechanical Characterization, and Investigation of Biological Activity of Nanocrystalline Cellulose-Reinforced Lattice Dental Grafts

Biocompatible and high-strength grafts are critically important for repairing defects in alveolar bone augmentation and ensuring mechanical integrity. Cellulose, a natural polymer, stands out as a promising reinforcement material in bone tissue engineering applications due to its superior mechanical properties and hydrophilic character. In this study, 3D lattice grafts reinforced with nanocrystalline cellulose purified from date pits were produced by the MSLA method using BCC, FCC, and Kelvin unit cell geometries. As a result of the characterization analyses (FTIR, XRD, TGA/DTA, DSC), it was determined that the obtained cellulose exhibited structural and thermal properties compatible with commercial forms. Mechanical tests showed that as the cellulose content increased, hardness and load-bearing capacity also increased, and the BCC15 graft exhibited the highest compressive strength of approximately 51 MPa and the best thermal stability. The Kelvin15 graft showed the highest Shore D hardness values and the most balanced stress distribution. In the biological analyses, it was observed that the addition of cellulose enhanced the hydrophilic character by increasing surface wettability, and cell attachment was highest in the BCC15 and FCC grafts. In addition, the BCC15 graft was found to exhibit a 48% antibacterial effect against *Enterococcus faecalis*. As a result, the use of cellulose obtained from date pits in lattice grafts is considered a successful strategy that simultaneously provides the mechanical strength, biocompatibility, and antibacterial protection required for alveolar bone regeneration.

Keywords: Alveolar bone augmentation, BCC/FCC/Kelvin geometries, Lattice graft design, Nanocrystalline cellulose.

1. GİRİŞ

Alveolar kemik, dişleri ve dental implantları destekleyen ve çevreleyen önemli bir yapıdır. Bu yapının kaybı durumunda dental implantların başarılı bir şekilde yerleştirilmesi ve uzun vadeli kullanımı için kemik hacminin artırılması gereklidir (Heinemann ve ark.,2015). Kemik dokusunun hasar görmesi travma, tümör veya enfeksiyon gibi çeşitli nedenlerle ortaya çıkan ve kişilerin yaşam kalitesini ciddi şekilde etkileyen önemli bir klinik problemdir (Biermann ve ark.,2009). Bu tür durumlarda kemik dokusunun yeniden yapılandırılması ve iyileştirilmesi amacıyla kullanılan osteokondüktif greftler modern tedavi yaklaşımlarının vazgeçilmez araçlarından biri haline gelmiştir. Otogreftler, allogreftler ve sentetik greftler gibi geleneksel greft materyalleri kemik iyileşmesini destekleme açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Betz,2002) ancak bu materyallerin her birinin belirli sınırlamaları bulunmaktadır. Örneğin, otogreftler biyouyumluluk ve osteojenik potansiyel açısından standart olarak kabul edilse de donör saha morbiditesi ve sınırlı miktarda elde edilebilirlik gibi önemli dezavantajlara sahiptir (Baldwin ve ark.,2019). Allogreftler ise immünolojik reaksiyon riski ve enfeksiyon potansiyeli nedeniyle sınırlı kalabilmektedir (Dauber ve ark.,1990). Benzer şekilde sentetik greftler de mekanik dayanıklılık ve biyolojik uyumluluk açısından her zaman istenen performansı gösterememektedir (Sheikh ve ark.,2017). Bu sınırlamalar kemik doku mühendisliği alanında yeni nesil biyomalzemelerin geliştirilmesini gerekli hale getirmiştir. Son yıllarda nanoteknoloji ve biyomalzeme mühendisliğindeki ilerlemeler kemik greftlerinin tasarımında yenilikçi yaklaşımların önünü açmıştır. Bu bağlamda nanokristalin selüloz (CNC) biyomalzeme araştırmalarında dikkat çeken bir malzeme olarak öne çıkmıştır (Alavi,2019). Selüloz, doğada bol miktarda bulunan yenilenebilir ve çevre dostu bir biyopolimerdir (Halib ve ark.,2017). CNC, selülüzün nanometre ölçeğinde kristal yapıya sahip bir formudur ve yüksek mekanik dayanımı, biyouyumluluğu ve düşük toksisitesi sayesinde biyomedikal uygulamalarda büyük bir potansiyele sahiptir (Karimian ve ark.,2019). CNC'nin kemik doku mühendisliğinde kullanımı hem mekanik dayanıklılık hem de kemik hücreleri gelişimi açısından umut vadetmektedir. CNC'nin yüzey yapısının kolayca değiştirilebilmesi, hücrelerin yüzeye daha iyi tutunmasını ve daha hızlı çoğalmasını desteklemekte, bu durum da biyolojik süreçlerin daha verimli hale getirilmesine katkı sağlamaktadır (Tortorella ve ark.,2020). Bu gelişmeler doğrultusunda, doku mühendisliğinde istenen yapısal ve biyolojik özelliklerin bir arada sağlanabilmesi için üretim teknolojilerinin de gelişmiş ve esnek tasarım kabiliyetlerine sahip olması gerekmektedir. 3B (üç boyutlu) yazıcı teknolojisi biyomalzemelerin karmaşık geometrilerde ve hastaya özel tasarımlarda üretilmesine olanak tanıyarak kişiselleştirilmiş tıbbi çözümler geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Guzzi ve Tibbitt,2020). Geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında 3B yazıcılar önemli bir tasarım esnekliği sunmaktadır. Örneğin, 3B yazıcı teknolojisi, kemik greftlerinin hastanın

anatomik yapısına tam uyum sağlayacak şekilde tasarlanmasına ve üretilmesine olanak tanımaktadır (Bisht ve ark.,2021). Bu bağlamda, CNC kullanılarak 3B yazıcıda üretilen greftler hem mekanik dayanıklılık hem de biyolojik uyumluluk açısından yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak bu tür yenilikçi greftlerin klinik uygulamalara aktarılabilmesi için öncelikle *in vitro* koşullarda mekanik ve biyolojik performanslarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir (Sallent ve ark.,2020). Kemik greftlerinden beklenen temel özellikler arasında, kemik yapıcı hücrelerin greft yüzeyine kolayca tutunabilmesi, sayıca artabilmesi ve sağlıklı bir kemik dokusu oluşturacak şekilde gelişebilmesi yer almaktadır. Bu tür özellikler, greftlerin klinik uygulamalarda güvenli ve etkili bir şekilde kullanılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu tez çalışması hurma çekirdeğinden elde edilen bitkisel kaynaklı CNC kullanılarak 3B yazıcı teknolojisi ile üretilen greftlerin mekanik dayanımı ve biyoyumluluğu *in vitro* koşullar altında incelenmiştir. Çalışmada, üretilen greftlerin kemik doku mühendisliği uygulamalarındaki potansiyelinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, greftlerin mekanik dayanımı, kimyasal karakterizasyonu ve biyoyumluluğu detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, kemik doku mühendisliği alanında CNC tabanlı biyomalzemelerin kullanımına ilişkin önemli veriler sunmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Alveolar kemiğinin eksik kısmının onarılmasında otojen greftler, ptfe-membranlar, ksenogreftler gibi birçok yaklaşım klinik uygulamalarda kullanılmaktadır. Geleneksel otojen blok kemik greftleri yüksek biyouyumluluğu ve osseointegrasyon kabiliyeti ile etkili bir yöntem olmasına rağmen (Schwartz-Arad ve ark.,2005) bazı dezavantajları vardır. Vücudun iki farklı yerinden ameliyat yapılması gereksinimi, kemiğin alındığı bölgede sonradan oluşabilecek sorunlar, ameliyat sonrası yaşanan ağrılar ve yerleştirilen kemik parçasının zamanla eriyip kaybolması gibi nedenlerle bu yöntem her zaman en iyi seçenek olmamaktadır (Starch-Jensen ve ark.,2020). Çene kemiğindeki hasar geniş bir alanı kapsıyorsa ağız içindeki bölgelerden yeterli miktarda kemik elde edilememektedir. Bu gibi durumlarda eksikliği tamamlamak için kalça kemiğinden parça alınması zorunluluğu doğabilir (Fretwurst ve ark.,2015). Geniş alveolar kemik defektlerinde tercih edilebilen kalça kemiğinden kemik grefti alım prosedürleri özellikle komplikasyon riski nedeniyle dikkatli değerlendirilmesi gereken bir işlemdir. Bilimsel çalışmalarda kalça kemiğinden greft almanın riskli olabileceği belirtilmektedir. Dimitriou ve ark. (2011) bu işlemten sonra kemiğin erimesi, enfeksiyon, morarma ve kronik ağrı gibi komplikasyonların görülme oranının %19 gibi yüksek bir seviyede olduğunu saptamıştır. Sethi ve ark. (2020), Tosun ve ark.(2019) yaptıkları çalışmalarda greft maruziyeti, enfeksiyon, hematoma ve donör bölgesinde uzun süreli ağrı gibi greft eldesinden sonraki önemli yan etkilere dikkat çekmişlerdir. Katz ve ark. (2021) özellikle yaşlı hastalarda yürüyüş bozuklukları ve uyuşma gibi yan etkilerin iliak greft cerrahisi sonrası sık görülen komplikasyonlar arasında olduğunu vurgulamışlardır. Almainan ve ark.nın (2013) da çalışmalarında benzer şekilde şişmiş yumrular ve uyuşma gibi nadir ama rahatsız edici komplikasyonların görülebileceğini bildirmişlerdir. Kalça kemiğinden greft almanın beraberinde getirdiği bu riskler hem verici hem de alıcı bölgede hastanın yaşam kalitesini ciddi şekilde bozabilir. Bu nedenle söz konusu yöntemin klinik kullanımı bu olumsuzluklar sebebiyle kısıtlanabilmektedir. Bu sınırlamalar biyouyumlu ve sürdürülebilir alternatif materyallerin geliştirilmesi ihtiyacını arttırmaktadır. Politetrafloroetilen (PTFE) ve titanyum destekli membranlar kemik rejenerasyonu için etkili bir seçenek olsa da ciddi komplikasyon riskleri taşımaktadır ve otojen greftlere göre ameliyat sonrası iyileşme döneminde açığa çıkma riski açısından daha yüksek bir komplikasyon oranına sahiptir. Herzberg (2017) çalışmasında, titanyum destekli d-PTFE (Yoğun Politetrafloroetilen) membranlarla yapılan işlemlerde ameliyat kesisi yerinde yaranın tekrar açılması, küçük doku parçalarının yerine tam olarak oturtulmasında yaşanan zorluklar ve kesi yerlerinin tam olarak kapanmaması durumunda membranların sıkça açığa çıktığını belirtmiştir. Bu durumun da greft stabilitesini bozduğunu, tedavi başarısını olumsuz etkilediğini ifade etmişlerdir. Ronda ve ark. (2014) d-PTFE ve e-PTFE (Genişletilmiş PTFE) membranların açığa çıkma oranının %20-30 arasında değiştiğini

ve bu durumun enfeksiyon riskini artırarak greft başarısını olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir. Membran çıkarımının özellikle e-PTFE membranlar için zor olduğunu ve tedavi sürecini olumsuz etkilediğini de vurgulamışlardır. Gallo ve Díaz-Báez (2019) ise çalışmalarında enfeksiyon ve PTFE membran maruziyetinin greft kaybının ana nedenleri arasında yer aldığı ve özellikle üst çenenin ön bölgesinde bu komplikasyonların daha sık görüldüğünü ifade etmişlerdir. Bu komplikasyonlar PTFE ve titanyum destekli membranların kullanımını sınırlayabilecek önemli zorluklar olarak öne çıkmaktadır ve bu tekniklerin yüksek hassasiyet gerektirdiğini göstermektedir. Membranların doğru uygulanması ve ameliyat sonrası bakım sağlanmasının kritik olduğu bu durum otojen greftlere kıyasla bu materyallerin kullanımını sınırlayan önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Ksenogreftler, allojen greftler ve alloplastik greftler gibi alternatif materyaller membranlara ek olarak klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu materyaller enfeksiyon riski, immünolojik reaksiyonlar, yavaş entegrasyon süreçleri ve doğal kemiğe benzer fakat kemik olmayan bir bağ dokusu formasyonu oluşturması gibi dezavantajlara sahiptir (Nappe ve ark.,2016). Bu nedenle çevre dostu, biyouyumlu ve etkili alternatiflerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu noktadan yola çıkılarak doğal ve sürdürülebilir CNC kullanılarak geliştirilen greftler antimikrobiyal, kişiye özel üretilebilen ve biyomimetik özellikler sunmaktadır. Selüloz ve türevleri biyoyumlulukları, mekanik özellikleri ve çok yönlülükleri nedeniyle greft üretimi için umut vadeden malzemeler arasında yer almaktadır. Son dönemde yapılan çalışmalar, CNC ve bakteriyel nanoselüloz dahil olmak üzere nanoselülozun klinik uygulamadaki potansiyelini ortaya çıkarmış ve geleneksel malzemelere kıyasla üstün mekanik performans gösterdiğini ve *in vivo* kemik rejenerasyonunu desteklediğini ortaya koymuştur (Bakhiet ve ark.,2023; Ferreira ve ark.,2019; Gao ve ark.,2020; Tripathi ve ark.,2022). Selülozun doğada çok fazla bulunması ve yapısının kolayca değiştirilebilmesi tıp alanında büyük avantaj sağlamaktadır. Bilimsel çalışmalar, selüloz sayesinde ilaç taşıyıcı sistemler ve yapay doku üretimi gibi alanlarda kullanılabilecek hidrojellerin geliştirilebildiğini göstermektedir (Gumrah,2017). Genel olarak selüloz, gelecekteki greft teknolojileri için uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır. Özellikle bitkisel selüloz nanofiberleri kemik dokusunun mekanik özelliklerini taklit edebilme kapasitesi ile dikkat çekmekte ve nanokompozit yapılar içinde kullanıldığında doku mühendisliği uygulamaları için umut vaat etmektedir. Bu özelliklerinin yanında, selülozun yüzeyine biyolojik aktif moleküller eklenerek hücre adezyonu artırılabilen ve doku entegrasyonu desteklenmektedir (Gardner ve ark.,2008;Patil ve ark.,2022;Tarrahi ve ark.,2022). Literatürdeki çalışmalara bakıldığında alveoler kemik ogmentasyonu için kullanılmak üzere üretilen greftlerden beklenen birtakım özellikler vardır. Bunlardan ilki ağız ortamında cerrahi bölgeyle veya greftle temas edebilecek tükürük, kan gibi biyolojik sıvılar ile greftin temas yüzeyi arasındaki etkileşim nedeniyle malzemenin yüzey özelliklerinin önem taşımasıdır. Antibakteriyel kaplamalar greft ilişkili enfeksiyonları önlemede büyük bir potansiyele sahiptir.Bakteriyel biyofilm oluşumunu engellemek ve greft yüzeylerinde enfeksiyon riskini azaltmak

için antibiyotik salınımı optimize edebilen polimer kaplamalar geliştirilmiştir. Bu kaplamaların dayanıklılığı ve mekanik stabilitesi de literatürde başarılı bulunmuştur (Jahanmard ve ark.,2020). İkinci olarak ağız içerisinde kullanılan kemik greftleri çeşitli fonksiyonel yüklere maruz kalmaktadır bu nedenle greftlerin mukavemet ve mikrosertlik gibi mekanik özelliklerinin yüksek olması beklenmektedir (Cavo ve Scaglione,2016; Lu ve ark.,2003). Başka bir önem taşıyan konu ise alveoler kemik ogmentasyonu uygulamalarında kullanılan greftlerin hastanın ağızına uygun bir şekilde yerleştirilebilmesi gerekliliği nedeniyle greftlerin boyutsal doğruluğunun ve toleranslarının yüksek olması beklenmektedir (Yashidome ve ark.,2021). 3B baskı teknolojisinin sunduğu tasarım esnekliği, kompleks geometriye sahip küçük dental parçaların hassas üretimini mümkün kılmaktadır. Özellikle Stereolitografi (SLA) ve Dijital ışık işleme (DLP) yazıcılarının yüksek çözünürlükte katmanlama özellikleri sayesinde küçük boyutlu detayların korunması ve hassas uyum sağlanması için uygun olduğu bilinmektedir (Kumar ve ark.,2020). Literatürde de gösterildiği üzere, selüloz ve türevleri dental uygulamalarda istenen pek çok özelliği karşılayabilecek nitelikte olup selülozun nanokristal formu yüksek biyouyumluluk ve mukavemet özellikleri ile dental greft materyalleri için uygun niteliktedir. Ayrıca selüloz katkılı malzemelerin biyobozunur yapısı greftlerin kemik ile uyumlu yapısı sayesinde greftin zamanla vücut tarafından yavaşça çözülmesini sağlayarak yerini doğal kemiğe bırakabilmektedir bu da çevre dokularla uyumlu bir entegrasyon sağlarken iyileşme sürecini hızlandırabilmektedir (Dutta ve ark., 2021). Selüloz nanoliflerinin yapısal özellikleri greftlerin yüzey alanını artırır ve gözenekli yapısı sayesinde yeni hücre oluşumunu destekleyerek implantın kemikle daha hızlı ve sağlam kaynaşmasını sağlar. Bu durumun greftin kemikle daha güçlü bir bağ oluşturmaya olanak tanıyarak iyileşme sürecini hızlandırdığı ve greftin rezorpsiyon sürecini uzattığı bilinmektedir (Bayir ve ark., 2019; Hasan ve ark., 2018). Araştırmalar, bitkisel kaynaklı nano yapıları selülozun yüksek dayanıklılık ve biyouyumluluk gösterdiğini, bu özelliklerin greftlerin dokuya iyi uyum sağlamasına ve iltihaplanma riskinin azalmasına yardımcı olduğunu göstermiştir (Čolić ve ark.2015; Modulevsky ve ark., 2016). Çeşitli alanlarda uygulama için büyük bir potansiyele sahip olmasına rağmen selülozun yaygın kullanımı esas olarak endüstriyel kullanımla sınırlı kalmıştır ve biyomedikal alana yönelik daha az ilgi görmüştür. Fakat biyomedikal implant uygulamaları için ilgi çeken yeni bir biyomalzeme sınıfı olarak son yıllarda literatürde yerini almıştır (Hafilah ve Nandiyanto,2022). Nanoselüloz gibi ileri teknoloji ürünü selüloz türevlerinin greft biyomühendisliği başta olmak üzere geniş bir biyomedikal uygulama yelpazesinde daha fazla araştırılması ve kullanılması gerekmektedir. Literatür taramasında kullanılan referanslar Şekil 1'de gösterilen haritalandırma ile kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

sürdürülebilirlik açısından bu atığın değerlendirilmesi döngüsel ekonomi prensiplerini desteklemektedir. Hurma çekirdeğinden CNC üretim sürecinin maliyetlerini genel bir çerçevede sunmak amaçlı hazırlanan örnek maliyet analizi Tablo 2’de sunulmuştur.

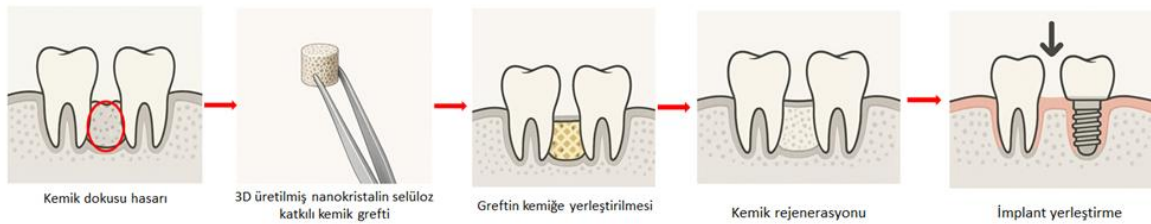
Tablo 2. Hurma çekirdeğinden CNC selüloz üretimi örnek maliyet analizi.

Kalem	Miktar	Birim Maliyet(TL)	Toplam Maliyet(TL)
Hammadde(Hurma Çekirdeği)	100 kg	1,50	150,00
Soda (NaOH)	10 kg	20,00	200,00
Klor (Beyazlatma için)	5 kg	25,00	125,00
Asit (Hidroliz için)	5 kg	30,00	150,00
Enerji (Elektrik ve Isıtma)	50 kWh	2,00	100,00
Su Tüketimi	500 L	0,50	250,00
İşçilik	10 saat	50,00	500,00
Cihaz Bakım ve Amortisman			300,00
Toplam Maliyet			1.775,00

Sonuç olarak bitkisel kaynaklı selülozun dental alanda kullanımı hem mekanik hem de biyolojik gereksinimlere uyum sağlayan çok yönlü özellikleriyle dikkat çekmektedir. Greftlerin uzun vadeli başarısını artıracak şekilde biyouyumlu, mekanik olarak dayanıklı ve bakteriyel enfeksiyonlara karşı dirençli bir yapı sunan selüloz gelecekteki biyomedikal uygulamalar için büyük bir potansiyele sahiptir.

2.1. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışması, geleneksel greft materyallerinin sınırlamalarını aşarak doğal kemiğin anatomisini taklit eden, kişiye özel üretilebilen ve çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Çalışma, hem biyoteknoloji hem de dental cerrahi alanlarında önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. CNC’nin üstün mekanik özellikleri, biyouyumluluğu ve 3B yazıcıda üretilebilirliği bu tez çalışmasını mevcut yöntemlerden ayıran temel unsurlardır. Tez çalışmasının temel amacı doğrultusunda, kemik dokusu hasarı sonrası dental implant uygulamaları için geliştirilen selüloz katkılı lattice greftlerin rolünü açıklayan şematik görsel Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 2’de, kemik hasarından başlayarak 3B yazıcı ile üretilen CNC katkılı kemik greftinin yerleştirilmesi, kemik rejenerasyonu süreci ve son olarak implantın yerleştirilmesi aşamalarını özetlemektedir.



Şekil 2. Dental implant uygulamaları öncesi kemik dokusu hasarının giderilmesinde 3B yazıcı ile üretilmiş CNC katkılı lattice greftlerin kullanımını ve kemik rejenerasyon süreci.

2.2. Çalışmanın Önemi ve Özgünlüğü

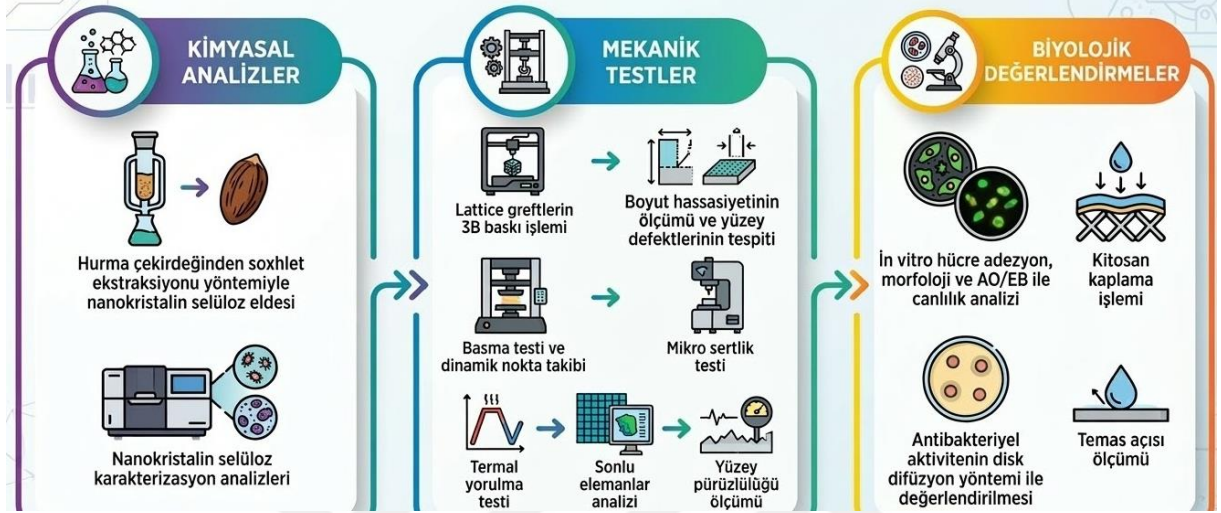
Bu tez çalışması; makine mühendisliği, biyomühendislik, malzeme bilimi ve diş hekimliği disiplinlerini bir araya getirerek, CNC katkılı lattice dental greftlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Multidisipliner bir yaklaşımla yürütülen çalışmada, biyouyumluluk ve mekanik dayanıklılık gibi temel bilimsel parametreler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmada, literatürde sıklıkla tercih edilen birim hücre tasarımlarından yararlanılarak geliştirilen selüloz katkılı lattice dental greftlerin, biyolojik sistemlerle olan uyumunun artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca, söz konusu greftlerin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi ve mekanik özelliklerinin ayrıntılı analizi için ileri düzey karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde, selüloz katkılı malzemelerin dental greft olarak kullanımına ilişkin çalışmaların oldukça sınırlı olduğu ve selülozun bu alandaki potansiyelinin yeterince ortaya konulmadığı görülmektedir. Bu doğrultuda sunulan çalışma; selüloz katkılı lattice dental greftlerin mekanik özelliklerini, yüzey yapısını, biyouyumluluğunu ve antibakteriyel aktivitelerini araştırarak literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamakta ve alana yönelik yenilikçi yaklaşımlar önermektedir. Belirlenen amaçlar kapsamında, selülozun biyouyumlu reçinelerle kürlenmesi ve 3B baskı yöntemiyle prototip lattice dental greft modellerinin üretilmesi planlanmaktadır. Ek olarak, selülozun doğada bol miktarda bulunması, yenilenebilir bir kaynak olması ve düşük maliyetli üretime imkân tanınmasıyla ekonomik ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin geliştirilmesi çalışmanın temel hedefleri arasında yer almaktadır. Sonuç olarak bu tez çalışmasının; nanokristalin selüloz katkılı lattice dental greftlerin tasarımı, üretimi ve karakterizasyonuna ilişkin bilimsel literatüre katkı sağlaması ve gelecekte klinik uygulamalara uyarlanabilecek yenilikçi biyomateryal çözümlerine zemin hazırlaması beklenmektedir. Literatürdeki mevcut boşluklar ve bu çalışmanın literatüre sağladığı özgün katkılar Tablo 3'te sunulmuştur

Tablo 3. Çalışmanın konuya olan bilimsel katkısı ve literatürdeki boşluklar.

Literatürdeki Boşluklar	Çalışmanın Literatüre Katkısı
• Uzun vadeli klinik veri eksikliği • Farklı selüloz türevlerinin karşılaştırmalı çalışmaları • Mekanik dayanıklılık • Bakteriyel adezyon • Selülozun diğer biyomalzemelerle kombinasyonu	• Biyouyumluluk çalışmaları ile yeni veriler sunulmuştur. • Literatürde daha önce çalışılmamış veya az araştırılmış bir selüloz türeyle ilgili yeni biyomekanik ve biyolojik bilgiler sağlanmıştır. • Biyomekanik performansı iyileştirmeye yönelik yeni yöntemlerle klinik uygulanabilirlik artırılabilecektir. • Bakteriyel adezyonun etkileriyle ilgili yeni bulgular elde edilecektir. • Selülozun kitosan gibi biyomalzemelerle kombinasyonunun biyomekanik etkileri araştırılacaktır.

2.3. Çalışmanın Organizasyon Şeması

Bu tez çalışması kimyasal analizler, mekanik testler ve biyolojik değerlendirmeler olmak üzere 3 temel iş paketi altında yürütülmüştür. Çalışmada bulunan iş paketlerinde uygulanan yöntem ve araştırma tekniklerinin aşamaları Şekil.3'de gösterilmektedir.

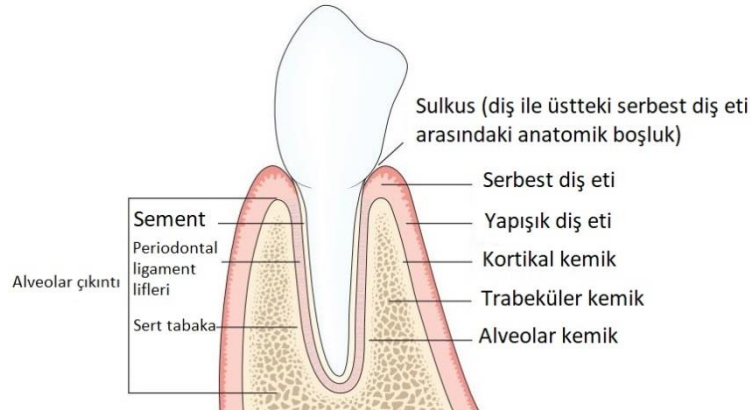


Şekil 3. Tez çalışması iş akışı.

3.GENEL BİLGİLER

3.1. Alveolar Kemik Anatomisi

Alveolar kemik, diş köklerini çevreleyen ve destekleyen özelleşmiş kemik dokusudur. Maksilla ve mandibulada bulunan alveolar çıkıntıların bir parçasıdır ve diş soketlerini içermektedir. Alveolar kemik; dış kortikal tabaka, iç trabeküler kemik ve diş soketini çevreleyen lamina dura olmak üzere üç ana bileşenden oluşur (Lang ve Lindhe, 2015). Alveolar kemik, sürekli yeniden şekillenme sürecine tabidir ve bu süreç osteoblastlar (kemik oluşturan hücreler) ile osteoklastlar (kemik rezorbe eden hücreler) arasındaki dengeye bağlıdır. Diş çekimi sonrasında alveolar kemik erimesi meydana gelmekte olup, ilk yıl içinde horizontal boyutta %50'ye, vertikal boyutta ise %30'a varan kayıplar görülebilmektedir (Schropp ve ark., 2003). Kemik erimesi, implant yerleştirilmesi için gerekli kemik hacmini önemli ölçüde azaltabilir. Alveolar kemik rejenerasyonu, temelde birbirini tamamlayan üç biyolojik süreci içermektedir. Bunlar; osteogenez, osteoindüksiyon ve osteokondüksiyon süreçleridir. Osteogenez, canlı osteoblastların doğrudan yeni kemik dokusu sentezlemesiyle gerçekleşen kemik oluşumunu ifade eder. Osteoindüksiyon; mezenkimal kök hücrelerin osteoblastlara farklılaşmasını uyaran biyokimyasal sinyaller ve büyüme faktörleri aracılığıyla yürütülen bir süreçtir; böylece yeni kemik oluşturmaya yetkin hücre popülasyonunun ortaya çıkmasını sağlar. Osteokondüksiyon ise yeni kemik oluşumu için hücrelerin tutunmasına, göç etmesine ve organize olmasına olanak tanıyan, iskelet görevi gören bir taşıyıcı yapının sağlanması olarak tanımlanmaktadır (Buser ve ark., 2017). Bu üç mekanizma birlikte işleyerek alveolar kemik dokusunun yenilenmesini ve fonksiyonel kemik yapısının yeniden kazanılmasını sağlar. İdeal bir kemik grefti bu üç süreci de desteklemelidir (McAllister ve Haghighat, 2007). Kemik kayıpları, diş implantı uygulamalarında tedavinin önünde önemli bir engel teşkil etmektedir. Çeşitli travmatik olaylar (periodontal hastalıklar, onkolojik patolojiler, diş kaybı vb.) sonucunda sert ve yumuşak doku hasarları oluşabilir; bu yüzden ideal implant konumlandırması ve öngörülebilir tedavi sonuçları için ogmentasyon prosedürleri gereklidir (Naenni ve ark., 2019). Bu nedenle alveolar kemik ile diş, periodontal ligament, sement, lamina dura ve diş eti dokuları arasında bir bütünlük olması gerekmektedir. Şekil 4'te dişin, periodontal ligamentin, sementin, lamina duranın, alveolar kemiğin ve diş eti dokularının anatomik ilişkisi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4. Dişin anatomik bileşenleri (Chu ve ark.,2014).

3.2. Alveolar Kemik Ogmentasyon Teknikleri

Günümüzde alveolar kemik ogmentasyonu için standart yöntem otojen kemik greftleridir. Ancak otojen greftlerin sınırlı miktarda elde edilebilmesi, donör bölge morbiditesi ve ek cerrahi işlem gerektirmesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle sentetik kemik greft malzemelerinin geliştirilmesi kemik doku mühendisliğinin önemli bir odak noktası haline gelmiştir. Sentetik kemik greft malzemeleri osteokondüktif (kemik hücrelerinin tutunması ve büyümesi için uygun bir iskele sağlama), osteoindüktif (mezenkimal kök hücrelerin osteoblastlara farklılaşmasını uyarma) ve osteojenik (kemik oluşturuıcı hücreleri içerme) özelliklere sahip olmalıdır. Ayrıca bu malzemeler biyouyumlu, biyobozunur, mekanik olarak stabil ve defekt bölgesine uygun şekilde şekillendirilebilir olmalıdır. Kemik defektlerinin varlığında çeşitli kemik ogmentasyon teknikleri uygulanmaktadır. Temel alveolar kemik ogmentasyon teknikleri şunlardır:

- Yönlendirilmiş Kemik Rejenerasyonu
- Otojen Onlay Blok Kemik Greftleme
- Alveolar Kret Ayırma
- Maksiller Sinüs Ogmentasyonu
- Distraksiyon Osteogenezi

3.2.1. Yönlendirilmiş Kemik Rejenerasyonu

Yönlendirilmiş kemik rejenerasyonu, yeni kemik oluşumu için uygun alan yaratmak amacıyla bariyer membranlar kullanılan bir tekniktir (Retzepe ve Donos,2010). Bariyer membranların kullanımı yumuşak doku çökmesini ve osteojenik olmayan hücrelerin kemik defektine göçünü önler. Ayrıca greft materyallerinin stabilizasyonu ve yumuşak doku büyümesinin önlenmesi yoluyla kemik oluşumu için ideal bir ortam sağlar (Liu ve Kerns,2014). Yönlendirilmiş kemik yenileme işlemi çene kemiğindeki dikey veya yatay çökmeler, kemik yüzeyindeki pencere şeklindeki delikler, diş kökünün açığa çıktığı

yarıklar, hem boyuna hem enine oluşan büyük kayıplar, implant çevresindeki iltihaplı erimeler ve diş çekimi sonrası oluşan boşlukların tedavisinde kullanılır (Khojasteh ve ark.,2017).

3.2.2. Otojen Onlay Blok Kemik Greftleme

Otojen onlay blok greftleme, hastanın kendi kemiğinden alınan kalıp şeklindeki bir parçanın eksik olan çene kemiği yüzeyine eklenmesi ve oraya tutturulması işlemidir (Waasdorp ve Reynolds,2010). Bu yöntem özellikle çene kemiğinin aşırı derecede eridiği ve kemik duvarlarından sadece birinin kaldığı büyük boşluklarda tercih edilmektedir (Schorn ve ark., 2021). Bu tekniğin en büyük avantajı yeni kemik hücresi içermesi, hücreleri kemik yapmaya teşvik etmesi ve yeni kemik oluşumu için sağlam bir iskele görevi görmesidir. Ayrıca çok ileri seviyedeki kemik kayıplarında bile etkili olması ve sonuçlarının önceden tahmin edilebilir olması önemli artılarıdır (Paderni ve ark., 2009). Ancak yöntemin bazı zorlukları da vardır. Bunlar arasında kemiğin alındığı bölgede ağrı veya hasar oluşması, alınabilecek kemik miktarının kısıtlı olması ve nakledilen kemiğin zamanla erime riskidir. Kemik parçasının alınabileceği bölgeler ise alt çene arkası, çene ucu, kalça kemiği, kafatası kemiği ve kaval kemiğidir (Reininger ve ark., 2016).

3.2.3. Alveolar Kret Ayırma

Daralmış çene kemiklerini genişletmek amacıyla kret ayırma adı verilen özel bir teknik uygulanmaktadır. Bu işlemde çene kemiği boylu boyunca ikiye bölünerek dış (yanak tarafı) ve iç (dil/damak tarafı) kemik duvarları arasında yeni bir yuva açılır (Bassetti ve ark., 2016). Bu yöntemin başarıyla uygulanabilmesi için kemik tepesinin en az 3-4 mm genişlikte olması, kemiğin yeterli yüksekliğe sahip olması ve dış çeperindeki sert tabakanın uygun kalınlıkta bulunması gerekir (Baumgaertel ve Hans,2009). Bu tekniğin en büyük artısı hastanın vücudunun başka bir yerinden kemik almaya gerek olmaması ve iyileşme sürecini hızlandırmasıdır. Uygulama aşamasında önce kemik üzerinde uzun bir hat boyunca kesi yapılır ve üzerindeki yumuşak dokular kenara çekilir. Ardından hassas kesim yapan özel cihazlar veya kemik şekillendirici aletler yardımıyla kemik ikiye ayrılır. Açılan bu aralığa kemik tozları doldurulur ve bölgeyi korumak amacıyla özel bir örtü ile kapatılır (Yaman ve Suer, 2013).

3.2.4. Maksiller Sinüs Ogmentasyonu

Maksiller sinüs ogmentasyonu, posterior maksillada yetersiz kemik yüksekliği durumunda implant yerleştirilmesi için kemik hacmini artırmak amacıyla yapılmaktadır (Esposito ve ark.,1996). Üst çenede sinüs boşluğunun alt kısmının yükseltilmesi için iki temel teknik kullanılmaktadır. Bunlardan ilki lateral pencere tekniğidir. Bu yöntemde sinüsün lateral duvarında bir pencere açılıp sinüs membranı yukarı kaldırılır ve oluşan boşluğa greft materyali yerleştirilir. Diğer yöntem ise

krestal yaklaşım olarak adlandırılır. Burada osteotomlar yardımıyla implant yuvası hazırlanırken sinüs tabanı yukarı doğru kırılır ve sinüsün iç yüzeyini kaplayan zar yukarı doğru kaldırılır (Adawi ve ark.,2019). Bu teknikler özellikle üst çenenin arka bölgesinde kemik yüksekliği 5 mm'den az olan ve implant yerleştirilmesi planlanan hastalarda kemik miktarının yetersiz olduğu durumlarda uygulanmaktadır (Malevez ve ark.,2003).

3.2.5. Distraksiyon Osteogenezi

Distraksiyon osteogenezi kemik segmentlerinin kademeli olarak ayrılması yoluyla yeni kemik oluşumunu uyaran bir tekniktir. Bu teknik özellikle vertikal kemik ogmentasyonu için kullanılmaktadır (McAllister ve Gaffaney,2003). Bu yöntemin avantajları arasında yumuşak dokunun genişlemesiyle birlikte aynı anda kemik oluşumunun sağlanabilmesi,büyük kemik kayıplarının onarımında etkili olması ve vücudun başka bir bölgesinden doku alınmasına gerek olmaması sayılabilir ancak bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu yöntem dikkatli bir uygulama gerektirmektedir ve hastanın tedaviye uyum göstermesi çok önemlidir. Ayrıca kullanılan distraktör cihazının görünür olması hastada rahatsızlık yaratabilir. Uygulama üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak kemik kesildikten sonra 5-7 gün süren bir bekleme dönemi vardır. Daha sonra kemik günde 0,5-1 mm arası bir hızla yavaşça ayrılır. Son olarak da 8-12 hafta süren bir süreçte yeni oluşan kemik güçlenir ve olgunlaşır (Rozis ve ark.,2021).

3.3. Kemik Graft Materyalleri

Kemik graft materyalleri kaynaklarına göre dört kategoriye ayrılır: Otojen, allojen,ksenojen ve alloplastik greftler (Ferraz,2023).

3.3.1. Otojen Greftler

Otojen greftler hastanın kendi vücudundan alınan kemik dokusudur. Bu kemikler ağız içinden (çene kemiği, çene ucu veya arka diş bölgesi vb.) ya da kalça kemiği, kafatası veya kaval kemiğinden alınabilir. Hastanın kendi kemiğinden alınan greftler kemik oluşumunu başlatma, kemik gelişimini destekleme ve yeni kemik oluşturma özelliklerine sahip oldukları için altın standart olarak kabul edilirler (Sakkas ve ark.,2017) ancak bu kemikler sadece sınırlı miktarda alınabilir, kemik alınan bölgede sorunlar yaşanabilir ve zamanla erime oranları yüksek olabilir.

3.3.2. Allojen Greftler

Allojen greftler aynı türün farklı bireylerinden elde edilen kemik dokusudur. Dondurularak kurutulmuş kemik allogrefti ve demineralize dondurularak kurutulmuş kemik allogrefti olmak üzere

iki formda bulunur. Osteokondüktif özelliklere sahiptirler ve sınırlı osteoindüktif potansiyel gösterebilir (Holtzclaw ve ark.,2008) ancak hastalık bulaşma riski taşırlar.

3.3.3. Ksenojen Greftler

Ksenojen greftler genellikle sığır, domuz veya mercan gibi farklı canlı türlerinden elde edilen kemik dokularıdır. Bu greftlerde organik maddeler uzaklaştırılır ve sadece kemik minerali kalır. Kemik oluşumunu destekleyici özellikleri vardır ve zamanla erime oranları düşüktür (Araújo ve ark.,2015) ancak hayvandan insana hastalık geçme riski ve bazı dini veya etik endişeler bu greftlerin dezavantajları arasındadır.

3.3.4. Alloplastik Greftler

Alloplastik greftler laboratuvarında sentetik olarak üretilen biyomalzemelerdir. Hidroksiapatit, trikalsiyum fosfat, biyoaktif cam ve kalsiyum sülfat gibi çeşitleri vardır. Kemik oluşumunu destekleyici özellikleri bulunur (LeGeros,2008).

3.4. Doku Mühendisliğinde Nanokristalin Selüloz Kullanımı

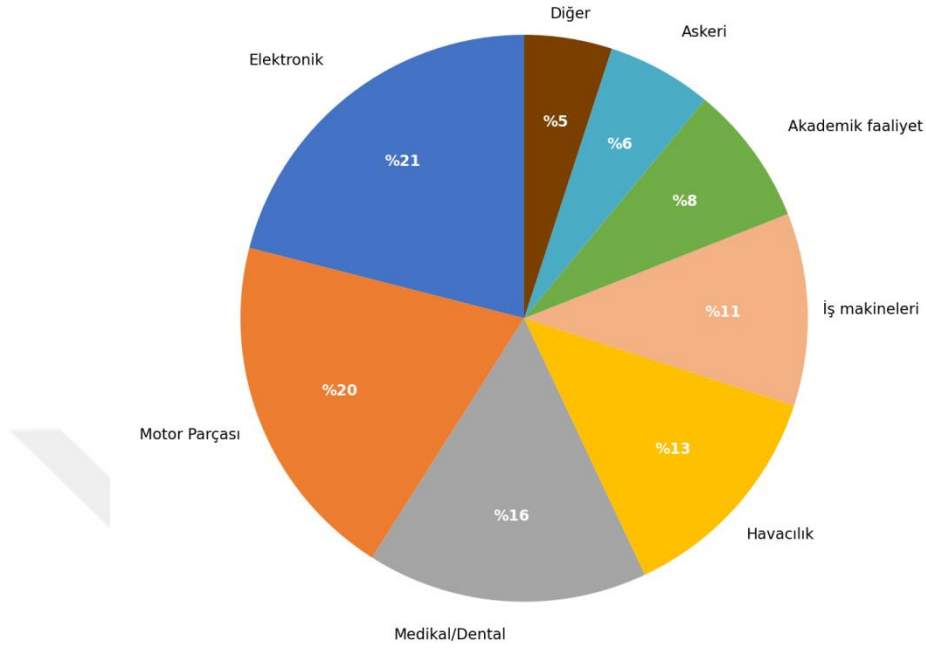
Kemik doku mühendisliği, kaybedilmiş veya hasar görmüş kemik dokusunun fonksiyonunu yeniden kazandırmayı amaçlayan; biyomalzeme bilimi, hücre biyolojisi ve biyoteknolojiyi bir araya getiren multidisipliner bir alandır (Ansari, 2019). Bu alandaki başarıyı belirleyen temel unsur, geliştirilen iskele materyallerinin doğal kemiğin hem mekanik dayanımını hem de biyolojik karmaşıklığını taklit edebilmesidir. Son yıllarda nanokristalin selüloz (CNC), üstün mekanik dayanımı, yüksek biyouyumluluğu ve yüzey özelliklerinin kolayca değiştirilebilmesi sayesinde kemik doku mühendisliğinde dikkat çeken yenilikçi bir malzeme haline gelmiştir (Murizan ve ark., 2020). CNC'nin önemli avantajlarından biri, doğada bol miktarda bulunan ve sürdürülebilir bir biyopolimer olan selülozdan elde edilmesidir. Pamuk, odun, bambu, keten ve kenevir gibi bitkisel kaynakların yanı sıra bazı bakteriler tarafından da üretilebilmesi, CNC'yi çevre dostu ve düşük maliyetli bir seçenek haline getirmektedir (Ramamoorthy ve ark., 2015). Bu doğal çeşitlilik, CNC'ye sentetik malzemelere kıyasla daha geniş bir üretim potansiyeli kazandırmaktadır. Literatürde, CNC'nin kompozit yapılara dahil edilmesiyle hem mekanik dayanımın hem de osteojenik potansiyelin belirgin şekilde arttığı gösterilmiştir (Ingole ve ark., 2019; Hong ve ark., 2021; N'gatta ve ark., 2022). Hidroksiapatit, kolajen ve çeşitli biyoyumlu polimerlerle kombine edilen CNC temelli iskelelerin, kemik rejenerasyonu için gerekli biyomekanik stabiliteyi ve biyolojik desteği sağladığı bildirilmektedir (Zhang ve ark., 2019). Bu iskelelerde kullanılan çapraz bağlama ve üç boyutlu üretim teknikleri, CNC'nin yapısal bütünlüğünü artırarak doku mühendisliğindeki etkinliğini güçlendirmektedir (Carlström ve ark., 2020; Mirtaghavi ve ark., 2020). Ayrıca, üç boyutlu CNC katkılı iskelelerin hücre kültürü ve doku rejenerasyonu

çalışmalarında yaygın olarak kullanılması, bu yapıların biyolojik açıdan elverişli bir mikro çevre sunduğunu göstermektedir (Cañas-Gutiérrez ve ark., 2023). CNC katkılı iskelelerin gözenekli yapısı; hücre tutunması, çoğalması ve farklılaşması için gerekli mikro çevreyi sağlarken, besin ve oksijen difüzyonunu kolaylaştırarak hücresel canlılığı artırmaktadır (Iravani ve Varma, 2022). Mekanik açıdan değerlendirildiğinde, CNC'nin yüksek çekme dayanımı ve sertliği, kemik doku mühendisliğinde ihtiyaç duyulan yapısal desteğin sağlanmasında kritik rol oynamaktadır (Murizan ve ark., 2020; Chesley, 2019; Ingole ve ark., 2019). Biyouyumluluk açısından da CNC önemli avantajlar sunmaktadır. Yapılan çalışmalar, CNC içeren malzemelerin bağışıklık sistemi hücrelerinde anlamlı bir inflamatuvar yanıt oluşturmadığını göstermektedir (Karimian ve ark., 2019; Čolić ve ark., 2020; Piasecka-Zelga ve ark., 2021). CNC'nin yüzey kimyasının hidroksil gruplarından oluşması, bu grupların farklı fonksiyonel gruplara dönüştürülebilmesine olanak tanımakta; böylece yüzey modifikasyonları ile CNC liflerinin biyolojik uyumu ve hücresel etkileşimleri artırılabilir (Tortorella ve ark., 2020; Sun ve ark., 2022; James ve ark., 2024). Bu tür yüzey modifikasyonları, iskelelerin doku entegrasyonunu güçlendirmektedir. Sonuç olarak, nanokristalin selüloz katkılı iskeleler; yüksek mekanik dayanım, biyouyumluluk, modifiye edilebilir yüzey özellikleri ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilebilirlik gibi avantajları sayesinde kemik doku mühendisliğinde umut vadeden bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. CNC'nin sunduğu bu çok yönlü özellikler, gelecekte klinik uygulamalarda geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

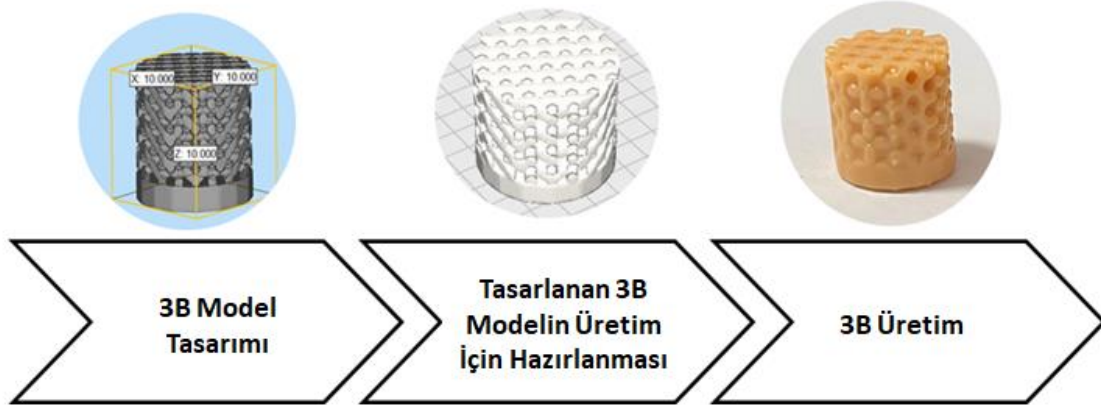
3.5. Polimer Biyomateryallerin Üretiminde Kullanılan 3B Baskı Teknikleri

Eklemeli imalat, katman katman malzeme ekleyerek karmaşık yapıların oluşturulmasını sağlayan bir teknolojidir (Bahnini ve ark., 2018). Bu teknolojinin biyomateryallerin 3B baskı yöntemleriyle üretilmesinde kullanılması, son yıllarda tıp ve diş hekimliği alanında önemli bir dönüşüm yaratmıştır. 3B baskı teknolojisi, karmaşık şekillere sahip, kişiye özel ve fonksiyonel biyomateryallerin hızlı ve hassas bir şekilde üretilmesini sağlar (Guvendiren ve ark., 2016). Böylece geleneksel üretim teknikleriyle elde edilmesi güç olan doku iskeleleri, greftler, implantlar ve protezler bu yöntemle kolayca üretilmektedir. Biyomateryallerin 3B baskısında en yaygın kullanılan yöntemler arasında Erimiş Biriktirme Modellemesi (FDM), Stereolitografi (SLA), Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Dijital Işık İşleme (DLP) ve Malzeme Püskürtme (MJ) gibi teknikler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin her biri, kullanılan malzeme türüne ve elde edilmek istenen yapının özelliklerine göre farklı avantajlar sunmaktadır. Özellikle diş hekimliği alanında 3B baskı teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte kişiye özel diş implantları, greftler, kronlar, köprüler ve ortodontik apareyler gibi ürünler çok daha hızlı ve hassas bir şekilde üretilmektedir (Rezaie ve ark., 2023). Bu teknolojiler, hastanın ağız yapısına tam uyumlu, estetik ve fonksiyonel çözümler sunarak tedavi süreçlerini hem hızlandırmakta

hem de hasta konforunu artırmaktadır. Şekil 5'te eklemeli imalatın sektörlere göre yüzdelik dağılımı ve Şekil 6'da bu tez çalışmasında kullanılan örnek bir modelin eklemeli imalat aşamaları verilmiştir.



Şekil 5. Eklemeli imalatın sektörlere göre yüzdelik dağılımı (Jiménez ve ark.2019).



Şekil 6. Üretilecek örnek selüloz katkılı lattice greftin eklemeli imalat aşamaları.

Eklemeli imalat yöntemleri farklı teknolojik yaklaşımlar ve malzeme türleriyle çeşitli endüstriyel ve medikal alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 4'de eklemeli imalatın temel yöntemleri, bu yöntemlerin İngilizce karşılıkları, kullanılan malzeme türleri ve başlıca uygulama alanları özetlenmiştir. Örneğin eritilerek yığılma modelleme (FDM) yöntemi genellikle termoplastik malzemelerle prototipleme ve eğitim amaçlı tercih edilirken seçici lazer sinterleme (SLS) ve seçici lazer eritme (SLM) gibi yöntemler daha çok fonksiyonel parça üretiminde kullanılmaktadır. Bu

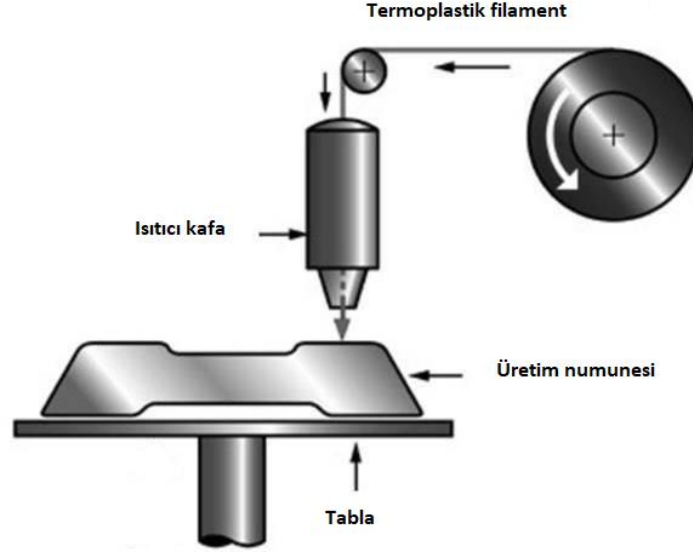
çeşitlilik eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel tasarımdan tıbbi uygulamalara kadar geniş bir yelpazede çözüm sunmasını sağlamaktadır.

Tablo 4. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırması.

Yöntem Adı	Teknoloji Adı (İngilizce)	Kullanılan Malzeme	Kullanım Alanları
• Eritilerek Yığma Modelleme	Fused Deposition Modeling (FDM)	Termoplastik (PLA,ABS)	Prototipleme,otomotiv,medikal
• Stereolitografi	Stereolithography (SLA)	Fotopolimer reçineler	Dişçilik,medikal.
• Seçici Lazer Sinterleme	Selective Laser Sintering (SLS)	Polimer tozları	Otomotiv,havacılık.
• Elektron Işınlı Eritme	Electron Beam Melting (EBM)	Metal tozları	Havacılık,medikal implant.
• Dijital Işık İşleme	Digital Light Processing (DLP)	Fotopolimer reçineler	Takı,dişçilik,prototipleme.
• Bağlayıcı Püskürtme	Binder Jetting	Metal,seramik	Endüstriyel parça,kalıp.
• Laminasyonlu Nesne Üretimi	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Kağıt,plastik, metal folyo	Mimari maket,prototipleme.
• Malzeme Püskürtme	Material Jetting(MJ)	Fotopolimer, balmumu	Prototipleme,dişçilik.
• Seçici Lazer Eritme	Selective Laser Melting (SLM)	Metal tozları	Havacılık,otomotiv,medikal.

3.5.1. Erimiş Biriktirme Modellemesi (FDM)

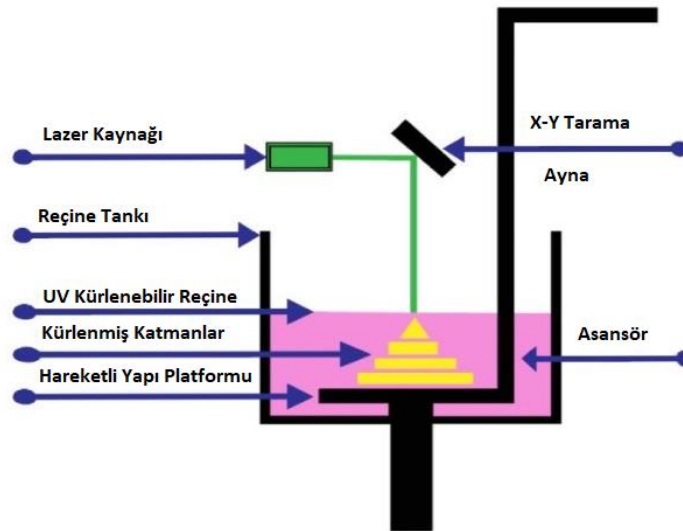
Erimiş biriktirme modellemesi (FDM), 3B baskı teknolojileri arasında en yaygın ve erişilebilir yöntemlerden biridir. Bu teknikte termoplastik polimer filament kontrollü bir şekilde ısıtılarak yarı akışkan hale getirilir ve bir nozuldan tabaka tabaka olacak şekilde yapı platformuna ekstrüde edilir (Rajan ve ark.,2022). Her bir katman bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerine göre üst üste eklenerek istenen üç boyutlu yapı oluşturulur. FDM'in en büyük avantajlarından biri farklı polimer türleriyle çalışabilme esnekliğidir. Polilaktik asit (PLA), polietilen tereftalat glikol (PETG) ve polikarbonat (PC) gibi biyoyumlu ve dayanıklı malzemeler biyomateryal uygulamalarında sıklıkla tercih edilir. Şekil 7'de FDM yönteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 7. FDM sistem şematiği (Telfer ve ark.,2012).

3.5.2. Stereolitografi (SLA)

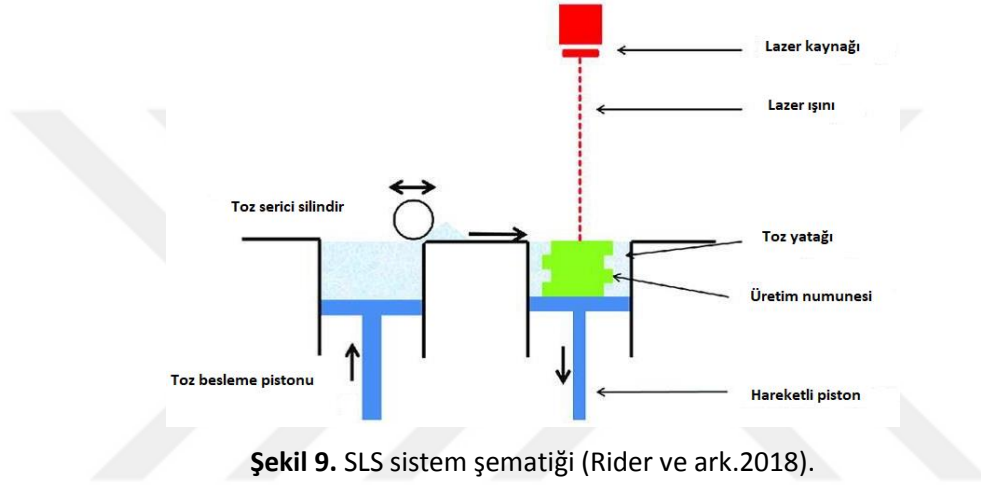
Stereolitografi (SLA), 3B baskı teknolojileri arasında en eski ve en hassas yöntemlerden biridir. Bu yöntemde sıvı haldeki fotopolimer reçine bir lazer ışını ile katman katman sertleştirilir. Baskı işlemi sırasında bir lazer ışını CAD verilerine göre reçine yüzeyinde hareket eder ve temas ettiği bölgelerde reçineyi polimerleştirerek katılaştırır (Guerro ve ark.,2019). Her katman tamamlandığında baskı platformu bir miktar aşağı iner ve yeni bir reçine tabakası üzerine bir sonraki katman oluşturulur. Bu süreç model tamamen oluşana kadar tekrarlanır. SLA'nın en büyük avantajı yüksek çözünürlükte ve pürüzsüz yüzey kalitesine sahip detaylı parçalar üretebilmesidir (Arnold ve ark.,2019). Bu nedenle karmaşık geometrilere sahip prototipler, dental modeller, tıbbi cihazlar ve hassas mühendislik parçaları üretiminde sıklıkla tercih edilir ve baskı sonrası parçaların temizlenmesi ve kürlenmesi gibi ek adımlar da gereklidir. Şekil 8'de SLA üretim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 8. SLA sistem şematiği (Husna ve ark.,2024).

3.5.3. Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Seçici Lazer Sinterleme (SLS), toz halindeki malzemelerin katman katman bir lazer ışını ile sinterlenerek üç boyutlu nesnelerin üretildiği bir eklemeli imalat teknolojisidir (Kumar ve ark.,2021). SLS yönteminde bir lazer ışını toz yatağının yüzeyinde belirlenen bölgeleri tarar ve bu bölgelerdeki tozları eriterek birleştirir. Her katman tamamlandığında yeni bir toz tabakası serilir ve işlem tekrarlanır. SLS yöntemi doğrudan vücuda temas eden medikal cihazların üretiminde güvenle kullanılmaktadır. Ayrıca hızlı prototipleme ve kişiye özel üretim imkanı sayesinde sağlık alanında yenilikçi çözümler geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Valls-Esteve ve ark.,2023). Şekil 9'da SLS üretim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

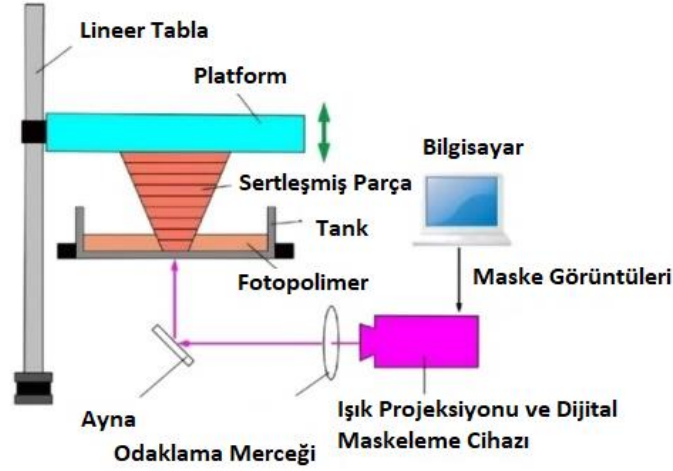


Şekil 9. SLS sistem şematiği (Rider ve ark.2018).

3.5.4. Dijital Işık İşleme (DLP)

Dijital Işık İşleme (DLP) üç boyutlu yazıcı teknolojilerinden biri olup sıvı haldeki fotopolimer reçinenin dijital bir projektör yardımıyla katılaştırılması esasına dayanmaktadır (Zhang ve ark., 2019). DLP yönteminde bir reçine tankı bulunur ve bu tankın alt kısmı şeffaftır. Alt kısımdan bilgisayar kontrollü bir dijital projektör ile her katmanın 2B (iki boyutlu) görüntüsü sıvı reçineye yansıtılır. Projektörden gelen ışık sadece istenen bölgelerdeki reçineyi anında sertleştirir. Her katman tamamlandığında platform bir miktar yukarı kaldırılır ve yeni bir katman için aynı işlem tekrarlanmaktadır. Bu süreç modelin tamamı oluşana kadar devam etmektedir. DLP teknolojisinin en önemli avantajlarından biri her katmanın tek seferde ışıqla sertleştirilmesidir. Bu sayede üretim süresi oldukça kısalmaktadır. Ayrıca DLP ile üretilen parçalar yüksek çözünürlükte ve pürüzsüz yüzey kalitesine sahip olur. Bu özellikler özellikle küçük ve karmaşık parçaların üretiminde büyük avantaj sağlamaktadır. DLP yöntemi sağlık ve dental alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Diş hekimliğinde hastaya özel diş modelleri, geçici kronlar, köprüler, ortodontik plaklar gibi hassas ve kişiye özel ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir (Tsolakis ve ark. ,2022). Tıp alanında ise cerrahi

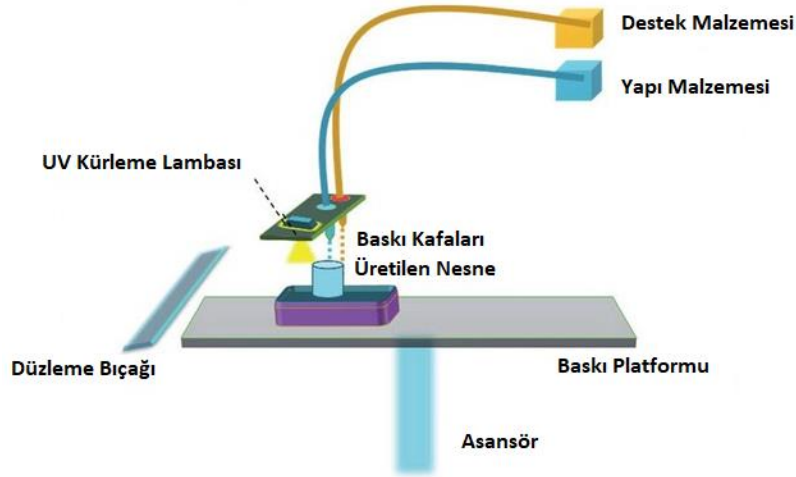
öncesi planlama için anatomik modeller, protezler ve küçük medikal cihazlar DLP ile üretilmektedir. Şekil 10’da DLP üretim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 10. DLP sistem şematığı (Ge ve ark.,2018).

3.5.5. Malzeme Püskürtme (MJ)

Malzeme püskürtme, 3B baskı teknolojileri arasında yer alan ve yüksek hassasiyetli, detaylı prototiplerin üretiminde kullanılan bir eklemeli imalat yöntemidir (Zhou ve ark.,2024). Bu yöntemde sıvı haldeki malzeme yazıcı kafasındaki çoklu nozüller aracılığıyla platform üzerine damlacıklar halinde püskürtülür. Her katman püskürtüldükten sonra genellikle bir ultraviyole lamba ile malzeme anında sertleştirilir (Fiedor ve Ortyl,2020). Bu işlem model tamamen oluşana kadar katman katman tekrarlanır. Malzeme püskürtme yöntemiyle çok yüksek çözünürlükte ve pürüzsüz yüzey kalitesine sahip parçalar üretilir (Udroiu ve ark.,2019). Bu yöntem prototip, medikal model, dişçilik, takı gibi hassasiyet gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılır. Avantajları arasında yüksek detay ve hassasiyet, pürüzsüz yüzey kalitesi ve çoklu malzeme ile renk kombinasyonları bulunur. Dezavantajları ise malzeme maliyetinin yüksek olması, mekanik dayanımın bazı diğer yöntemlere göre daha düşük olması ve üretim hızının modelin karmaşıklığına göre değişebilmesidir. Şekil 11’de MJ üretim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



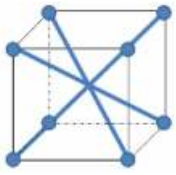
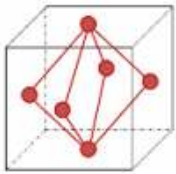
Şekil 11. MJ sistem şematiği (Gülcan ve ark.,2021).

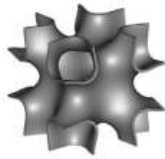
3.6. İskele (Scaffold) Yapılar

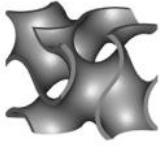
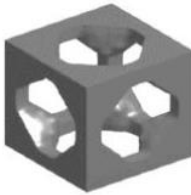
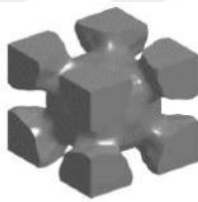
Dişçilik ve tıp alanında dokuların hasar görmesi ve bozulmasında metabolizma, doğumsal bozukluklar ve çeşitli hastalıklar önemli rol oynamaktadır (Deb ve ark.,2018). Doku mühendisliği, biyoloji ve tıp alanları ile birleşerek bu sorunlara çözüm bulmayı amaçlar ve özellikle organ veya doku nakline ihtiyaç duyan hastalar için yeni tedavi imkanları sunar. Diş hekimliğinde tasarlanan iskeleler doku mühendisliği ve doku rejenerasyonu açısından büyük önem taşır(Farzin ve ark.,2019). Bu iskeleler özellikle kemik grefti,periodontal tedavi ve implantoloji gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Chen ve ark.,2024). Kemik grefti uygulamalarında kaybedilen veya hasar gören çene kemiğinin yerine geçebilecek biyouyumlu iskeleler kullanılır (Zhao ve ark.,2021). Bu iskeleler kemik hücrelerinin tutunmasını, çoğalmasını ve yeni kemik dokusunun oluşmasını destekler. Periodontal tedavide ise diş eti ve çevre dokuların yenilenmesi için özel olarak tasarlanmış iskeleler kullanılır (Cheah ve ark.,2021) böylece hücrelerin göçünü ve farklılaşmasını teşvik ederek sağlıklı doku oluşumunu sağlar. İmplantoloji alanında ise diş implantlarının çevresinde kemik ve yumuşak doku entegrasyonunu artırmak için iskeleler ve biyomalzemelerden yararlanılmaktadır (Dobrzański ve ark.,2018). Araştırmalar bu iskelelerin deri,kıkırdak,kemik ve özellikle diş ve çene dokusu gibi sert dokuları taklit ederek insan yaşam kalitesini artırdığını göstermektedir (Sharma ve ark.,2014; Ornaghi ve ark.,2023; d'Avanzo ve ark.,2021). Dişçilik ve tıp uygulamalarında üretilen bu iskeleler hücrelerin yayılması,dokuların farklılaşması ve yenilenen dokuların mekanik özelliklerinin optimize edilmesi gibi temel gereksinimleri karşılamalıdır (Gašparovič ve ark.,2024; Lu ve ark.,2013). Bu yapıların genel sınıflandırması kullanılan malzeme türüne,üretim yöntemine ve yapısal özelliklerine göre yapılır. Malzeme türüne göre iskeleler doğal polimerler,sentetik polimerler,seramikler ve kompozitler olarak dört gruba ayrılır (Reddy ve ark.,2021). Doğal polimerler biyouyumluluk açısından avantajlıdır ancak mekanik dayanımları genellikle düşüktür. Sentetik polimerler ise kontrollü özellikler sunar ve üretimi kolaydır (Asti ve Gioglio,2014). Üretim yöntemine göre iskeleler geleneksel yöntemlerle veya ileri

Üretim teknikleriyle retilbilir (Montanheiro ve ark.,2022). Geleneksel yöntemler genellikle daha basit ve ekonomiktir ancak gözenek yapısı üzerinde tam kontrol sağlamak zordur (Loh ve Choong,2013). 3B baskı gibi ileri teknikler ise iskelelerin gözenek boyutu, şekli ve iç mimarisi üzerinde hassas kontrol imkanı sunar. Yapısal zelliklerine göre ise iskeleler gözenekli yapılar,lifli yapılar ve tabakalı yapılar olarak ayrılmaktadır (Bruřauskaitė ve ark.,2016). Gözenekli iskeleler hücrelerin içine g etmesini ve besinlerin taşınmasını kolaylaştırır,lifli yapılar ise özellikle kas ve sinir dokusu gibi yönlendirilmiş doku oluşumu için uygundur. Tabakalı yapılar da farklı doku tiplerinin bir arada bulunduğu bölgelerde kullanılır. Yapısal sınıflandırmada ayrıca stokastik (düzensiz) ve stokastik olmayan (lattice) iskeleler de önemli bir yer tutar(Borikar ve ark.,2023). Stokastik iskele yapıları gözeneklerin ve i mimarinin rastgele veya düzensiz bir şekilde dağılır ve doğal dokulara benzer bir yapı sergiler. Bu tür yapılar genellikle dondurarak kurutma,gaz köpürtme veya tuz çözündürme gibi geleneksel yöntemlerle üretilir (Adel ve ark.,2022). Stokastik yapılar hücrelerin g ve besinlerin taşınması için uygun bir ortam sağlar ve doğal dokuların heterojenliğini taklit eder ancak gözenek boyutu ve dağılımı üzerinde tam kontrol sağlamak zordur. Buna karşılık stokastik olmayan yani lattice yapılar düzenli ve tekrarlayan bir geometriye sahip iskelelerdir ve genellikle 3B baskı gibi ileri üretim teknikleriyle üretilir (Tao ve Leu,2016). Tablo 5’de literatürde yaygın olarak kullanılan kafes yapılarının genel bir zeti verilmiştir.

Tablo 5. Literatürde yaygın olarak kullanılan kafes yapıları.

Ana Kategori	Alt Yapı Tipi	Yapı Adı / rnekler	Görsel	Temel zellikler ve Avantajlar
CAD Tabanlı Kafes Yapıları	ubuk (Strut) Bazlı	HMK (BCC)		Hacim merkezli kübik yapı yüksek mukavemet ve rijitlik sunar (Lee ve ark.,2019).
		YMK (FCC)		Yüzey Merkezli Kübik (Face-Centered Cubic) yapı, iyi süneklik ve enerji emilimi özelliklerine sahiptir (Lee ve ark., 2019).
	Birim Hücre Bazlı	Kelvin		Kelvin hücresi köpük yapılarını taklit eder ve yüksek enerji emilimi sağlar (Zhang ve ark., 2020).

Ana Kategori	Alt Yapı Tipi	Yapı Adı / Örnekler	Görsel	Temel Özellikler ve Avantajlar
		Octet-truss		Yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve izotropik mekanik özellikleriyle bilinir (Lee ve ark., 2019).
		Gibson-Ashby		Hücresel yapıların mekanik özelliklerini tahmin etmek için kullanılan bir modeldir (Al-Ketan ve ark., 2018).
TPMS Tabanlı Kafes Yapıları	İskelet (Skeletal) Bazlı	İskelet IWP		Gerilme yığılmalarını azaltır ve hücre tutunması için geniş yüzey alanı sağlar (Temiz ve ark., 2024).
		İskelet Diamond		Elmas benzeri bir yapıya sahiptir, yüksek gözeneklilik ve biyouyumluluk sunar (Temiz ve ark., 2024).
		İskelet G (Gyroid)		Üç boyutlu, birbirine bağlı kanallara sahip bir yapıdır, akışkan transferi ve hücre büyümesi için idealdir (Temiz ve ark., 2024).
		Levha IWP		İskelet IWP'nin levha versiyonu, daha yüksek mekanik dayanım ve enerji emilimi sunar (Al-Ketan ve ark., 2018).
		Levha Diamond		İskelet Diamond'ın levha versiyonu, kemik dokusunun mekanik özelliklerine en yakın sonuçları vermektedir (Al-Ketan ve ark., 2018).

Ana Kategori	Alt Yapı Tipi	Yapı Adı / Örnekler	Görsel	Temel Özellikler ve Avantajlar
		Levha Gyroid		İskelet Gyroid'in levha versiyonu, yüksek mukavemet ve biyouyumluluk sağlamaktadır (Al-Ketan ve ark., 2018).
Topoloji Optimizasyonlu Kafes Yapıları	Fonksiyonel Tasarımlar	Bal Peteği (Honeycomb)		Yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve enerji emilimi özellikleriyle bilinir, hafif yapılar için idealdir (Mahmoud ve Elbestawi, 2017).
		Topoloji Tabanlı HMK		HMK benzeri yapılar, maksimum hafiflik ve hedeflenen mekanik performansı sağlar (Mahmoud ve Elbestawi, 2017).

4. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, lattice greftlerin yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla **kimyasal analizler**, dayanım performanslarını ölçmek amacıyla **mekanik testler** ve canlı sistemlerle etkileşimlerini incelemek amacıyla **biyolojik değerlendirmeler** olmak üzere üç ana kategoride ele alınmıştır.

4.1. Kimyasal Analizler

4.1.1. Hurma Çekirdeğinden Soxhlet Ekstraksiyonu Yöntemiyle Nanokristalin Selüloz Eldesi

Çalışmada, nanokristalin selüloz üretimi için uygun hammaddenin belirlenmesi amacıyla ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda lignoselülozik yapıya sahip farklı tarımsal atıklar değerlendirilmiş; hurma çekirdeği ve zeytin çekirdeği olmak üzere iki farklı hammadde ile karşılaştırmalı çalışmalar yürütülmüştür. Her iki hammadde için aynı ekstraksiyon, alkali işlem ve asit hidroliz deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen nanokristalin selülozun yapısal özellikleri, verim oranları ve morfolojik karakteristikleri analiz edilmiştir. Ön denemeler sonucunda, hurma çekirdeğinden elde edilen nanokristalin selülozun zeytin çekirdeğine kıyasla daha yüksek verim (hurma çekirdeği: ~%78, zeytin çekirdeği: ~%66), daha homojen kristal yapı sergilediği görülmüştür (Tablo 6).

Tablo 6. Farklı hammaddelerden üretilen nanokristalin selülozun özellikleri.

Özellik	Hurma Çekirdeği CNC	Zeytin Çekirdeği CNC
Verim (%)	~78	~68
Ortalama Kristal Boyutu (nm)	50-80	60-100
Kristalinite İndeksi (%)	78-82	68-73
Termal Bozunma Sıcaklığı (°C)	290-310	260-280
Yüzey Morfolojisi	Homojen, düzgün	Heterojen, düzensiz
FTIR Karakteristik Pikler	Belirgin, keskin	Daha geniş bantlar

Ayrıca hurma çekirdeği kaynaklı nanokristalin selülozun daha yüksek termal stabilite gösterdiği ve kompozit iskele üretimi için gerekli fonksiyonel grup çeşitliliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu bulgular ışığında çalışmanın devamında hammadde olarak hurma çekirdeği kullanılmıştır. Öncelikle hurma çekirdekleri, yüzeylerinde bulunan kir, toz ve yabancı maddelerin uzaklaştırılması amacıyla saf su ile yıkanmıştır. Yıkama işlemi sırasında çekirdekler bir elek yardımıyla süzülerek temizlenmiştir. Temizlenen çekirdekler, 60°C sıcaklıkta 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Kurutulan çekirdekler bir öğütücü kullanılarak ince toz haline getirilmiş; elde edilen tozun homojenliğini sağlamak amacıyla 0,5 mm'lik bir elek kullanılmıştır. Hazırlanan hurma çekirdeği tozu, oda sıcaklığında hava geçirmez kaplarda muhafaza edilmiştir. Ekstraksiyon işlemi, hurma çekirdeği tozundan yağ ve diğer safsızlıkların uzaklaştırılması amacıyla Soxhlet cihazı kullanılarak

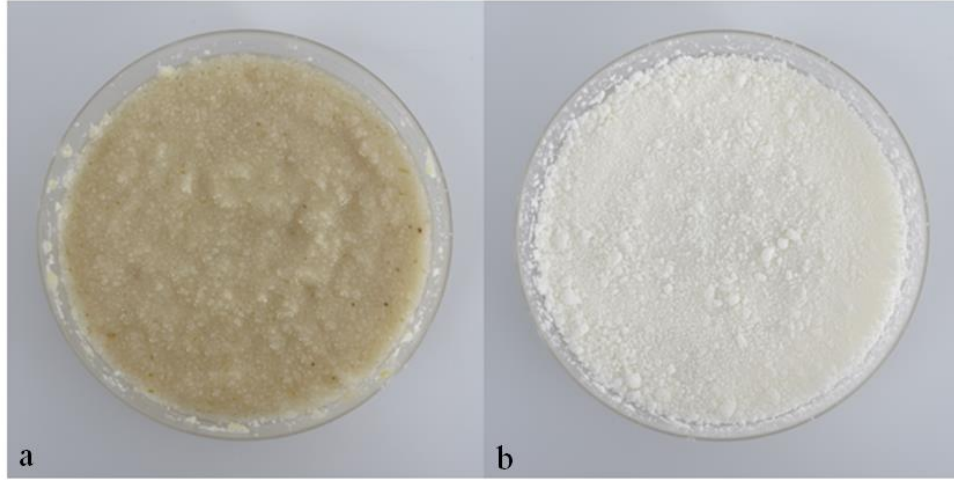
gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyonda çözücü olarak etanol ve hekzan karışımı (2:1 oranında) kullanılmıştır. 50 gr hurma çekirdeği tozu ile 300 mL çözücü karışımı, sekiz saat boyunca çözücünün kaynama noktasında (etanol için yaklaşık 78°C) sürekli geri akış altında tutulmuştur (Şekil 12).



Şekil 12. Soxhlet cihazı kullanılarak gerçekleştirilen ekstraksiyon işlemi.

Soxhlet cihazı sabit sıcaklıkta çalıştırılmış; çözücü buharlaştırılıp yoğunlaştırıcıda tekrar sıvılaştırılmıştır. Bu yöntemle hurma çekirdeği tozundan yağ ve diğer çözünen safsızlıklar uzaklaştırılmıştır. Ekstraksiyon işlemi tamamlandıktan sonra hurma çekirdeği tozu, kalan çözücünün uzaklaştırılması amacıyla vakum altında kurutulmuş ve sonraki işlemler için saklanmıştır. Soxhlet ekstraksiyonu sonrası elde edilen hurma çekirdeği tozuna, lignin ve hemiselülozun uzaklaştırılması amacıyla alkali işlem uygulanmıştır. Alkali işlemde %4'lük sodyum hipoklorit (NaClO) çözeltisi kullanılmış; işlem 80°C sıcaklıkta ve üç saat süreyle, manyetik karıştırıcı eşliğinde gerçekleştirilmiş ve bu işlem üç kez tekrarlanmıştır. Literatürde %4 NaClO çözeltisinin yara iyileşmesi ve dezenfeksiyon uygulamalarında etkinliğini gösteren bulgular doğrultusunda bu konsantrasyon tercih edilmiştir (Alves ve ark, 2021). Literatürdeki diğer bir çalışma da bu durumu teyit etmektedir (Yi ve ark., 2020). Alkali işlem sonucunda lignin ve hemiselüloz gibi amorf yapılar çözülerek ortamdaki uzaklaştırılmıştır. İşlem sonrasında hurma çekirdeği tozları, saf su ile nötr pH'a ulaşıncaya kadar yıkanmıştır. Yıkanmış ve kurutulmuş hurma çekirdeği tozlarından nanokristalin selüloz elde etmek amacıyla sülfürik asit ile hidroliz işlemi uygulanmıştır. Hidroliz işlemi kapsamında %64'lük H_2SO_4 çözeltisi kullanılmış ve bu işlem manyetik karıştırıcı altında 45°C sıcaklıkta 60 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte selülozun amorf bölgeleri çözülerek kristalin yapılar ortaya çıkarılmıştır. Hidroliz sırasında her 1 gr selüloz için 10 mL H_2SO_4 çözeltisi kullanılmış ve karıştırma hızı 500 rpm olarak ayarlanmıştır. Hidroliz

işleminin tamamlanmasının ardından hurma çekirdeği tozları 10.000 rpm’de 15 dakika süreyle santrifüjlenmiştir. Santrifüj sonrası üstte kalan süpernatant uzaklaştırılmış, çökelti ise saf su ile yıkanmıştır. Elde edilen CNC süspansiyonu, pH nötr oluncaya kadar saf su ile diyaliz edilmiştir. Diyaliz işlemi üç gün boyunca düzenli su değişimiyle gerçekleştirilmiştir. Son olarak CNC süspansiyonu, dondurarak kurutma yöntemiyle toz haline getirilmiştir. Bu işlemler sonucunda saf nanokristalin selüloz elde edilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Hidroliz işlemi sonrası elde edilen nanokristalin selüloz a) Nanokristalin selülozun yaş hali b) Nanokristalin selülozun kuru hali.

4.1.2 Nanokristalin Selüloz Karakterizasyon Analizleri

Hurma çekirdeğinden elde edilen selülozun ticari selüloz ile karşılaştırılması; hem malzemenin kalitesinin ve potansiyel kullanım alanlarının değerlendirilmesi hem de uygulanan üretim yönteminin başarısının ortaya konulması açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, çalışmada elde edilen selülozun özellikleri ticari selüloz ile karşılaştırılmıştır. Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz ve ticari selüloz yapılarının karakterizasyonu, başlıca Fourier Dönüştürülmüş Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve X-ışını kırınımı (XRD) teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FTIR analizleri Perkin Elmer Spectrum Two model FTIR spektrofotometre ile yapılmıştır. Spektrumlar, 4 cm^{-1} çözünürlükte ve $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ aralığında elde edilmiş olup analizler ATR modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. X-ışını analizleri ise Rigaku D/Max 2200 cihazı ile yapılmış; ölçümler $2^{\circ}\text{--}80^{\circ}$ theta aralığında ve $0,05^{\circ}$ theta çözünürlükte gerçekleştirilmiştir. XRD desenlerinin elde edilmesinde, bakır hedeften yayılan $\lambda=1,5405\text{ Å}$ dalga boyuna sahip Cu-K α_1 radyasyonu ışın kaynağı olarak kullanılmıştır. Elde edilen selüloz yapıları ile ticari selülozun termal özellikleri, termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) yöntemleri ile belirlenmiştir. TGA analizleri ile selüloz yapıların bozunma başlangıç sıcaklıkları, bozunma aşamaları ve toplam kalıntı miktarları belirlenmiştir. Bu analizlerde Shimadzu TGA-50 cihazı kullanılmış; ölçümler oda sıcaklığından 600°C 'ye kadar $10^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$ ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde

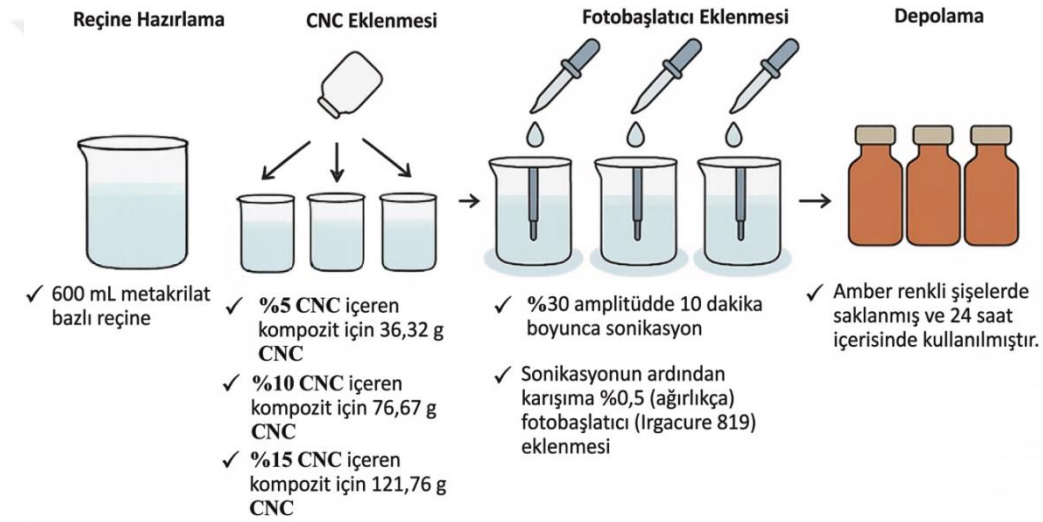
10 mg selüloz numunesi kullanılmış ve ölçümler statik hava atmosferinde yapılmıştır. Selüloz numunelerinin termal kararlılığı ve bozunma enerjileri DTA analizleri ile belirlenmiştir. Bu analizlerde 10 mg numune ve 10 mg α -alümina referans madde olarak kullanılmıştır. DTA analizleri, statik hava atmosferinde 10°C/dakika ısıtma hızı ile 600°C'ye kadar gerçekleştirilmiştir. DSC analizleri ile ise selüloz yapılarına ait faz geçişleri ve ısı geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu analizlerde 10 mg numune kullanılmış ve ölçümler 5°C/dakika ısıtma hızıyla 500°C'ye kadar hava atmosferinde gerçekleştirilmiştir. DSC analizlerinde referans madde olarak α -Al₂O₃ kullanılmış; cihaz kalibrasyonu ise In ve Zn standart maddeleri ile yapılmıştır.

4.2. Mekanik Testler

4.2.1. Lattice Greftlerin 3B Baskı İşlemi

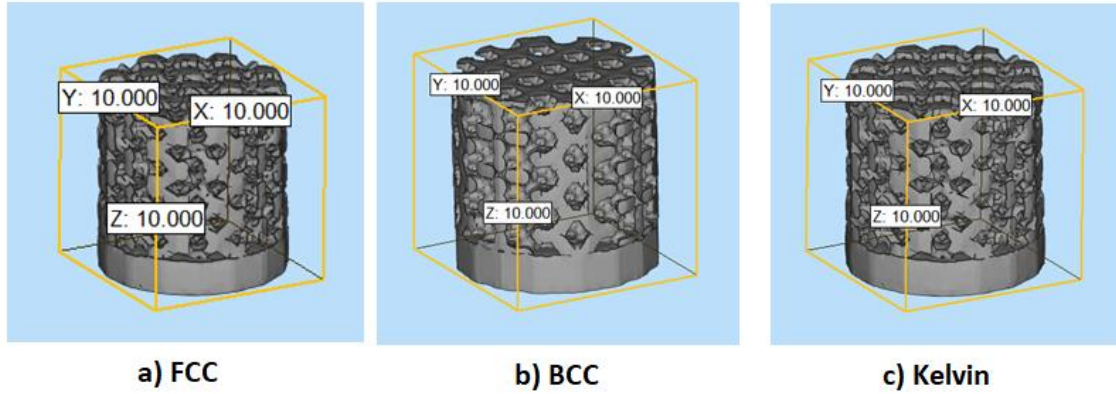
Biyouyumlu metakrilat bazlı reçine ve nanokristalin selüloz kullanılarak; farklı CNC konsantrasyonlarına ve farklı birim hücrelere (BCC,FCC,Kelvin) sahip lattice greft formülasyonları hazırlanmıştır. Greftler, ağırlıkça %5, %10 ve %15 CNC içerecek şekilde her bir konsantrasyon için ayrı ayrı üretilmiştir. Üretim sürecinde, her bir lattice greft grubu için 600 mL metakrilat bazlı reçineye sırasıyla %5, %10 ve %15 oranlarında CNC ilave edilmiştir. Reçine yoğunluğu, kullanım kılavuzunda belirtilen 1,15 g/mL değeri esas alınarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, 600 mL reçineye %5 CNC içeren grup için 36,32 g; %10 CNC içeren grup için 76,67 g ve %15 CNC içeren grup için 121,76 g CNC eklenmiştir. Literatürde nanokristalin selüloz ve benzeri malzemelerin fotopolimer ve akrilat bazlı reçinelerde yaygın olarak %1–%15 aralığında kullanıldığı; bu aralığın üzerinde viskozitenin hızla arttığı, partikül topaklanmasının belirginleştiği ve ışık geçirgenliğinin azalarak fotopolimerizasyon verimini düşürdüğü bilinmektedir (Antony Jose ve ark.,2025; Clarkson ve ark.,2021). CNC ve CNF (selüloz nano lif) takviyeli fotopolimer sistemlerde mekanik özelliklerdeki artışın genellikle %5–%10 seviyelerinde maksimuma ulaştığı daha yüksek dolgu oranlarında ise topaklanma nedeniyle mekanik özelliklerdeki artışın sınırlı kaldığı ya da tersine döndüğü görülmüştür (Li ve ark.,2024). Bu bilgiler ışığında, tez çalışması kapsamında hem mekanik iyileşme potansiyeli hem de reçinenin baskı edilebilirliği dikkate alınarak %5, %10 ve %15 CNC oranları seçilmiş; %5 alt–orta seviye, %10 olası optimum seviye, %15 ise sistemin baskı edilebilirlik sınırına yakın üst sınır olarak değerlendirilmiştir. Ön denemelerde %15'in üzerindeki CNC konsantrasyonlarında reçine karışımının viskozitesinin MSLA (Maskeli stereolitografi) baskı için uygun olmayan seviyelere yükseldiği, karışım homojenliğinin bozulduğu, fotopolimerizasyonun düzensizleştiği ve baskı başarısızlık oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek CNC oranlarında nanokristalin selüloz taneciklerinin aglomerasyon eğiliminin artması teorik olarak beklenen mekanik iyileşmeyi sınırlayabilmekte ve zayıf bölgeler oluşturarak kırılma davranışını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenlerle, %15'in üzerindeki CNC

konsantrasyonları bu tez kapsamında sistematik olarak incelenmemiş bunun yerine baskı edilebilirlik ve mekanik performans dengesi açısından anlamlı olan %5, %10 ve %15 seviyeleri tercih edilmiştir. Böylece hem düşük takviye (%5), hem muhtemel optimum takviye (%10) hem de sistemin üst sınırına yakın bir takviye seviyesi (%15) değerlendirilerek CNC konsantrasyonunun mekanik davranışa etkisi incelenmiştir. CNC tozu ve metakrilat bazlı reçine karışımında homojen bir dağılım elde etmek amacıyla, ultrasonik prob kullanılarak %30 amplitüdde 10 dakika boyunca sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. İşlem sırasında karışımın sıcaklığının 30°C'yi aşmaması için buz banyosu kullanılmıştır. Sonikasyonun ardından karışıma %0,5 (ağırlıkça) fotobaşlatıcı (Irgacure 819) eklenmiş ve karışım 5 dakika daha sonike edilmiştir. Hazırlanan kompozitler, ışıktan korunmak amacıyla amber renkli şişelerde saklanmış ve 24 saat içerisinde kullanılmıştır. Formülasyon hazırlamaya dair şematik gösterim Şekil 14'de verilmiştir.



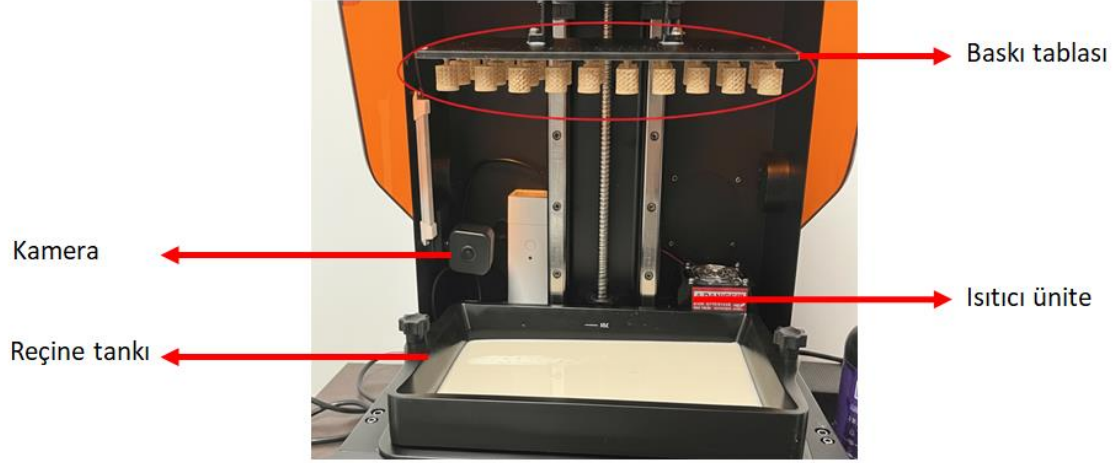
Şekil 14. Nanokristalin selüloz içeren reçine formülasyonu şematik gösterim.

Hazırlanan lattice greftler MSLA teknolojisine sahip Sonic Mighty 14K Revo model 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Üretim sürecinde greft yapılarının dizaynı bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında her bir greft 1×1×1 cm boyutlarında ve silindirik geometriye sahip olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 15). Silindirik geometri özellikle basma testlerinde gerilmenin numune üzerinde daha homojen dağılmasını sağlayarak kenar etkilerini azaltmakta ve mekanik özelliklerin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıdığı için tercih edilmiştir (Huo ve ark.,2021).



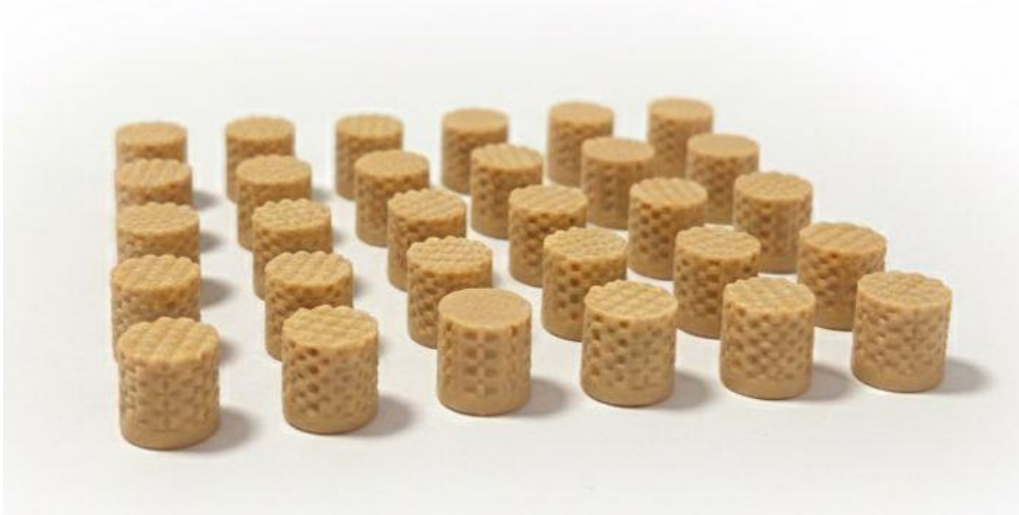
Şekil 15. Bilgisayar destekli tasarım yazılımı ile oluşturulan ve 1×1×1 cm boyutlarında silindirik olarak tasarlanmış üç farklı hücre tipine sahip lattice greft modelleri a) FCC b) BCC c) Kelvin

Lattice greftlerin tasarımında; farklı hücre tipleri olarak yüzey merkezli kübik (FCC), hacim merkezli kübik (BCC) ve Kelvin hücre tipleri tercih edilmiştir. Bu hücre tiplerinin seçilme nedeni, literatürde iskele ve gözenekli yapı tasarımlarında sıklıkla kullanılmaları ve hem mekanik hem de biyolojik performans açısından önemli avantajlar sunmalarıdır (Bernard ve ElSayed,2024; Alagha ve ark.,2024; Yang ve ark.,2025; Gandhi ve ark.,2025). Her bir geometride CNC takviye oranlarının ve kafes mimarisinin mekanik performans üzerindeki etkisini net bir şekilde gözlemleyebilmek amacıyla birim hücre boyutu 2 mm, strut kalınlığı ise tüm modellerde 0,5 mm olarak alınmıştır. Strut kalınlığının sabit tutulmasının temel nedeni; BCC, FCC ve Kelvin gibi farklı kafes yapılarının aynı kalınlıkta basılsalar bile geometrik doğaları gereği farklı gözeneklilik oranları ortaya çıkarmasıdır. Gözeneklilik oranlarının eşitlenmesi durumunda her yapının strut kalınlığının değiştirilmesi gerekecek, bu da modeller arasındaki geometrik standartlığı bozacaktır. Bu doğrultuda strut kalınlığı sabit tutularak, hem farklı tasarımların hem de artan CNC oranlarının mekanik dayanım üzerindeki etkisi, geometrik bir karmaşaya yol açmadan doğrudan karşılaştırılabilmiştir. Elde edilen üç boyutlu modeller STL (stereolitografi) formatında kaydedilmiştir. Hazırlanan STL dosyaları, Phrozen Sonic Mighty 14K Revo yazıcısı ile uyumlu bir dilimleme yazılımı kullanılarak işlenmiş; katman kalınlığı, pozlama süresi ve destek yapıları gibi baskı parametreleri ayarlandıktan sonra yazıcı tarafından okunabilir .ctb uzantılı baskı dosyalarına dönüştürülmüştür. Baskı işlemi öncesinde hazırlanan reçine karışımı, 3B yazıcının reçine tankına aktarılmıştır. Baskı parametreleri olarak katman kalınlığı 50 mikrometre(μm),taban katman sayısı 5,taban katman pozlama süresi 60 saniye ve normal katman pozlama süresi 8 saniye olarak belirlenmiştir. Söz konusu parametreler, baskı kalitesinin ve yapısal bütünlüğün optimize edilmesi amacıyla seçilmiştir (Zhang ve ark.,2019). Baskı işlemi sırasında reçine tabakalar halinde polimerize edilerek silindirik lattice greftler oluşturulmuştur (Şekil 16).



Şekil 16. Selüloz katkılı lattice greft modellerinin 3B baskı işlemi.

Baskı işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen selüloz katkılı lattice greft modelleri yazıcı platformundan dikkatlice çıkarılmıştır (Şekil 17).



Şekil 17. Üretilen selüloz katkılı lattice greftler.

Greftlerin üzerindeki fazla ve polimerize olmamış reçinenin uzaklaştırılması amacıyla greftler izopropil alkol içerisinde 15 dakika süreyle ultrasonik banyoda yıkanmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Selüloz katkılı lattice greftlerin ultrasonik banyoda temizlenme işlemi.

Not:Her greft modeline ayrı ayrı ultrasonik banyoda yıkama işlemi uygulanmıştır.

Bu işlem yapıların yüzeyinde herhangi bir kalıntı kalmamasını ve temiz bir yüzey elde edilmesini sağlamıştır. Yıkama işleminin ardından lattice greftler 365 nm dalga boyunda UV (Ultraviyole) ışık altında 20 dakika süreyle son kürleme işlemine tabi tutulmuştur (Oakdale ve ark.,2016) (Şekil 19).

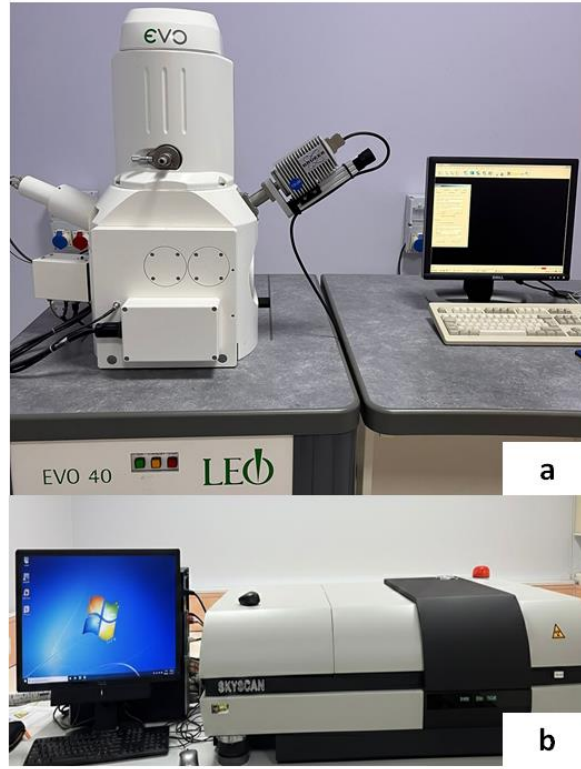


Şekil 19. Selüloz katkılı lattice greft modellerine UV ışık altında son kürleme işlemi uygulanması.

Bu aşama lattice greftlerin tam polimerizasyonunu sağlamak ve mekanik özelliklerini optimize etmek amacıyla uygulanmıştır (Jeršovaitė ve ark.,2023). Son kürleme işlemi sonrası lattice greftler deiyonize su ile yıkanarak olası kalıntılardan arındırılmıştır ve diğer analizler için hazır hale getirilmiştir.

4.2.2. Boyut Hassasiyeti Ölçümü Ve Yüzey Defektlerinin Tespiti

MSLA teknolojisiyle üretimde yüksek hassasiyet ve detaylı yapı elde edilebilmesine rağmen, üretim hassasiyetini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Özellikle üretim parametreleri arasında yer alan ışık şiddeti, pozlama süresi ve katman kalınlığı gibi değişkenler nihai ürünün boyutlarında sapmalara ve yüzeyde defektlere neden olabilmektedir (Kim ve ark.,2018). MSLA yönteminde sıvı reçine, tabaka tabaka polimerize edilerek istenen yapı oluşturulmaktadır ancak polimerizasyon sırasında oluşan büzülme ve reçinenin akışkanlık özellikleri de geometrik hassasiyeti etkileyebilmektedir (Ahmed ve ark.,2022). Bu nedenle, üretilen lattice greftlerin geometrik hassasiyetinin üç boyutlu olarak değerlendirilmesi amacıyla SEM (Taramalı elektron mikroskobu) ve Micro-CT (Bilgisayarlı mikro tomografi) görüntüleri alınmıştır (Şekil 20).



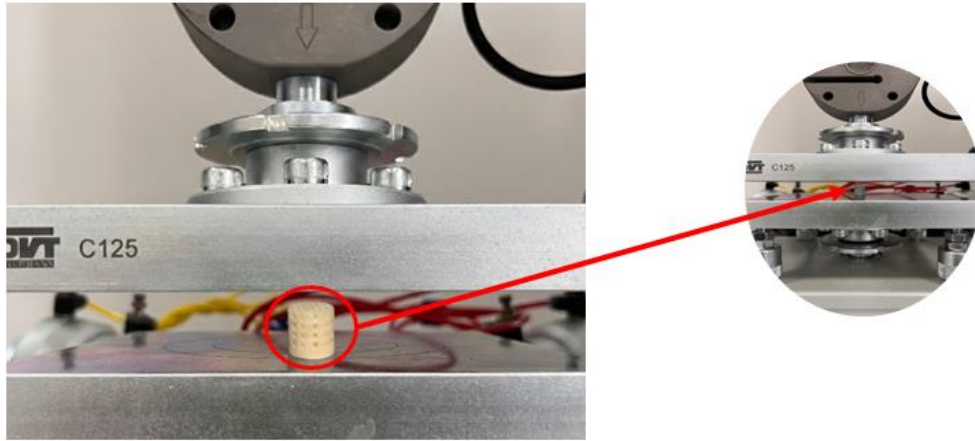
Şekil 20. Boyut hassasiyeti ölçümleri a)SEM b)Micro-CT cihazı.

Lattice greftler, tarama sırasında hareketi azaltmak amacıyla düşük X-ışını soğurmalı bir tutucu üzerine sabitlenip tarama boyunca greft eksenini döndürme eksenini ile hizalanmıştır. Görüntüler, polimer esaslı gövdelerde kontrastı artırmak ve sertleşme etkisini sınırlamak amacıyla alüminyum filtre kullanılarak toplanmıştır. X-ışını tüpü ayarları, literatürde polimer yapıların μ CT analizinde yaygın görülen aralıklar esas alınarak seçilmiştir (100 kV, 80 μ A) (Awaja ve ark.,2011). Taramalar 360° dönüşte gerçekleştirildi. Projeksiyon sayısı ve dönüş adımı, yeniden yapılandırmada yeterli açısız örnekleme sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Boyut hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla, DICOM formatındaki veriler açık kaynaklı bir görüntü işleme yazılımına aktararak segmentasyon

aşamalarından geçirilerek katı modellere dönüştürülmüştür. Elde edilen bu tarama verileri ile orijinal CAD modelleri arasındaki boyutsal sapmalar, karşılaştırma ve ölçüm yöntemleriyle analiz edilerek üretim hassasiyeti tespit edilmiştir.

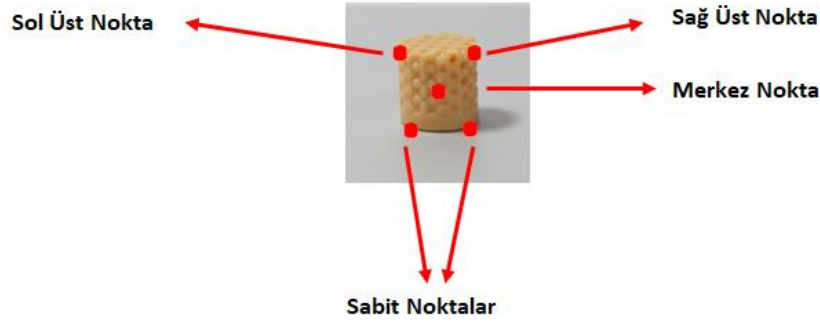
4.2.3. Basma Testi Ve Dinamik Nokta Takibi

Her bir lattice greftin deformasyon davranışlarını incelemek amacıyla basma testleri gerçekleştirilmiştir. Basma testlerinde Devotrans C125 basma test cihazı kullanılmıştır. Cihazın sıkıştırma hızı 10 mm/dakika, rampa hızı ise 0,05 mm/dakika olarak ayarlanmıştır (Şekil 21).



Şekil 21. Basma testi deney düzeneği.

Testler yer değiştirme arttıkça kuvvetin azaldığı noktaya kadar sürdürülmüştür. Selüloz katkılı lattice greft modellerinin temas yüzeylerindeki sürtünme kuvvetini azaltmak amacıyla test edilen birimin altına düz bir plaka yerleştirilmiştir. Greftler yer değiştirme uygulamasının homojen olmasını sağlamak için plakanın tam ortasına konumlandırılmıştır. Basma testlerinde yük-yer değiştirme eğrileri incelenerek lattice greftlerin deformasyon karakteristikleri elastik, plato ve yoğunlaşma noktaları üzerinden değerlendirilmiştir. Basma testlerinden elde edilen veriler, dışa aktarılmış ve Microsoft Excel ile analiz edilmiştir. Ek olarak çalışmada lattice greftlerin birim hücre değişiminin mekanik özelliklere etkisini incelemek amacıyla Dinamik Nokta Takibi yöntemi kullanılmıştır. Deneylerde görüntü işleme yazılımı kullanılmış ve deformasyon sırasında hareketleri izlemek amacıyla lattice greft yüzeyine belirgin kontrast sağlayan referans noktalar yerleştirilmiştir (Şekil 22).



Şekil 22. Dinamik nokta takibi analizi için örnek lattice greft modeli üzerinde referans noktalarının belirlenmesi.

4.2.4. Mikro Sertlik Testi

Üretilen lattice greftlerin yüzey sertliği, Shore D durometre yöntemi ile belirlenmiştir. Ölçüm prosedürü, Shore sertlik tayinine ilişkin genel prensipler dikkate alınarak yürütülmüştür (Qi ve ark.,2003). Shore sertlik ölçümlerinin polimerik malzemelerde çevresel koşullara duyarlılık gösterebilmesi nedeniyle lattice greftler test öncesinde laboratuvar ortamında koşullandırılmıştır. Ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş, lattice greftler sert ve düz bir altlık üzerinde durometrenin temas yüzeyi greftlere paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Shore yönteminde numune kalınlığının ölçümü etkilememesi için belirli bir minimum kalınlık önerildiğinden, ölçüm yüzeyi seçimi literatürden yararlanılarak yapılmıştır (Vian ve Denton, 2018; Herrmann, 2011). Lattice greftlerin gözenekli geometrisi nedeniyle ölçümler, mümkün olduğunca dış yüzeyde süreklilik gösteren ve baticının boşluk üzerine gelmeyeceği bölgelerden alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün okuma kararlılığını azaltmaması amacıyla, ölçüm yapılacak bölgeler temizlenmiş ve yüzeydeki belirgin üretim izlerini azaltmak için çok hafif yüzey düzeltme işlemi uygulanmıştır (Mustafa ve ark., 2022). Sertlik ölçümleri, Shore D ölçeğine uygun bir durometre ile gerçekleştirilmiştir (LOYKA LX Shore D) (Şekil.23)



Şekil 23. Lattice greftlerin Shore D yöntemiyle sertlik ölçümleri.

Durometre, lattice greft yüzeyine dik doğrultuda ve kontrollü biçimde bastırılmış; temas yüzeyinin grefte tam oturmasını takiben sertlik değeri, sabitlenen okuma süresinde kaydedilmiştir. Shore sertlik yönteminde ölçümler 10 s okuma süresine göre alınmış ve değerler bu süre ile birlikte ifade edilmiştir (Kreide ve ark.,2024). Her bir greft üzerinde, birbirini etkilemeyecek şekilde farklı noktalardan 5 tekrar ölçüm alınmıştır ve greft geometrisinin izin verdiği ölçüde ölçüm noktaları arasında yeterli mesafe bırakılmıştır. Lattice tipi gözenekli yapıların yüzey sertliğinin belirlenmesinde Shore D yöntemi, temel olarak malzemenin batma direncini ölçmektedir. Ancak literatürde, bu tür gözenekli geometrilerde yapılan ölçümlerin; strut kalınlığı ve porozite oranı gibi faktörlere bağlı olarak sapma gösterebileceği belirtilmektedir (Meththananda ve ark.,2009). Bu deneysel sınırlılıkların etkisini azaltmak amacıyla Shore D ölçümleri greftlerin sadece süreklilik gösteren ve batıcının boşluklu bölgelere denk gelmediği yüzey alanlarından gerçekleştirilmiştir (Łopianiak ve ark.,2025).

4.2.5. Termal Yorulma Testi

Üretilen lattice greftlerin termal yorulma altındaki davranışlarını incelemek amacıyla, literatürde polimer kompozitlerin yorulmasında kullanılan iki kademeli ısı şok prosedürü uygulanmıştır (Li ve ark.,2024). Isıl çevrim düzeneği, sıcaklıkları hassas şekilde kontrol edilen iki ayrı sıvı tankından oluşmaktadır. Düşük sıcaklık kademesi için 0 °C’de sabitlenmiş buzlu su tankı, yüksek sıcaklık kademesi için ise 100 °C’de sabitlenmiş kaynar su tankı kullanılmıştır. Lattice greftler önce 100 °C sıcaklıktaki tanka daldırılarak 5 saniye süreyle bekletilmiş, ardından lattice greftler hızla 0 °C

sıcaklıktaki tanka aktarılmış ve burada da 5 saniye süreyle tutulmuştur. Bir tam çevrimin yaklaşık 10 saniye sürdüğü bu protocol, lattice greftlerin termal geçmişe bağlı değişimlerini gözlemlemek amacıyla 50, 200 ve 500 çevrim sayılarına ulaşılan kadar tekrarlanmıştır. Deney tasarımı bu çevrim sayılarının seçilme nedeni; lattice greftlerin termal geçmişe verdiği tepkiyi erken evre (başlangıç gerilmeleri), orta evre (mikro yapısal yorulma) ve ileri evre (bozulma) olarak üç farklı kritik aşamada incelemek ve literatürdeki benzer yaşlandırma çalışmalarıyla uyumlu veriler elde etmektir (Wunderlich, 2005; Khalili ve ark.,2017). Termal yorulma süreçleri tamamlanan lattice greftlerin mekanik performansındaki değişimi belirlemek amacıyla basma testleri gerçekleştirilmiş; akma dayanımı ve elastisite modülü değerleri, çevrim sayısına bağlı karşılaştırılmıştır.

4.2.6. Sonlu Elemanlar Analizi

Tasarlanan lattice greftlerin mekanik davranışlarını incelemek amacıyla, sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan fotopolimer reçine matrisi, literatürde MSLA tipi 3B yazıcılarda kullanılan standart biyo uyumlu reçinelerin mekanik karakteristikleri ile uyumlu olacak şekilde elastik ve izotropik olarak modellenmiştir (Suksawang ve ark., 2025). Bu doğrultuda matrisin elastisite modülü 2000 MPa, Poisson oranı 0,35 ve yoğunluğu 1,15 g/cm³ olarak tanımlanmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan selülozun yoğunluğu ise literatür verileri ışığında 1,49 g/cm³ olarak alınmıştır. Selüloz içeriğinin yapısal performans üzerindeki etkisini sonlu elemanlar analizi ortamına aktarabilmek için malzeme homojenleştirme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda, reçine ve selülozun kütle fraksiyonları ve yoğunluk farkları kullanılarak her bir karışım için hacimsel dolgu oranları hesaplanmıştır. Böylece selülozun yüksek rijitliği ile reçinenin elastik özellikleri, hacimsel ağırlıklarına göre birleştirilmiş; her bir lattice greft grubu için efektif elastisite modülü ve efektif yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Selüloz oranındaki artışın matris üzerindeki sertleştirici etkisi, Engineering Data modülünde her bir lattice greft grubu için özelleştirilmiş malzeme kartları aracılığıyla analize dahil edilmiştir (Mohan ve ark., 2020). BCC, FCC ve Kelvin birim hücreleri kullanılarak oluşturulan lattice greftlere, ince strut detayları dikkate alınarak tetrahedral ağ algoritması ile meshlenmiştir. Mesh yoğunluğu, maksimum Von Mises gerilmesi ve maksimum yer değiştirme değerlerindeki değişimin %5'in altında kaldığı iterasyonlarla optimize edilmiştir (Ghavidel ve ark., 2018; Rahimi ve Asghari, 2025). Ayrıca, strut birleşim noktaları ve yükleme arayüzlerinde yerel ağ inceltmesi uygulanarak çözüm hassasiyeti artırılmıştır (Smith ve ark.,2013). Sınır koşulları, deneysel basma testleri ile uyumlu olacak şekilde tanımlanmış; lattice greftlerin alt yüzeyleri tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanarak ankastre mesnet olarak kabul edilmiştir. Yükleme koşulu olarak, her bir greftin üst yüzeyine homojen dağılımlı 50 MPa statik basınç uygulanmıştır. Bu sayede farklı lattice geometrilerinin (BCC, FCC, Kelvin) ve selüloz katkı oranlarının,

standart bir yükleme altındaki gerilme dağılımı ve deformasyon karakteristikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

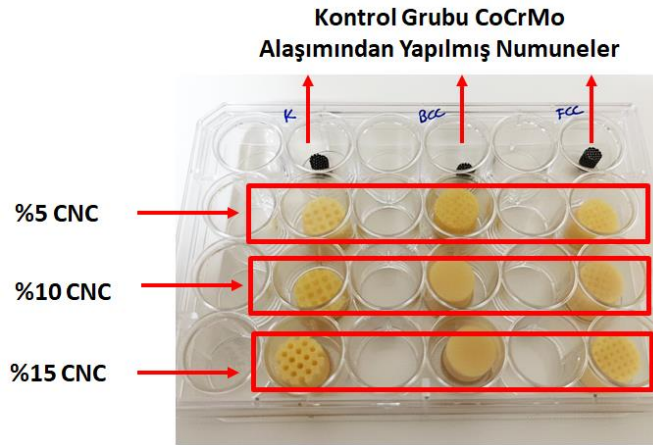
4.2.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Lattice greftlerin pürüzlülük değerleri, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında, temas modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü karakterizasyonunda; aritmetik ortalama pürüzlülük (Ra) ve ortalama karekök pürüzlülük (Rq) parametreleri temel alınmıştır. Ölçümler, standart ortam koşullarında yüksek çözünürlüklü silikon problar aracılığıyla yapılmıştır. Her bir lattice greft için 10x10 μm^2 tarama alanları seçilmiş ve verilerin istatistiksel doğruluğu için her bir lattice greft üzerinden üç farklı bölgeden ölçüm alınmıştır. Sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma olarak kaydedilmiştir.

4.3. Biyolojik Değerlendirmeler

4.3.1. In Vitro Hücre Adezyon, Morfoloji Ve AO/EB İle Canlılık Analizi

Deneyisel çalışmada fare (*Mus musculus*) fibroblast L-929 hücre hattı kullanılmıştır. Hücreler, %5 CO₂ içeren Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) besiyerinde, 37°C inkübatörde standart koşullarda ön kültüre alınmıştır. Hücrelerin kültür flaskında yaklaşık %80 konfluens seviyesine ulaşmasının ardından, hücrelerin yüzeyden ayrılması amacıyla %0,25 tripsin-EDTA çözeltisi kullanılmıştır. Tripsinizasyon işlemi sonrasında hücre süspansiyonu 2000 rpm'de 5 dakika süreyle santrifüj edilerek hücreler toplanmıştır. Elde edilen hücre pelletleri, taze DMEM besiyerinde yeniden süspanse edilmiştir. Lattice greftlerin hücre kültürü ile temas ettirilmesi öncesinde, tüm greftler %70 etanol ile sterilize edilmiş ve steril koşullar altında kurutulmuştur. Sterilize edilen lattice greftler, her bir kuyucuğunda bir malzeme olacak şekilde 24 kuyucuklu kültür plakasına yerleştirilmiştir. Her bir malzemenin üzerine, 5x10⁴ hücre/ml yoğunluğunda hazırlanmış hücre süspansiyonu, lattice greftin yüzeyini tamamen örtecek şekilde doğrudan üstten eklenmiştir. Hücrelerin greft ile doğrudan teması sağlanmadan besiyeri aracılığıyla temas kurulmuştur. Hazırlanan plakalar, %5 CO₂ içeren 37°C inkübatörde 120 saat boyunca inkübe edilmiştir. İnkübasyon süresi sonunda lattice greftler, hücrelerle birlikte yeni ve steril bir 24 kuyucuklu plaka içerisine dikkatlice aktarılmıştır (Şekil 24).



Şekil 24. 24 kuyucuklu kültür plakasında lattice greftlerin yerleşimi.

Her bir kuyucuktaki lattice greft, fosfat tamponlu tuz çözeltisi (PBS) ile iki kez yıkanarak ortamdan hücre dışı kalıntıların uzaklaştırılması sağlanmıştır. Ardından, lattice greftlerin üzerini tamamen örtecek şekilde yaklaşık 2 mL %3,5'lik glutaraldehit çözeltisi eklenmiş ve oda sıcaklığında 2 saat boyunca fiksasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Fiksasyon süresinin sonunda glutaraldehit çözeltisi uzaklaştırılmış ve lattice greftler yeniden iki kez PBS ile yıkanmıştır. Fiksasyon işlemi tamamlanan lattice greftlerin bir bölümü, yüzeydeki hücrelerin morfolojisinin incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Diğer bölümü ise canlı/ölü hücre ayrımının yapılabilmesi için 10 µg/ml akridin turuncusu (AO) ve etidyum bromür (EB) karışımı ile boyanmıştır. Boyama süresinde, lattice greftlerin üzerini tamamen örtecek şekilde AO/EB karışımı eklenmiş ve oda sıcaklığında 10 dakika inkübe edilmiştir. Boyama işleminin ardından, lattice greftler fazla boyanın uzaklaştırılması için iki kez PBS ile yıkanmıştır. Son olarak lattice greftler floresan mikroskop altında incelenmiş; hücrelerin canlılık durumu ve morfolojileri fotoğraflanarak kayıt altına alınmıştır. Yürütülen bu *in vitro* hücre kültürü çalışmaları, lattice greftlerin biyoyumluluk ve osteointegrasyon potansiyelinin erken aşama değerlendirmesi niteliğindedir.

4.3.2. Kitosan Kaplama İşlemi

Üretilen lattice greftlerin biyoyumluluğunun artırılması ve antibakteriyel özellik kazandırılması amacıyla kitosan kaplama işlemi uygulanmıştır. Kitosan; kitin polimerinin deasetilasyonu ile elde edilen biyoyumlu, biyobozunur ve antibakteriyel özelliklere sahip doğal bir polisakkarittir (Croisier ve Jérôme,2013). Doku mühendisliği uygulamalarında hücre yapışması, proliferasyonu ve mineral oluşumunu desteklediği literatürdeki çalışmalarda belirtilmektedir (Venkatesan ve Kim,2010; Fakhri ve ark.,2020). Bu tez çalışmasında kitosan kaplama işlemi, daldırma tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, kompleks geometriye sahip greft yapılarının hem dış yüzeylerinin hem de iç gözenek duvarlarının homojen bir şekilde kaplanmasına olanak sağlamaktadır (Schneider ve ark.,2018). Kitosan kaplama çözeltisi; orta molekül ağırlıklı kitosan

tozunun (deasetilasyon derecesi $\geq 75\%$, Sigma-Aldrich) $1,5\%$ (w/v) konsantrasyonunda 1% (v/v) asetik asit çözeltisinde çözülmesi ile hazırlanmıştır. Bu amaçla öncelikle distile suda 1% (v/v) konsantrasyonunda asetik asit çözeltisi hazırlanmış; ardından kitosan tozu yavaşça eklenerek manyetik karıştırıcıda, oda sıcaklığında 24 saat boyunca 300 rpm hızında karıştırılmıştır. Çözelti, homojen ve viskoz bir yapı elde edene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Asetik asit konsantrasyonunun 1% (v/v) olarak seçilmesi, kitosanın tam çözünürlüğünü sağlarken aynı zamanda çözeltinin viskozitesinin kaplama işlemi için uygun seviyelerde kalmasını sağlamıştır (Crini ve Badot,2008). Kaplama öncesinde üretilmiş lattice greftler, temizleme prosedürüne tabi tutulmuştur. Graftler öncelikle 70% etanol çözeltisinde 15 dakika süreyle ultrasonik temizleyicide yıkanmış ve yüzeydeki artık reçine veya yağ tabakasının uzaklaştırılması sağlanmıştır. Ardından lattice greftler distile su ile üç kez durulanarak etanol kalıntıları giderilmiştir. Temizlenen lattice greftler, steril koşullarda etüvde 40°C 'de 2 saat süreyle kurutularak kaplama işlemi için hazır hale getirilmiştir. Kitosan kaplaması için lattice greftler kitosan çözeltisine tamamen daldırılmış ve oda sıcaklığında 30 dakika süreyle çözeltide bekletilmiştir (Şekil 25).



Şekil 25. Daldırma yöntemiyle lattice greftlere kitosan kaplama işleminin uygulanması.

Bu süre zarfında kitosan çözeltisinin gözenek yapılarına nüfuz etmesi ve yüzeye emdirilmesi sağlanmıştır (Madihally ve Matthew,1999). Bekleme süresi sonunda lattice greftler, yavaşça çözeltiden çıkarılmış ve fazla kitosan çözeltisinin damlaması için steril bir kaba yerleştirilerek 10 dakika süreyle bekletilmiştir (Şekil 26).



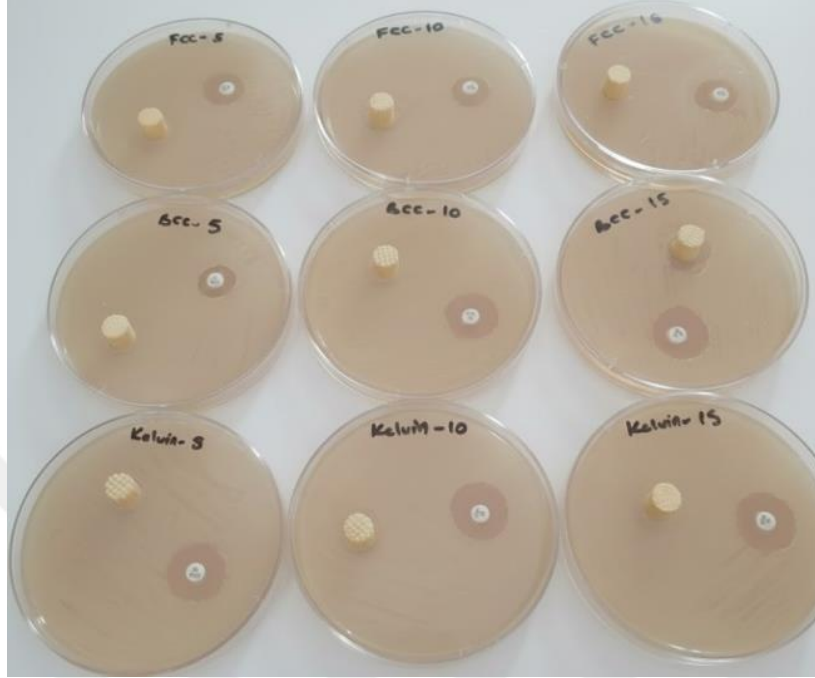
Şekil 26. Kitosan kaplama işlemi yapılan lattice greftler.

Son aşamada lattice greftler, distile su ile hafifçe durulanarak yüzeydeki aşırı asit ve çözünmemiş kitosan kalıntıları uzaklaştırılmıştır. Kitosan kaplı lattice greftlerin pH'nın fizyolojik değerlere yaklaştırılması ve kaplamanın stabilizasyonu amacıyla nötrleştirme işlemi uygulanmıştır. Bu kapsamda lattice greftler, %0,1M NaOH (sodyum hidroksit) çözeltisine 10 dakika süreyle daldırılarak kitosan tabakasının nötralizasyonu sağlanmıştır (Hsieh ve ark.2007). Nötrleştirme işleminin ardından lattice greftler, fosfat tamponlu tuz çözeltisi ile üç kez yıkanarak yüzeydeki alkali kalıntılar giderilmiş ve fizyolojik pH'a ulaşılması sağlanmıştır (Bovo ve ark.,2013). Yıkama işlemi her defasında 10 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Kitosan kaplı lattice greftlerin kurutulması için iki aşamalı bir prosedür uygulanmıştır. İlk aşamada lattice greftler, steril bir ortamda oda sıcaklığında 24 saat süreyle hava kurutmaya bırakılmıştır. Bu aşamada kitosan kaplamanın yavaş ve kontrollü bir şekilde katılaşması sağlanarak çatlak oluşumu önlenmeye çalışılmıştır. İkinci aşamada ise lattice greftler, vakum etüvünde 40°C'de 12 saat süreyle kurutularak tam kurutma sağlanmış ve kalan nem içeriği minimize edilmiştir. Kurutma işlemi tamamlanan lattice greftler, karakterizasyon testlerine kadar steril petri kaplarında muhafaza edilmiştir. Kitosan kaplamanın varlığı EDX analizi (Enerji Dağılımlı X-ışını) ile, yüzey morfolojisi ise SEM analizi ile değerlendirilmiştir. Tüm kaplama işlemleri, kontaminasyon riskini en aza indirmek amacıyla steril koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

4.3.3. Antibakteriyel Aktivitenin Disk Difüzyon Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Endodontik tedavi başarısızlıkları ile ilişkilendirilen başlıca mikroorganizmalardan biri ağız florasında da yaygın olarak bulunan *Enterococcus faecalis*'tir (Stuart ve ark.,2006). Bu sebeple antibakteriyel etkinliğin değerlendirilmesinde referans bakteri *E. Faecalis*, İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü, Mikrobiyoloji Laboratuvarlarından temin edilerek kullanılmıştır. Tüm besiyerleri ekim işlemi öncesinde 15 dakika 121°C'de, 1 atm basınç altında 20 dakika süreyle otoklavize edilmiştir. Bakteri Nutrient Broth sıvı besi ortamına ekilerek 37 °C'de 24 saat inkübe

edilmiştir. Bakteri kültüründen 100 µl alınarak Nutrient Agar içeren besi ortamına aktarılmış ve L baget ile yayılmıştır. Ekim işleminden sonra her bir agar plağının üzerine daha önce ultraviyole-C ışık ile steril edilmiş lattice greftler (BCC5, BCC10, BCC15; FCC5, FCC10, FCC15; Kelvin5, Kelvin10, Kelvin15) yerleştirilmiştir (Şekil 27).

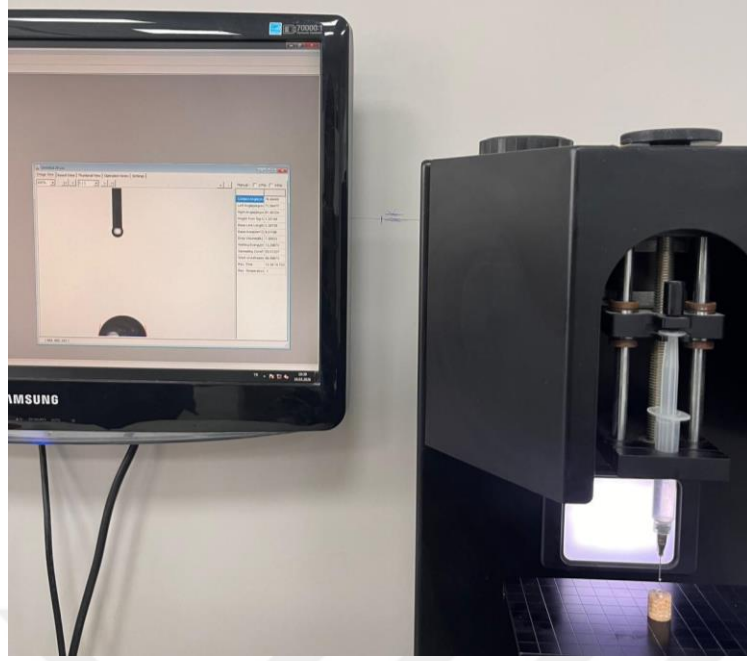


Şekil 27. *E. faecalis* ile ekim yapılmış Nutrient Agar (NA, Merck) plakları üzerinde lattice greftlerin (üst sıra: FCC5, FCC10, FCC15; orta sıra: BCC5, BCC10, BCC15; alt sıra: Kelvin5, Kelvin10, Kelvin15) ve pozitif kontrol Cefadroxil (Bioanalyse) antibiyotik disklerinin yerleşimi.

Pozitif kontrol olarak çapı 5 mm olan Cefadroxil antibiyotik diskleri (30 µg/disk, Bioanalyse) kullanılarak antibakteriyel aktivite disk difüzyon yöntemi ile tespit edilmiştir. 37 °C' de 24 saatlik inkübasyonun sonunda lattice greftlerin ve antibiyotik disklerin etrafında oluşan zon çapları dijital kumpas kullanılarak milimetre (mm) cinsinden ölçülmüştür.

4.3.4. Temas Açısı Ölçümü

Lattice greftlerin hidrofilik özelliklerini belirlemek amacıyla temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, sessiz damla yöntemi kullanılarak optik temas açısı ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 28).



Şekil 28. Lattice greft yüzeyi üzerinde deiyonize su damlasının temas açısı ölçümü.

Lattice greftlerin hidrofilik karakterizasyonu kapsamında yapılan temas açısı ölçümleriyle; selüloz takviyesine bağlı hidroksil gruplarının yüzey gerilimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Her bir lattice greft grubu için ölçümler üç farklı noktadan tekrarlanarak ortalamalar kaydedilmiştir.

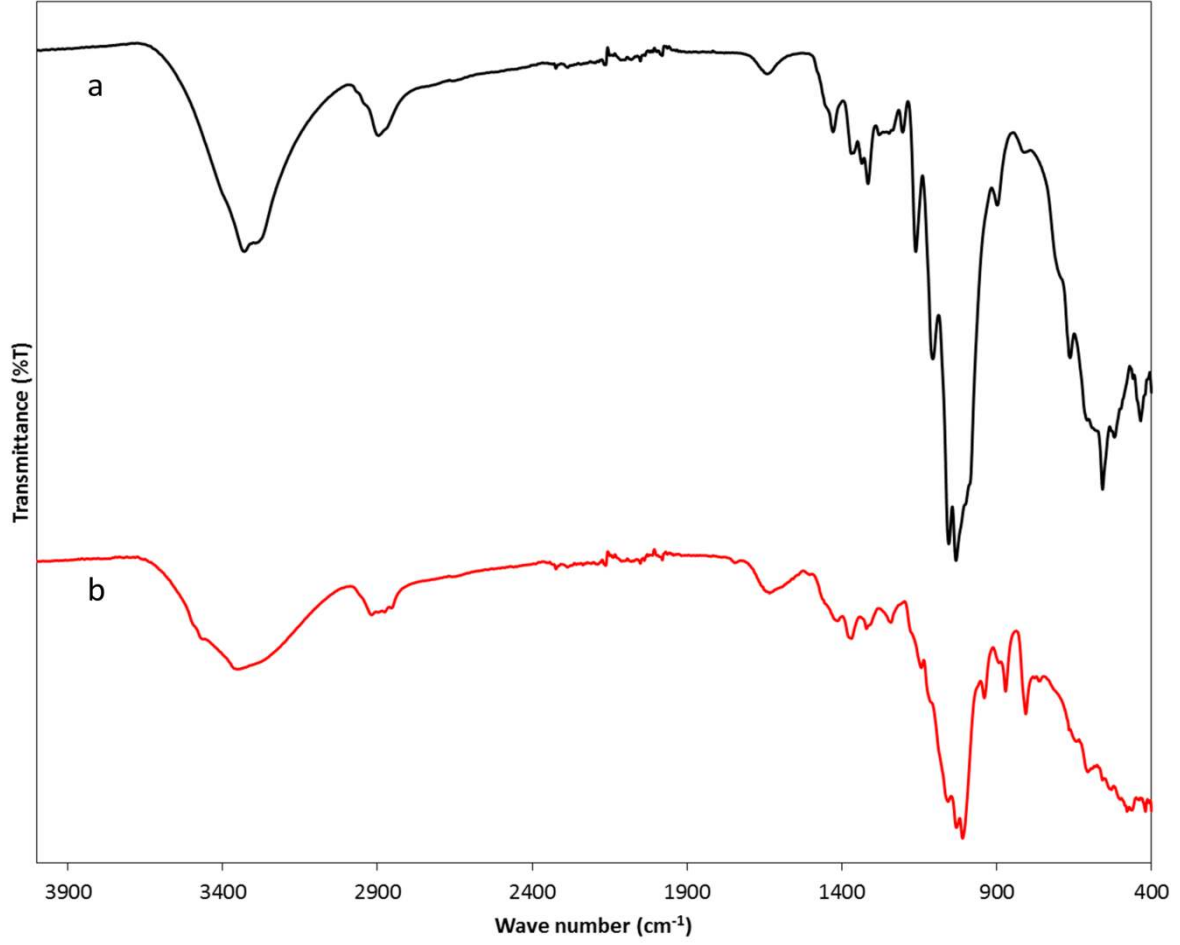
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar üç ana başlık halinde sunulmuştur. Sırası ile kimyasal analizler, mekanik testler ve biyolojik değerlendirmeler şeklindedir.

5.1. Kimyasal Analizlerin Sonuçları

5.1.1. Nanokristalin Selüloz Karakterizasyon Sonuçları

Çalışma kapsamında, hurma çekirdeğinden elde edilen selüloz ile bu yapının karşılaştırılması amacıyla ticari selüloz kullanılmıştır. Her iki yapının kimyasal özellikleri FTIR analizleri ile doğrulanmıştır. Ticari selüloz yapısına ait FTIR spektrumu Şekil 29 (a)'da sunulmuştur. Elde edilen spektrumda, 3000–3600 cm^{-1} aralığında geniş bir -OH gerilme titreşimi gözlemlenmiştir. Ayrıca 2950 cm^{-1} 'de glikozit ünitelerindeki C-H bağlarına ait gerilme titreşimi ve 1380 cm^{-1} 'de ana zincir yapısına ait C-C gerilme titreşimi tespit edilmiştir. 1100 cm^{-1} 'de C-O piki, 1000 cm^{-1} 'de O-C eterik gerilme titreşimi ve yaklaşık 650 cm^{-1} 'de C-H alifatik gerilme titreşimi görülmektedir. Bu piklerin tamamı, saf selüloz yapısını doğrulamaktadır (Atykyan ve ark., 2020). Hurma çekirdeğinden elde edilen selüloz yapısına ait FTIR spektrumu ise Şekil 29 (b)'de verilmiştir. Bu yapıda da 3000–3600 cm^{-1} aralığında yüzey hidroksillerinden kaynaklanan -OH gerilme piki ve 2850–2950 cm^{-1} aralığında alifatik glikozit ünitelerine ait C-H pikleri gözlemlenmiştir. 900–1200 cm^{-1} aralığında belirgin şekilde görülen C-O-C eterik gerilme titreşimi önemli bir diğer karakteristik özelliktir. Ayrıca 1112 cm^{-1} 'de C-O, 1658 cm^{-1} 'de C-C, 1436 cm^{-1} 'de CH_2 ve yaklaşık 810 cm^{-1} 'de C-H bağlarına ait pikler tespit edilmiştir. Her iki selüloz türünde de yaklaşık 790 cm^{-1} civarında β -1,4 bağından kaynaklanan pikler gözlemlenmiştir. Bu piklerin varlığı, saflaştırılmış selülozun hedeflenen yapıda ve ticari selüloz ile benzer özelliklerde elde edildiğini göstermektedir.

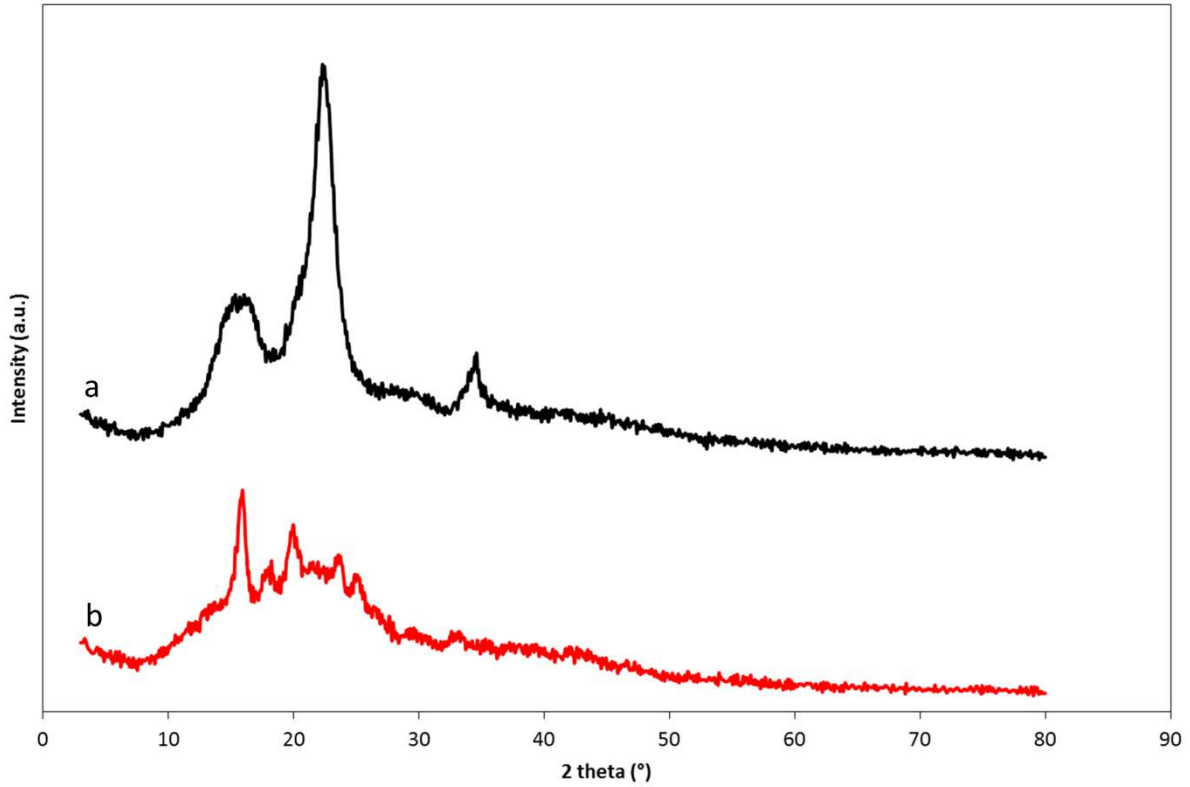


Şekil 29. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeği yapısından saflaştırılmış selüloz yapılarına ait FTIR spektrumları.

Şekil 30’da ticari selüloz ve hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selülozlara ait X-ray spektrumları sunulmaktadır. Ticari selüloz yapısında 15° ve $22,5^\circ$ ve 34° ’de selüloza özgü karakteristik pikler gözlemlenmiştir. Bu pikler, selülozun sırasıyla 110, 200 ve 040 kristalografik düzlemlerine karşılık gelmektedir (Ma ve ark.,2023). Şekil 30 (a)’da selüloz, Selüloz tip I’in baskın olduğu tipik bir XRD deseni göstermiştir. Selüloz I; bitkilerden, bakterilerden, mantarlardan ve alglerden elde edilen en bol selüloz formudur. Bu selüloz tipi iki farklı fazdan oluşmaktadır: tek zincirli bir triklinik yapıya sahip selüloz Ia ve iki zincirli monoklinik yapıya sahip selüloz Ib. Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloza ait spektrum incelendiğinde, 15° derecede 23° ve 33° ’de bu piklerin varlığı açıkça doğrulanmaktadır. Bu bulgular, hedeflenen selüloz yapısının başarıyla elde edildiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, yapıda özellikle 19° ve 20° ’de küçük piklerin gözlemlenmesi ve amorf karakterin belirgin olması, elde edilen selülozun kristalinitesinin düşük olduğuna işaret etmektedir. Amorf karakterin düzeyini belirlemek amacıyla her iki yapı için yüzde kristalinite değerleri hesaplanmıştır. Yüzde kristalinite değerinin belirlenmesinde aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$C = 100 \cdot \frac{I_{200} - I_{non-cr}}{I_{200}} (\%) \quad (1)$$

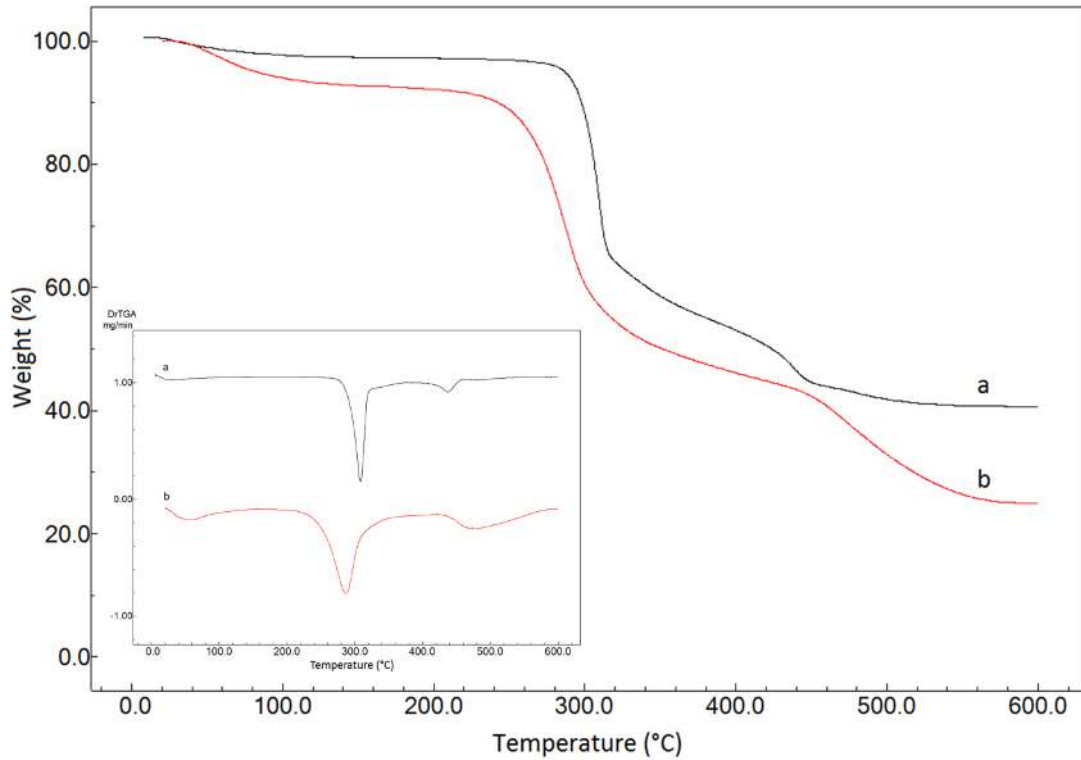
Kristalinite indeksi, Denklem (1)'den hesaplanmıştır. Ticari selüloz ve hurma çekirdeği yapısından saflaştırılmış yapılarında sırası ile % 93,95 ile % 78,21 olarak değerler elde edildi.



Şekil 30. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeği yapısından saflaştırılmış selüloz yapılarına ait X-ray spektrumları

Elde edilen selüloz yapılarının ait termal özellikleri de ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Bu analizlerde yapının termal karalılığı DTA ve TGA analizleriyle, ısı analizdeki faz geçişleri ise DSC analiziyle doğrulanmıştır. Ticari selüloz yapısının TGA analizinde (Şekil 31 a) üç farklı kütle kaybı gözlemlenmiştir. Birinci kütle kaybı, 50°C ile 110°C arasında gerçekleşmekte olup yapıdaki nemin uzaklaşmasından kaynaklanmakta ve yaklaşık %3,09 düzeyinde seyretmektedir. İkinci kütle kaybı 280°C ile 310°C arasında meydana gelmekte; selüloz ünitelerindeki yan dalların bozunması, çapraz bağlanma noktalarının kırılması ve üç boyutlu selüloz kristal yapısının dağılmasından kaynaklanmaktadır. Üçüncü kütle kaybı ise 300°C ile 500°C arasında gözlemlenmekte ve selüloz yapısının termal bozunmasına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Hurma çekirdeğinden elde edilen selülozda da benzer şekilde üç kütle kaybı bölgesi tespit edilmiştir. Yaklaşık % 6,85 düzeyinde gerçekleşen birinci kütle kaybı, 50°C ile 120°C arasında meydana gelmekte ve yapıdaki serbest nemin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. İkinci kütle kaybı 200°C ile 350°C arasında gözlemlenmekte olup selülozun üç boyutlu yapısının dağılmasından kaynaklanmaktadır (Goyal ve ark.,2008) Bu kütle kaybı bölgesinin ticari selüloza kıyasla daha geniş bir sıcaklık aralığına yayılması, elde edilen selüloz yapısının yüksek amorf karakterine bağlanmaktadır. Bu durum, selüloz yapısının daha gevşek

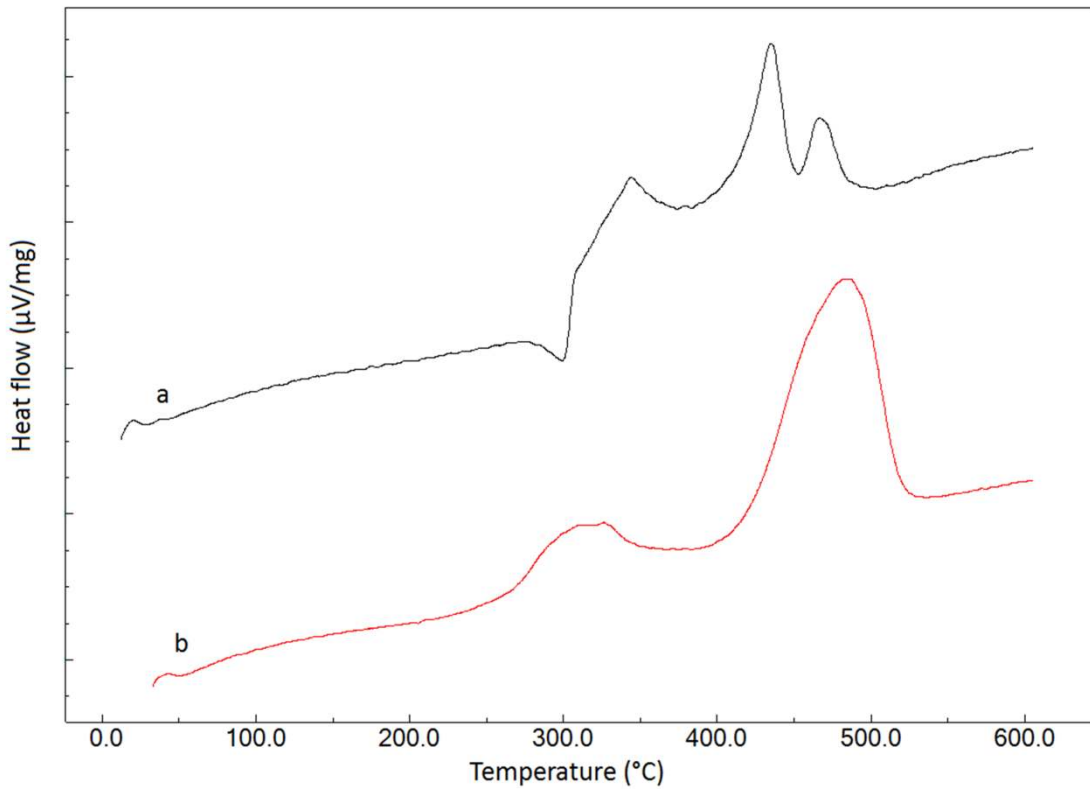
istiflenmesine ve daha fazla nem absorplamasına yol açmaktadır. Son kütle kaybı ise 400°C ile 550°C arasında görülmekte ve selüloz yapısının termal bozunmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 31'deki iç grafikte bu pik yapıları, diferansiyel dönüşüm yöntemiyle daha net biçimde sunulmuştur. Söz konusu grafikte ticari selüloza ait yaklaşık 100°C civarında oldukça küçük pik, yapıdaki nem miktarının düşük olduğuna işaret etmektedir. Hurma çekirdeğinden elde edilen selüloz yapısında ise bu pik daha geniş bir aralıkta ve yoğunlukta gözlemlenmektedir. İkinci ve temel pik, ticari selüloz yapısında oldukça keskin ve belirgin bir şekilde ortaya çıkarken saflaştırılan selüloz yapısında daha geniş bir profil sergilemekte ve yapının yüksek olan amorf karakterini doğrulamaktadır. Üçüncü pikler ise her iki yapıda termal bozunma süreçlerine karşılık gelmektedir.



Şekil 31. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz yapılarına ait TGA termogramları ve diferansiyel TGA eğrileri (iç grafik).

Şekil 32'de ticari selüloz (a) ve hurma çekirdeği yapısından saflaştırılmış selüloz (b) örneklerine ait DTA termogramları sunulmuştur. Bu termogramlarda, ticari selüloz yapısında belirgin olarak bir endotermik ve üç ekzotermik pik gözlemlenmiştir. İlk endotermik pik, yapıdaki nemin uzaklaşması için gerekli olan enerjiyi göstermekte olup yaklaşık 100°C civarında ortaya çıkmaktadır. 16,42 J/g belirlenen bu enerji, selüloz yapısındaki nem miktarının düşük olduğunu göstermektedir. İkinci pik ekzotermik karakterde olup 300°C ile 384°C arasında gerçekleşmekte ve 1,47 kJ/g enerji açığa çıktığını göstermektedir. Bu pik, selüloz zincirlerinin bir birinden ayrılmasını temsil etmektedir. Üçüncü pik de ekzotermik olup 400°C ile 453°C arasında görülmekte ve 779 J/g açığa çıktığını göstermektedir. Bu pik, yan grup ve dalların bozunmasından kaynaklanmaktadır. Son pik ise 453°C ile

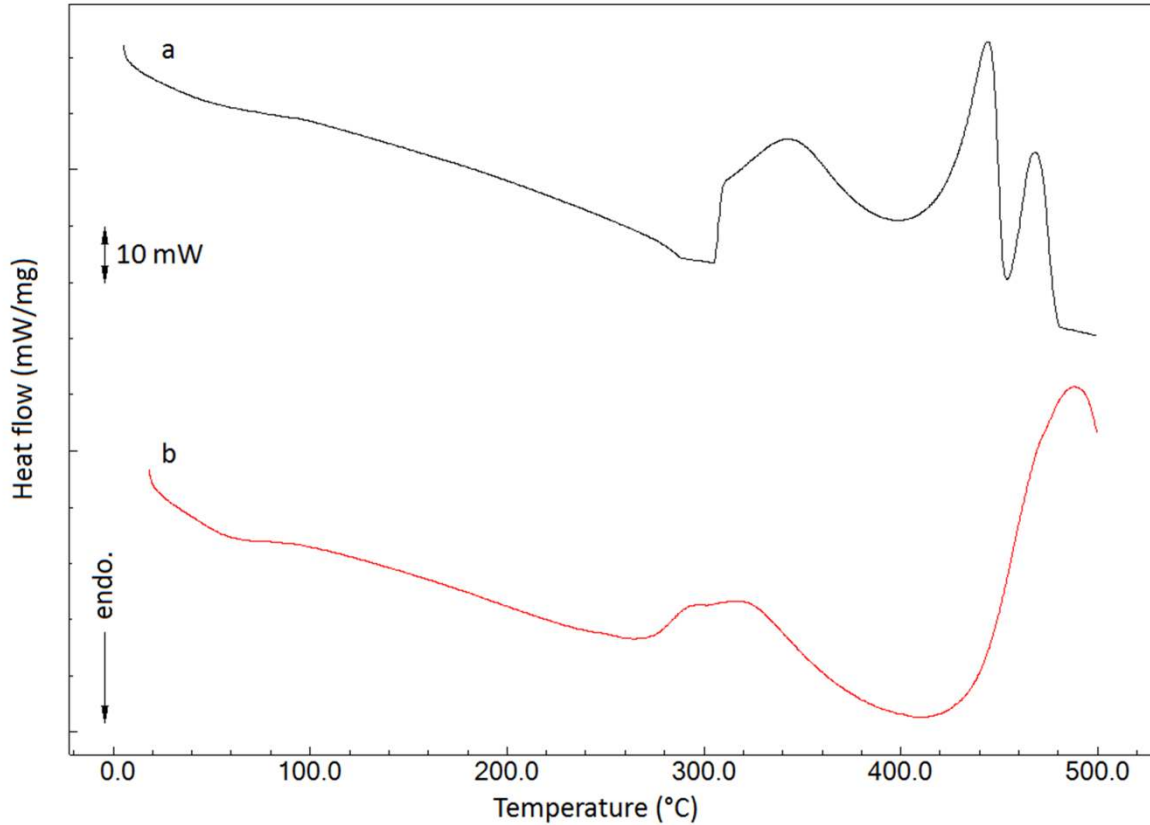
503°C arasında gözlenen ekzotermik bir olup 291 J/g enerji çıkışını göstermektedir. Bu durum, selülozik yapının termal bozulmasını ifade etmektedir. Hurma çekirdeğinden elde edilen selüloz yapısı bir endotermik ve iki ekzotermik pik göstermiştir. Bu yapıda ilk endotermik pik, yapıdaki nem miktarının ticari selüloza göre daha fazla olması nedeniyle yaklaşık 31,85 J/g enerji gerektirir. İkinci pik ekzotermik karakterde olup 250°C ile 360°C arasında gözlemlenmiştir. Bu pik, selüloz zincirlerinin dağılması ve birbirinden uzaklaşması ile ilişkilidir. Söz konusu ekzotermik olay sırasında 678 J/g enerji açığa çıkmıştır. Son ve geniş pik ise 400°C ile 535°C arasında gerçekleşen ekzotermik bir olaydır. Bu pik, selüloz yapısındaki yan grupların ayrılması ve polimerik yapının termal bozunması sırasında meydana gelmiştir. Bu ekzotermik pik sırasında 3,75 kJ/g enerji açığa çıkmaktadır. Ticari selüloz yapısında bu iki termal olay ayrı ayrı gözlemlenirken hurma çekirdeğinden, hurma çekirdeğinden elde edilen selülozda tek bir geniş pik olarak içi içe geçmiş şekilde görülmüştür. Sonuç olarak, her iki yapının da benzer termal değişimler gösterdiği ve bu değişimlerin literatür ile uyumlu olduğu belirlenmiştir (Szczęśniak ve ark.,2008).



Şekil 32. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz yapılarına ait DTA eğrileri.

Çalışmada, ticari selüloz ve hurma çekirdeğinden saflaştırılan selüloz yapılarının termal geçişlerini belirlemek amacıyla DSC analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 33). Elde edilen DSC eğrilerinin, DTA eğrileri ile uyumlu olduğu görülmüş; ayrıca bu eğrilerin literatürde selüloz yapıları için bildirilen DSC sonuçlarıyla da benzerlik gösterdiği belirlenmiştir (Unlu ve ark.,2023). Ticari selüloz yapısının DSC eğrisinde dört farklı termal değişim gözlemlenmiştir. Birinci değişim, selüloz yapısının

dehidrasyonundan kaynaklanmakta olup bu süreç için 105,23 J/g enerji gerekmektedir. Diğer değişimler ise ekzotermik karakterdedir ve selüloz yapısının kademeli bozunmasından kaynaklanmaktadır. Ticari selüloz yapısı; sırasıyla selüloz gruplarının dağılması, yan grupların dehidrasyonu ve yapısal bozunma süreçleriyle parçalanmaktadır. Bu üç değişim sırasında sırasıyla 1,86 kJ/g, 1,41 kJ/g ve 0,63 kJ/g enerji açığa çıkmaktadır. Bulgular, ticari selüloz yapısı yaklaşık olarak 290°C'ye kadar termal kararlılığını koruduğunu göstermektedir. Hurma çekirdeğinden elde edilen selüloz yapısında ise DSC analizleri sonucunda eğrisinde ise üç farklı termal değişim tespit edilmiştir. Birinci değişim, selüloz yapısının termal dehidrasyonundan kaynaklanmakta olup bu süreç için 231,38 J/g enerji gerekmektedir. Diğer değişimler ise yapısal bozunma ile ilişkilidir. Şekil 33'deki DSC termogramı incelendiğinde, özellikle 240-380°C arasında belirgin ve net bir pik gözlenmektedir. Bu pik, selüloz yapıdaki β -1,4 bağlarının kırılması sonucu oluşmakta ve üç boyutlu yapının parçalanmasına neden olmaktadır (Unlu ve ark.,2023). Şekil 33 (b)'ye göre hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz yapısının DSC analizine göre yaklaşık olarak 260°C'ye kadar termal kararlılık gösterdiği belirlenmiştir.

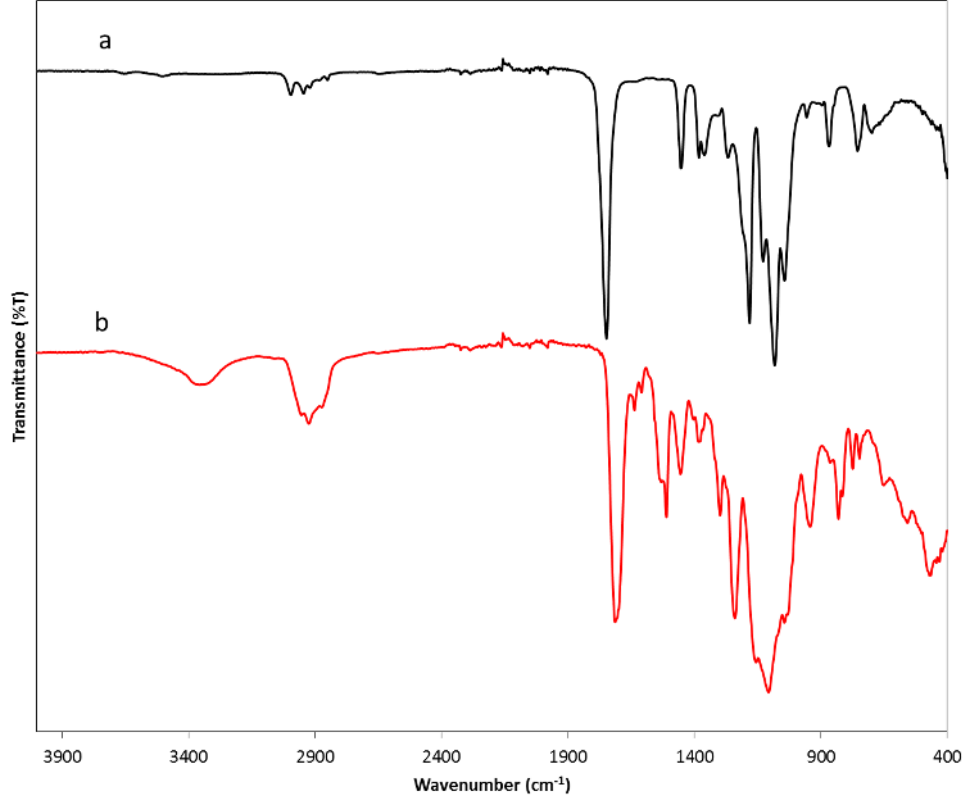


Şekil 33. a) Ticari selüloz ve b) Hurma çekirdeğinden saflaştırılmış selüloz yapılarına ait DSC eğrileri.

5.1.2. Saf Reçine Ve Selüloz Katkılı Recineden Üretilen Lattice Greftlerin Karakterizasyonu

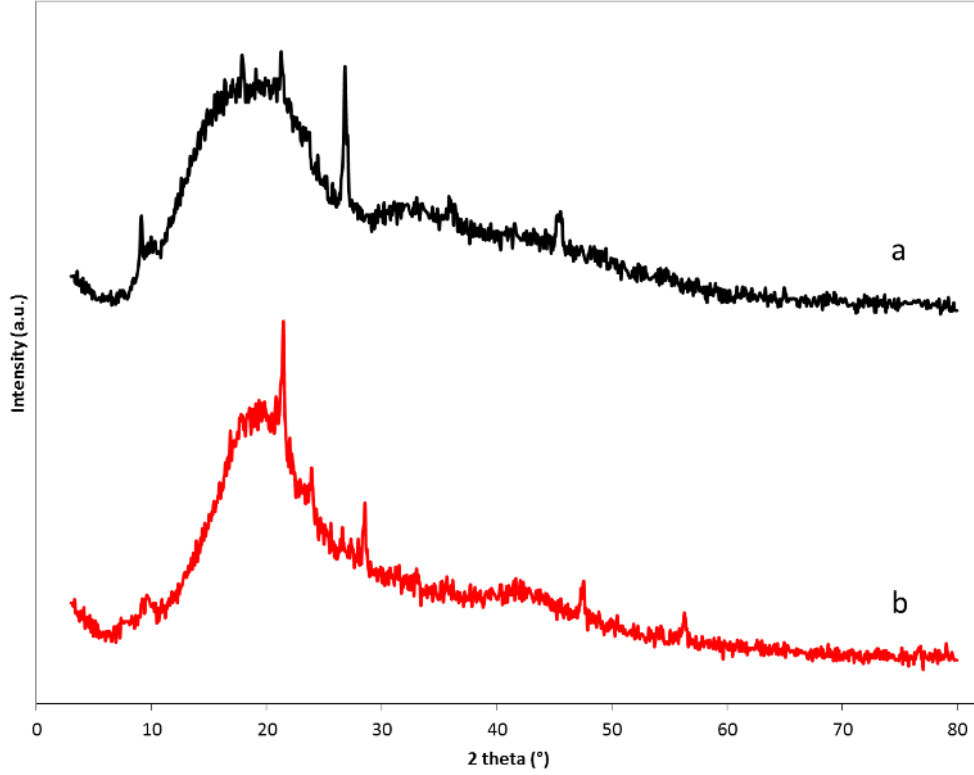
Çalışma kapsamında, selüloz katkıli lattice greft örneği ile selüloz içermeyen lattice greft örneği karşılaştırmalı olarak karakterize edilmiştir. Yapısal karakterizasyon, öncelikle FTIR spektrum

analizi ile gerçekleştirildi. Şekil 34 (a)'da selüloz içermeyen saf reçine lattice greft örneğine ait FTIR spektrumu sunulmaktadır. Bu spektrumda 2850–2975 cm^{-1} civarında alifatik CH_2 ünitelerine ait C-H gerilme piki gözlemlenmiştir. Ayrıca 1750 cm^{-1} 'de poliakrilat yapısına özgü C=O gerilme titreşimi tespit edilmiştir. Reçine yapısına ait 714,760 ve 874 cm^{-1} 'deki pikler, CH_2 ünitelerinin sallama ve düzlem dışı sallama titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1143 cm^{-1} 'de C-O-C grubundan kaynaklanan asimetrik bir gerilme piki, 1280 cm^{-1} 'de etil karbonil grubundaki C-C-O gerilme titreşimleri ve 1440 cm^{-1} 'de C-H deformasyon piki gözlemlenmiştir. Yaklaşık 1380 cm^{-1} 'deki pik ise polimerik yapının ana zincirine ait C-C gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Söz konusu piklerin tamamı, reçine yapısını oluşturan polimerik yapıyı doğrulamaktadır (Raheem ve Majid,2020; Duan ve ark.,2008; Suresh ve ark.,2017). Selüloz katkılı lattice greft yapısına ait FTIR spektrumu Şekil 34 (b)'de verilmiştir. Bu yapı incelendiğinde, selüloz yapısından ve polimer matrisinden kaynaklanan piklerin bir arada bulunduğu görülmektedir. Özellikle selüloz yapısındaki –OH gruplarının hidrojen bağlarından kaynaklı olarak 3050 cm^{-1} ile 3600 cm^{-1} aralığında geniş bir bant gözlemlenmiştir. 2850-2950 cm^{-1} 'deki pik, selüloz yapısındaki CH_2 ünitelerinden kaynaklı olarak genişlemiş bir profil sergilemektedir. Selüloz yapısına ait C-O-C eterik gerilme titreşimi 1110 cm^{-1} 'de belirgin bir pik olarak, C-O gerilme piki ise 1065 cm^{-1} 'de gözlemlenmiştir. Bu piklere ek olarak, 480 cm^{-1} 'de C-H ve yaklaşık 790 cm^{-1} civarında β -1,4 bağından kaynaklanan pikler de tespit edilmiştir (Sharma ve ark.,2023). Selüloza ait olan bu piklerin yanı sıra Şekil 34 (b)'de poliakrilat yapısına özgü pikler de net biçimde gözlemlenmiştir. 1746 cm^{-1} 'de C=O gerilme titreşimi, 1386 cm^{-1} 'de polimerik yapının ana zincirine ait C-C gerilme titreşimi, 1246 cm^{-1} 'de C-C-O piki ve 1160 cm^{-1} 'de C-O-C esterik gerilme piki, poliakrilat yapısının varlığını doğrulamaktadır. Tüm bu bulgular, poliakrilat-selüloz lattice greft yapısının başarıyla elde edildiğini ve hedeflenen yapının homojen bir şekilde oluşturulduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 34. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait FTIR spektrumları.

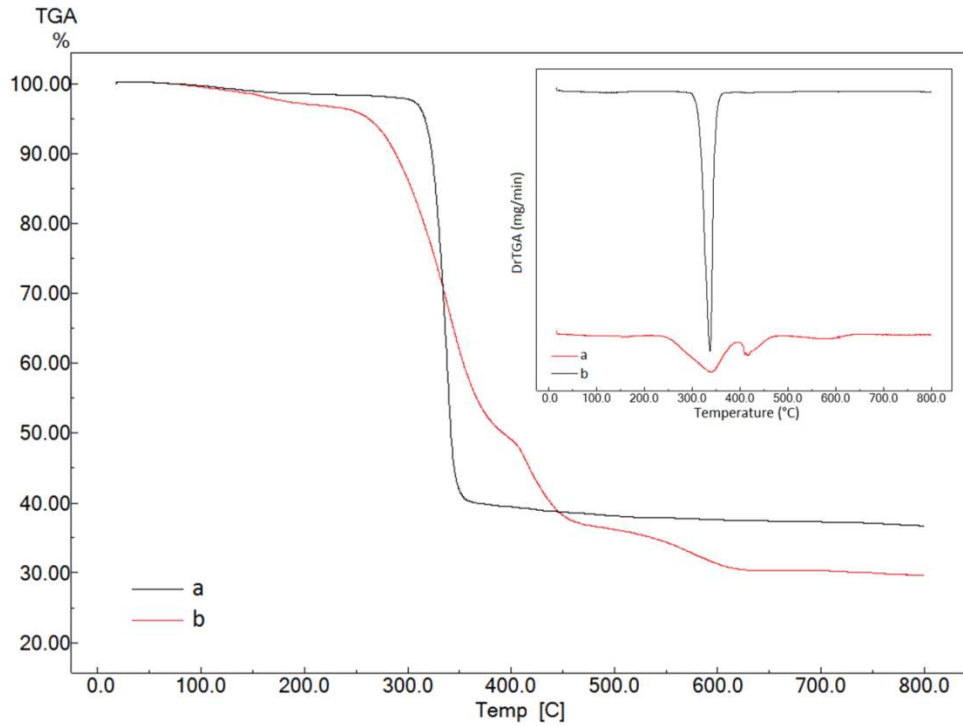
Şekil 35’de saf reçineden yapılan lattice greft (a) ve selüloz katkılı reçineden üretilen lattice greft (b) yapılarına ait X-ışını kırınımı (XRD) spektrumları sunulmaktadır. Şekil 35 (a)’da verilen saf reçineden yapılan lattice greft yapısının XRD spektrumunda; yaklaşık 10°’de 111 piki, yaklaşık 26°’de 112 piki ve 36°’de 211 piki gözlemlenmiştir (Cavallo ve ark.,2023; Akbay ve ark.,2025). Selüloz katkılı lattice greft yapısında ise selülozdan kaynaklı olarak yaklaşık 10° ve 22,5° ve 28,5°’lerde sırasıyla 110, 200 ve 040 kristalografik düzlemlerine ait karakteristik selüloz pikleri tespit edilmiştir. Bu pikler, selüloz yapısının klasik Selüloz Tip I kristal yapısına sahip olduğunu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, her iki greft yapısında da yaklaşık 20° civarında geniş bir amorf bant gözlemlenmiştir. Elde edilen bu lattice greftlerin termal özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, her iki yapının termal karakteristikleri TGA, DTA ve DSC analizleri ile incelenmiştir.



Şekil 35. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait X-ray spektrumları.

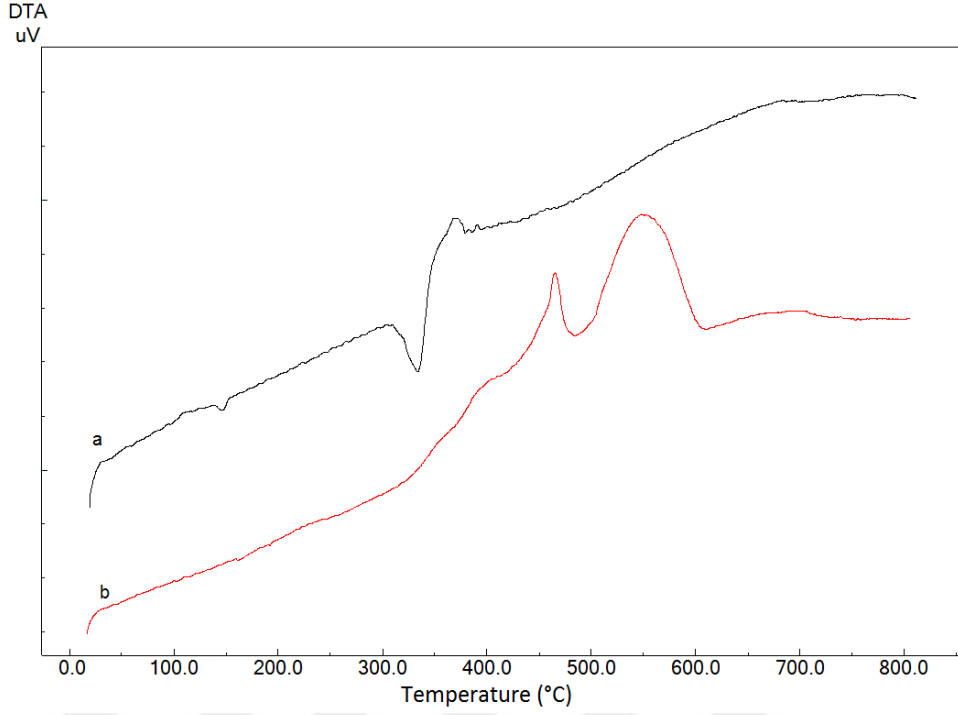
Saf reçineden yapılan lattice greft (a) ve selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft (b) yapılarına ait TGA termogramları Şekil 36'da sunulmuştur. Saf reçineden üretilen lattice greft yapısına ait termogram incelendiğinde iki temel kütle kaybı görülmektedir. Birinci kütle kaybı, 90°C ile 150°C arasında meydana gelmekte olup yaklaşık %1,134 düzeyindedir ve polimer yapısında bulunan nemin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. İkinci kütle kaybı ise polimer yapısının termal degradasyonuna karşılık gelmekte olup yaklaşık 300°C civarında başlayan ve keskin bir şekilde gerçekleşen kütle kaybıdır. Selüloz katkılı lattice greft yapısında ise dört farklı kütle kaybı bölgesi tespit edilmiştir. Birinci kütle kaybı nemden kaynaklanmakta olup yaklaşık %2,55 düzeyindedir ve 60°C'de başlayıp ve 180°C'ye kadar devam etmektedir. Bu kütle kaybının saf reçineye kıyasla daha yüksek olması, selülozun yapıya kazandırdığı hidrofilik özellik ile açıklanmaktadır. İkinci kütle kaybı 295°C ile 395°C arasında gerçekleşmekte ve yaklaşık %50 oranında olup polimer matrisin bozunmasından kaynaklanmaktadır. Üçüncü kütle kaybı 400°C ile 475°C arasında gözlemlenmekte ve selüloz yapısındaki çapraz bağlama noktalarının kırılması ile üç boyutlu kristal yapının dağılmasına karşılık gelmektedir. Son kütle kaybı ise 490°C ile 620°C arasında meydana gelmekte olup kalıntıların termal degradasyonu ile ilişkilidir. Termal kütle kayıplarının başlangıç ve bitiş sıcaklıklarının daha net belirlenebilmesi amacıyla türev termogravimetrik analiz (DTG) eğrileri elde edilmiş ve Şekil 36'da iç grafik olarak sunulmuştur. Saf reçineden üretilen lattice greft yapısına ait DTG eğrisinde, 295°C'de

başlayan ve yaklaşık 365°C’de tamamlanan keskin ve belirgin bir bozunma piki gözlemlenmiştir. Bu durum, saf reçine yapısının yaklaşık 365°C’de tamamen bozunduğunu göstermektedir. Buna karşılık, selüloz katkılı yapı kademeli bir bozunma davranışı sergilemektedir. Bu yapı, temel olarak iki aşamada bozunmakta olup birinci aşama 250°C ile 390°C arasında, ikinci aşama ise 400°C ile 480°C arasında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, selüloz katkılı yapının daha uzun sürede ve daha yüksek sıcaklıklarda tamamen bozunduğu belirlenmiştir.



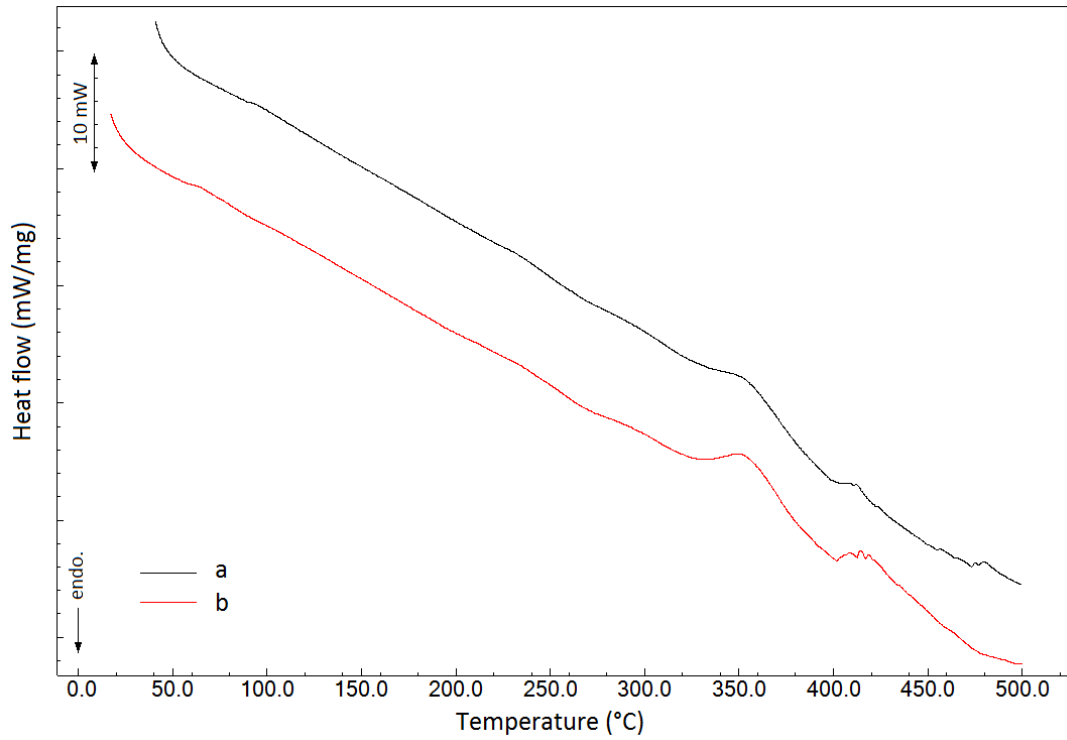
Şekil 36. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait TGA termogramları ve diferansiyel TGA eğrileri (iç grafik).

Elde edilen saf reçine esaslı lattice greft ile selüloz katkılı reçine esaslı lattice greftin termal analizi, DTA verileri ile desteklenmiştir. Saf reçine (a) ve selüloz katkılı reçine (b) temelli greftlere ait DTA eğrileri Şekil 37’de sunulmuştur. Saf reçineden üretilen lattice greft yapısının DTA eğrisi incelendiğinde, yaklaşık 115°C’de bir Tg (camsı geçiş) sıcaklığı gözlemlenmektedir. Bu aşamayı takiben 140°C ile 160°C arasında bir erime sıcaklığı, yaklaşık 320°C ile 369°C arasında ise keskin bir bozunma ekzoterm piki tespit edilmiştir. Selüloz katkılı lattice greft yapısında ise camsı geçiş ve erime geçişlerinin daha düşük şiddette olduğu görülmektedir. Bu yapıda Tg sıcaklığı 111°C, erime sıcaklığı ise yaklaşık 160°C ile 175°C aralığında kaydedilmiştir. DTA termogramına göre selüloz katkılı lattice greftin bozunması üç kademede gerçekleşmektedir: 300°C ile 410°C arasında yan grupların bozunması, 411°C ile 480°C arasında polimerik yapı ile selülozun üç boyutlu yapısının bozunması ve 480°C’den yaklaşık 600°C’ye kadar olan süreçte ise karbonizasyon ile külleşme aşamaları gözlenmektedir.



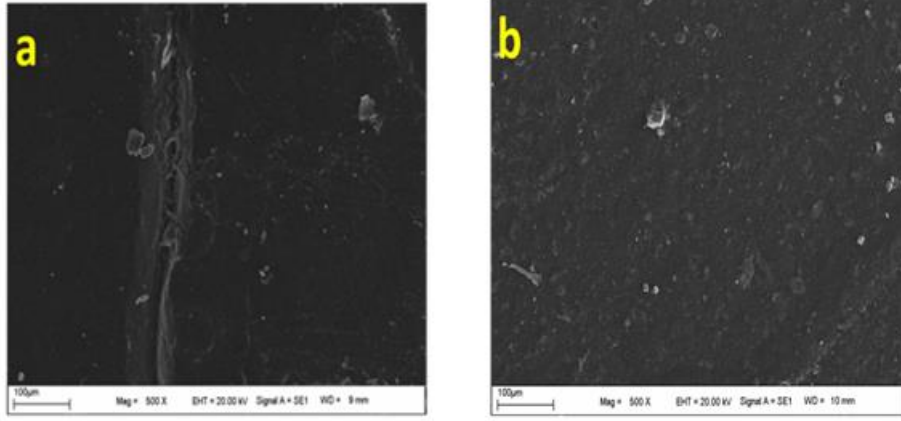
Şekil 37. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait DTA eğrileri.

Şekil 38’de, saf reçineden üretilen lattice greft (a) ve selüloz katkılı reçineden üretilen lattice greft (b) yapılarına ait DSC eğrileri sunulmuştur. Elde edilen DSC eğrilerinin, DTA eğrileri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Saf reçineden üretilen lattice greft yapısı, yaklaşık 300°C ile 370°C arasında tek bir bozunma ekzoterm piki göstermektedir. Buna karşılık, selüloz katkılı yapı daha karmaşık bir termal davranış sergilemektedir. Bu yapıda, 300°C ile 400°C arasında yan grupların bozunmasından kaynaklanan bir ekzotermik pik, 400°C ile 480°C arasında ise polimerik yapı ile selülozun üç boyutlu yapısının bozunmasından kaynaklanan ikinci bir ekzotermik pik gözlemlenmiştir. Elde edilen tüm termal analiz verileri, hedeflenen selüloz katkılı lattice greft yapısının başarıyla elde edildiğini doğrulamaktadır.



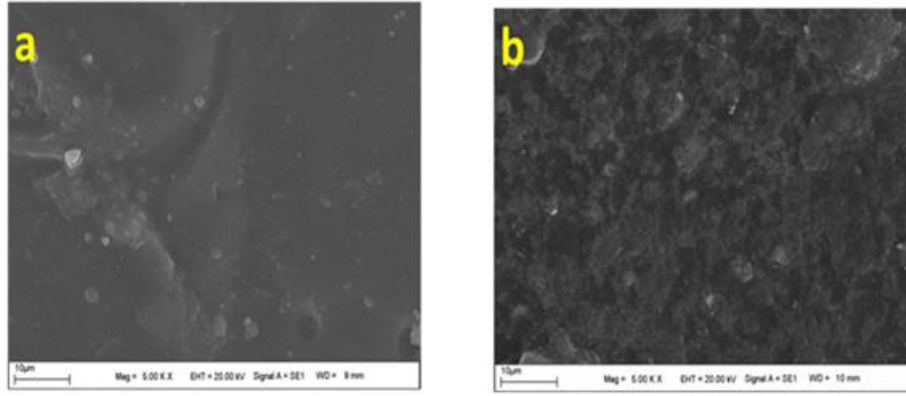
Şekil 38. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait DSC eğrileri.

Çalışma kapsamında elde edilen saf reçineden üretilen lattice greft (a) ve selüloz katkılı reçineden üretilen lattice greft (b) yapıların yüzey ve morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri Şekil 39 ve Şekil 40'ta karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 39 (a)'da saf reçineden üretilen lattice greft yapısının SEM görüntülerinde, oldukça homojen ve pürüzsüz bir yüzey morfolojisi gözlemlenmiştir. Yapının katkısız ve tekdüze bir görünüm sergilediği, tek fazlı bir sistem olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, SEM incelemesi sırasında elektron etkileşimlerinden kaynaklı olarak yer yer çatlak ve yarılmaların olduğu görülmüştür. Yapının elektron akımına karşı hassas olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 39 (b)'de verilen selüloz katkılı lattice greft yapısında ise daha pürüzlü ve heterojen bir yüzey yapısı gözlemlenmiştir. Katkı olarak ilave edilen selüloz partiküllerinin, polimer ana faz içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 39. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait düşük büyütme SEM görüntüleri.

Selüloz katkı yapısını daha net ortaya koyabilmek amacıyla Şekil 40'ta yüksek büyütme SEM görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntülerde, saf reçineden üretilen lattice greft yapısının daha düz, pürüzsüz ve homojen bir yüzey morfolojisine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 40 (b)'de ise reçine ana fazı içerisinde katkılanan selüloz ünitelerinin yapı boyunca homojen bir şekilde dağıldığı ve bu durumun yüzey pürüzlülüğünü artırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yüzeyde elektron akımından kaynaklanan derin çatlakların oluşmadığı tespit edilmiştir.



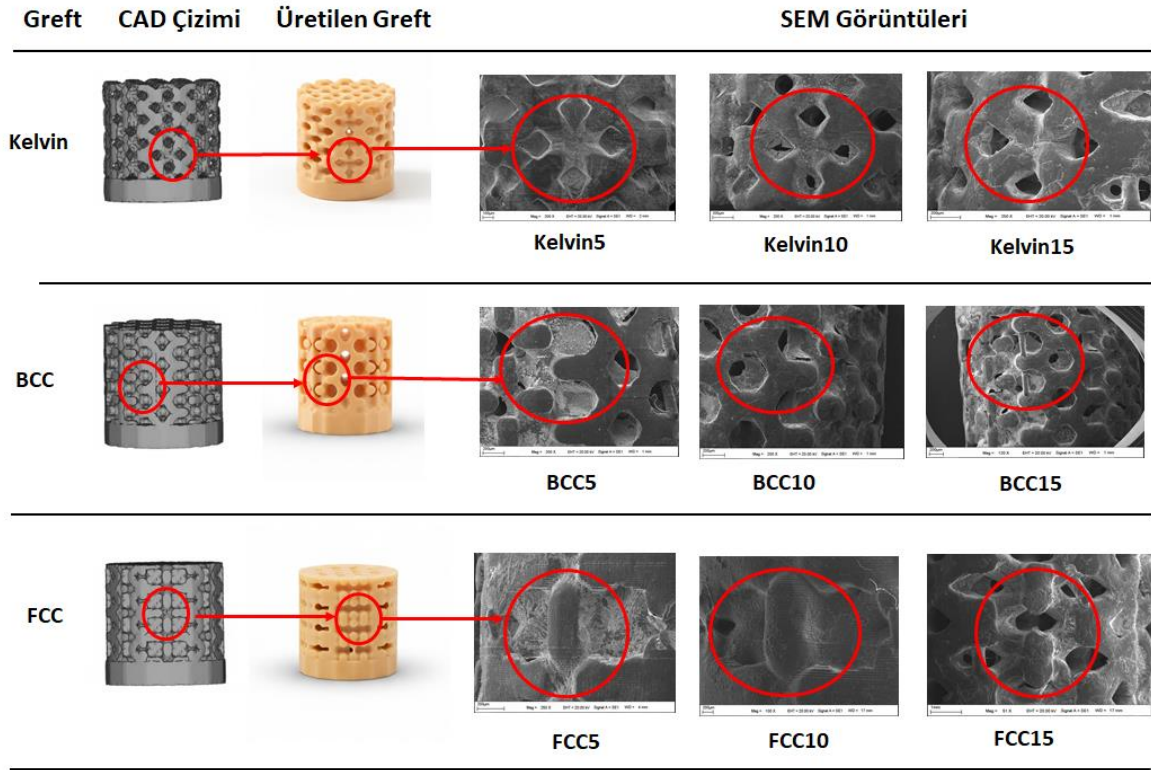
Şekil 40. a) Saf reçineden yapılan lattice greft ve b) Selüloz katkılı reçineden yapılan lattice greft yapılarına ait yüksek büyütme SEM görüntüleri.

5.2. Mekanik Testlerin Sonuçları

5.2.1. Greftlerin Yüzey Defektlerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada MSLA yöntemiyle üretilen selüloz takviyeli lattice greftlerin boyut hassasiyeti ve yüzey defektleri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular hem greft kompozisyonunun hem de geometrik tasarımın üretim kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Özellikle BCC ve FCC gibi düğüm noktalarının daha keskin olduğu geometrilerde üretim sırasında fotokürleme

yönüne dik olan ince strut bölgelerinde lokal çökme, yanal şişme ve mikro çatlaklanma eğilimi belirginleşmiştir. Bu tür bozulmalar literatürde keskin köşeli kafeslerde UV ışığının düzensiz dağılım göstermesi ve fotopolimer zincirlerinin homojen şekilde bağlanamamasıyla ilişkili olarak açıklanmaktadır (Gauvin ve ark.,2012). SEM görüntülerinde özellikle kırmızı halka içindeki bölgeler incelendiğinde selüloz oranı arttıkça yapısal bütünlüğün bozulduğu ve tasarlanan dolu alanlarda mikro boşluklar, çatlaklar ve eksik üretim alanları olduğu görülmektedir (Şekil 41).



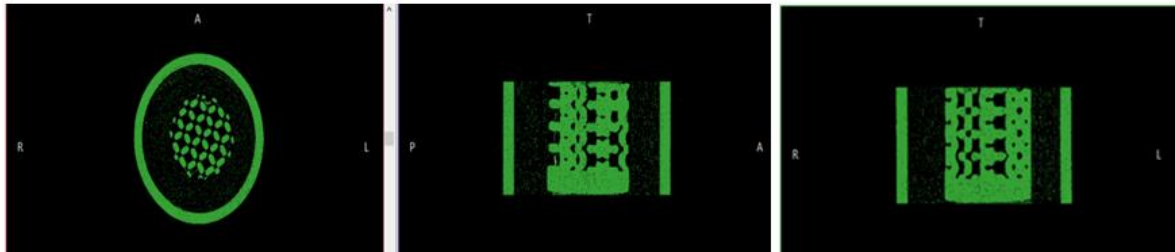
Şekil 41. Üretilen lattice greftlerde selüloz oranına göre meydana gelen yüzey defektleri.

SEM görüntüleri üzerinde yapılan incelemeler, selüloz oranının %5'ten %15'e çıkarılmasının tüm kafes geometrilerinde üretim kusurlarını tetiklediğini ortaya koymuştur. Düşük selüloz oranına sahip greftlerde (**FCC5** ve **Kelvin5**) strut yüzeyleri daha homojen ve sürekli bir yapı sergilerken, selüloz oranı arttıkça özellikle **FCC15**, **BCC15** ve **Kelvin15** greftlerinin kırmızı ile işaretlenmiş bölgelerinde mikro-ölçekli çatlaklar, yer yer malzeme eksiklikleri ve düzensiz boşluklar olduğu gözlenmiştir. Bu yapısal süreksizlikler, literatürde yüksek dolgu oranına sahip fotopolimer reçinelerin artan viskozitesi nedeniyle dar kanallara nüfuz edememesi ve selüloz liflerinin UV ışığını bloke ederek katmanlar arası bağlanma enerjisini düşürmesiyle açıklanmaktadır (Palucci ve ark.,2022). Geometrik olarak daha izotropik davranan Kelvin birim hücresi, hem yük hem de kurlenme gerilmelerini daha dengeli dağıttığından bozulmaların şiddeti azalmıştır ve yüzey sürekliliğinin tasarlanan değerlere daha yakın kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, karmaşık mimarilerde şekil doğruluğunun yalnızca baskı parametrelerine değil aynı zamanda hücre topolojisine de bağlı olduğuna işaret eden bulgularla uyum

göstermektedir (Gibson ve ark.,2021). Selüloz oranının %5'ten %15'e yükseltilmesi, tüm greft tiplerinde bozulmayı artırmış; özellikle yüksek selüloz içeren greftlerde strut kalınlaşması, birleşim noktalarında selüloz aglomerasyonuna bağlı düzensiz şişme ve katmanlar arası kenar yuvarlanması daha sık gözlenmiştir. Fotokürlenebilir reçinelere selüloz nano yapıların eklenmesinin viskoziteyi artırdığı, ışık saçılımını kuvvetlendirdiği ve buna bağlı olarak baskı çözünürlüğü ile boyut doğruluğunu etkilediği literatürdeki çalışmalarda mevcuttur (Palaganas ve ark.,2017; Poothanari ve ark.,2022). Sonuç olarak gözlenen yüzey bozulmaları yalnızca malzeme kompozisyonundaki değişimle değil, aynı zamanda birim hücre geometrisinin doğasıyla da ilişkilidir. BCC hücre yapısı, merkezden köşelere uzanan diyagonal strutlara sahip olduğundan düğüm noktalarında gerilme ve kürlenme büzülmesi lokal olarak yoğunlaşabilmektedir. Bu durum, özellikle yüksek viskoziteli sistemlerde birleşim bölgelerinde şişme ve düzensiz katılma eğilimini artırabilmektedir. FCC geometride ise daha fazla bağlantı sayısı ve görece daha karmaşık düğüm noktaları bulunması, reçinenin dar kesitli bölgelerde homojen dağılmasını zorlaştırarak yüksek selüloz oranında yüzey süreksizliklerini belirginleştirebilmektedir. Buna karşılık Kelvin hücresi daha düzenli ve izotropik strut organizasyonu sayesinde yük ve hacimsel büzülmeyi daha dengeli yaymakta bu da hem kürlenme gerilmelerinin hem de malzeme birikiminin daha kontrollü dağılmasına katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla selüloz oranının artırılmasıyla ortaya çıkan viskozite ve ışık geçirgenliği kaynaklı etkiler, her bir hücre tipinin geometrik karakteriyle etkileşime girerek yüzey bozulmasının şiddetini belirlemektedir. Bu bulgular, greft tasarımında malzeme içeriği ile hücre topolojisinin birlikte optimize edilmesinin kritik olduğunu göstermektedir.

5.2.2. Greftlerin Boyut Hassasiyetinin Değerlendirilmesi

DICOM dosyalarından STL formatına dönüştürülen (Şekil.42) ve CAD ortamında $10 \times 10 \times 10$ mm boyutlarında tasarlanan FCC, BCC ve Kelvin lattice greftler üzerinde yapılan boyutsal analizler selüloz içeriği ile üretim doğruluğu arasında belirgin bir ilişki bulunduğunu göstermiştir.



Şekil 42. Örnek DICOM dosyasını STL formata dönüştürme.

Tüm lattice greftlerde yapılan DICOM tabanlı ölçümler sonucunda, CAD geometrisinden sapmalar olduğu görülmüştür. Özellikle selüloz yüzdesinin artmasıyla birlikte hem X, Y, Z yönlerinde hem de greft morfolojisinde bozulma eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, selüloz gibi lifli takviye

malzemesinin fotokürlenebilir reçinelerin davranışını değiştirdiğini, viskoziteyi artırarak dar kanallara akışı sınırladığını ve ışık saçılımını kuvvetlendirerek polimerizasyonun homojenliğini azalttığını bildiren çalışmalarla uyum göstermektedir (Bae ve Kim,2021). Tablo 7’de greftlerin CAD tasarım ölçüleri ile DICOM dosyası aracılığıyla STL formata çevrilip ölçüleri alınan greftler arasındaki boyutsal sapmaların özeti verilmiştir.

Tablo 7. CAD tasarımı ile üretilen lattice greftler arasındaki boyutsal sapma değerleri.

Greft	CAD X (mm)	Üretilen X (mm)	ΔX (mm)	CAD Y (mm)	Üretilen Y (mm)	ΔY (mm)	CAD Z (mm)	Üretilen Z (mm)	ΔZ (mm)	Ort. mutlak sapma (%)
FCC 5	10,00	9,92	-0,08	10,00	9,93	-0,07	10,00	9,94	-0,06	0,70
FCC10	10,00	9,88	-0,12	10,00	9,89	-0,11	10,00	9,90	-0,10	1,10
FCC15	10,00	9,82	-0,18	10,00	9,83	-0,17	10,00	9,84	-0,16	1,70
BCC5	10,00	9,90	-0,10	10,00	9,91	-0,09	10,00	9,92	-0,08	0,90
BCC10	10,00	9,85	-0,15	10,00	9,86	-0,14	10,00	9,87	-0,13	1,40
BCC15	10,00	9,78	-0,22	10,00	9,79	-0,21	10,00	9,80	-0,20	2,10
Kelvin5	10,00	9,94	-0,06	10,00	9,95	-0,05	10,00	9,95	-0,05	0,53
Kelvin10	10,00	9,91	-0,09	10,00	9,92	-0,08	10,00	9,92	-0,08	0,83
Kelvin15	10,00	9,86	-0,14	10,00	9,87	-0,13	10,00	9,88	-0,12	1,30

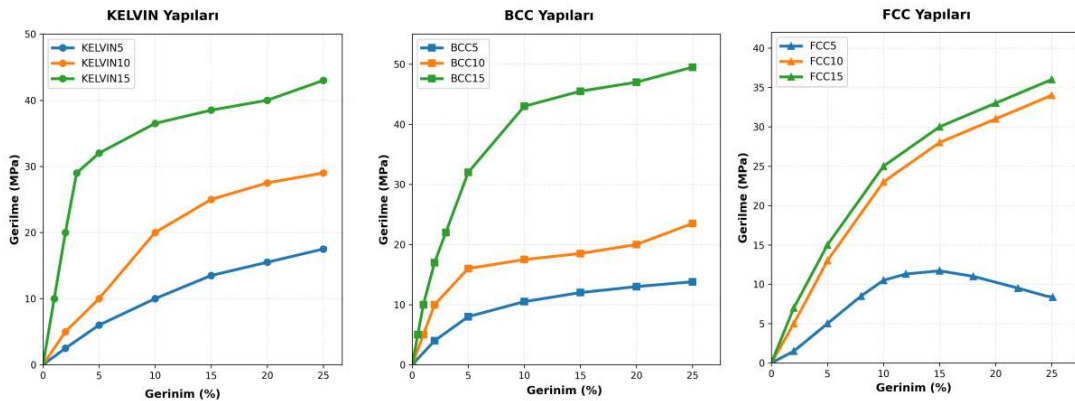
Not: En çok boyutsal sapma oluşan lattice greft modeli kırmızı ile çerçeve içine alınmıştır.

Tablo 7’ye göre düşük selüloz içeriğine (%5) sahip lattice greftlerde, tasarlanan 10 mm kenar uzunluğuna kıyasla ortalama mutlak sapmanın tüm geometriler için %1 seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Buna karşın selüloz oranı %15’e yükseltildiğinde, özellikle **BCC15** lattice greftinde sapmaların %2 düzeyine yaklaştığı görülmektedir. FCC ve BCC greftlerinde artan selüloz oranıyla birlikte X, Y ve Z yönlerinde ölçülen boyutlar CAD çiziminin değerinin altında bulunduğu saptanmış; bu durum parça büzülmesi ve gözeneklerin kısmen kapanması şeklinde yorumlanmıştır. Literatürde bu eğilim, fotokürlenebilir kompozit reçinelerde dolgu oranı arttıkça viskoelastik davranışın baskı çözünürlüğünü ve şekil geometrisini olumsuz etkilediği, özellikle yüksek dolgu yüklemelerinde baskı doğruluğunun belirgin şekilde azaldığı yönünde açıklanmaktadır (Amini ve ark.,2025). Strut kalınlığı CAD modelinde 0,50 mm olarak tanımlanmış olmasına rağmen, yüksek selüloz oranına sahip greftlerde dar bağlantı bölgelerinde malzeme yığılmaları ve kütleme kaynaklı kalınlaşmalar gözlenmiş; buna karşılık strutlar arasındaki açıklıklarda malzeme eksikliği ve mikro ölçekte boşluklar ortaya çıkmıştır. Graft geometrisi açısından değerlendirildiğinde, Tablo 7’deki veriler Kelvin birim hücre yapısının hem düşük hem de yüksek selüloz içeriklerinde en düşük ortalama boyutsal sapmayı sergilediğini ortaya koymaktadır. Kelvin hücresinin izotropik ve sürekli yüzeylerden oluşan topolojisi, MSLA sürecinde oluşan polimerizasyon büzülmesi ve katmanlar arasındaki gerilmeleri daha homojen

dağıtarak hem büzülme hem de aşırı kürlenme kaynaklı sapmaları sınırlamaktadır. Bu bağlamda Kelvin geometrisinin %15 selüloz içeriğinde dahi FCC ve BCC'ye göre daha düşük mutlak sapma değerleri sunması, MSLA tabanlı üretimde boyut hassasiyeti açısından daha avantajlı olduğuna işaret etmektedir (Dakhli ve ark.,2024). FCC ve BCC geometrilerinde gözlenen boyutsal sapmalar ise özellikle düğüm noktalarının ve keskin köşelerin yoğun olduğu bölgelerde belirginleşmiştir. Tablo 7'de de görüldüğü üzere, bu yapılarda selüloz oranının %10 ve %15 seviyelerine çıkarılmasıyla birlikte CAD'de tanımlanan X, Y ve Z yönlerinde ölçülen boyutlar anlamlı biçimde azalmıştır. Keskin kenarların ve dar bağlantı boyunlarının bulunduğu alanlarda ışığın lokal yoğunluğu ve saçılma davranışı değişmekte; bu durum bazı bölgelerde yetersiz kürlenme ve malzeme eksikliğiyle sonuçlanırken, diğer bölgelerde aşırı kürlenme ve hacimsel büzülme durumlarına neden olabilmektedir. Boyutsal analiz sonuçları bütün olarak değerlendirildiğinde, selüloz katkı oranının artmasıyla elde edilen potansiyel mekanik güçlendirme ve biyolojik avantajların belirli bir eşik sonrasında MSLA sürecinin geometrik doğruluğunu olumsuz etkilediği söylenebilir. Bu çalışmada kullanılan parametreler kapsamında %5 selüloz içeren greftler tüm geometrilerde %1'in altında ortalama boyutsal sapma ile en yüksek üretim doğruluğunu sunarken, %15 selüloz içeriğinde sapmaların %2 seviyesine yaklaştığı görülmüştür.

5.2.3. Basma Testi Ve Dinamik Nokta Takibi Sonuçları

Bu tez çalışmasında BCC, FCC ve Kelvin birim hücrelerine sahip lattice greftlerin mekanik yanıtları basma testi altında incelenmiştir. Elde edilen veriler kafes yapılı malzemelerin karakteristik deformasyon aşamaları olan elastik bölge, plato ve yoğunlaşma evrelerini sergilemektedir. Şekil 43'de sunulan gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde selüloz oranının %5'ten %15'e çıkarılmasının tüm geometrilerde dayanımı artırdığı görülmektedir.



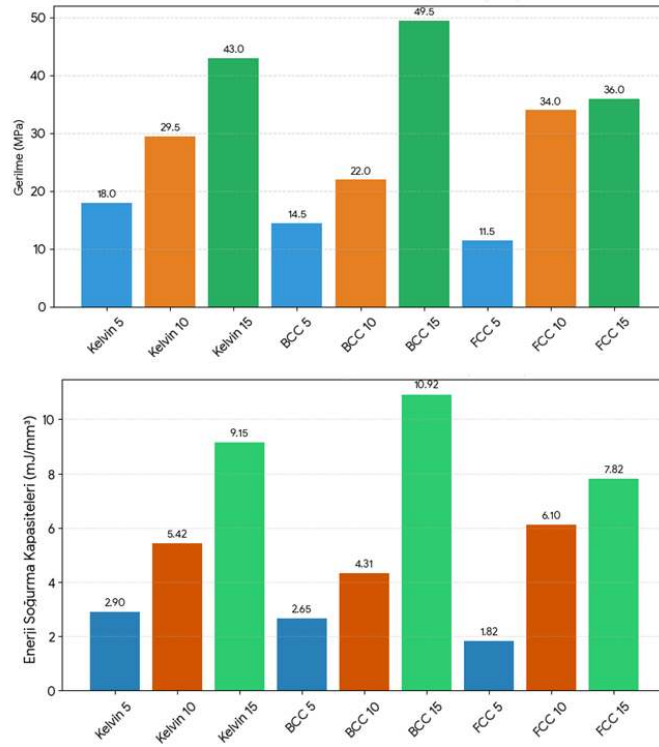
Şekil 43. Lattice greftlere ait gerilme-gerinim eğrileri.

Not: Elastik Bölge: %0 - %2.5 gerinim aralığı. Plato Bölgesi: %5 - %15 gerinim aralığı. Yoğunlaşma Bölgesi: %20 - %25 gerinim aralığı alınmıştır.

Basma testinden elde edilen sonuçlar, selüloz miktarındaki artışın polimer matrisin rijitliğini artırdığını, ancak nihai mekanik yanıtın seçilen birim hücre modeli tarafından belirlendiğini göstermektedir. **BCC15** grefti en yüksek maksimum gerilme değerine sahiptir (~49.5 MPa). Başlangıç eğimi yüksektir ve gerilme-gerinim eğrisi, önemli bir yumuşama olmaksızın neredeyse sürekli artış göstererek yüksek bir yoğunlaşma gerinimine ulaşmaktadır. Bu davranış literatürde, BCC geometrisinin özellikle gerilme baskın moda yaklaşması ve böylece hem rijitlik hem de tepe dayanımının belirgin biçimde artmasıyla ilişkilendirilmektedir (Cho ve ark., 2025; Liu ve ark., 2020; Reddy ve ark., 2025). **BCC15** greftinin yüksek dayanımının yanı sıra enerji soğurma alanı (~10.92 mJ/mm³) da **KELVIN15** (~9.15 mJ/mm³) greftine yakın seviyededir. Bu nedenle yük taşıma kapasitesinin kritik olduğu durumlarda **BCC15** grefti, çalışmadaki en uygun adaylardan biri olarak öne çıkmaktadır. **FCC5** greftinin gerilme-gerinim eğrisi, yaklaşık 11–12 MPa seviyesinde bir tepeye ulaştıktan sonra gerilmenin kademeli olarak azaldığı, belirgin bir pik sonrası yumuşama davranışı sergilemektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, FCC geometrisinin eksenel yük altında eğilme baskın davranış gösterdiğini bildirmektedir (Deng ve ark., 2022; Liu ve ark., 2024). **FCC5**'in elde edilen performansı da bu bulgularla uyumlu biçimde mekanik dayanım ve enerji soğurma açısından diğer greftlere göre daha düşük kalmaktadır. **FCC10** greftinde, **FCC5**'e göre hem başlangıç rijitliğinde hem de maksimum gerilmede belirgin artış gözlemlenmektedir. Gerilme-gerinim eğrisi yaklaşık 34 MPa civarına ulaşmakta ve %25 gerinime kadar kararlı bir şekilde yükselmektedir. Bu durum, selüloz artışının FCC greftlerinin hem eğilme hem de gerilme baskın davranış bileşenlerini güçlendirerek plato bölgesini stabilize ettiğini göstermektedir (Ertürk ve ark., 2022). **FCC10** grefti bu bakımdan, FCC geometrisi için kontrol edilebilir dayanım sağlayan bir ara basamak olarak değerlendirilmiştir. **FCC15** greftinde elde edilen maksimum gerilme (~36 MPa), **FCC10**'dan bir miktar daha yüksektir ve eğri, düşük ile orta gerinim aralıklarında belirgin bir yumuşama göstermeden artmaya devam etmektedir. Literatürde gerilme baskın yapıların düşük gerinimlerde yüksek rijitlik sunduğu, ancak bir süre sonra hücre duvarlarındaki burkulma nedeniyle ani gerilme düşüşleri yaşanabildiği belirtilmiştir; bu nedenle **BCC10** greftinde gözlemlenen pik sonrası yumuşama davranışı literatür ile örtüşmektedir (Kuhlmann-Wilsdorf, 1989). Kafes tiplerine göre gruplandırılmış eğriler, Kelvin geometrisinin diğer yapılara oranla daha kararlı bir plato bölgesi sergilediğini ortaya koymaktadır. Kelvin yapısının bu davranışı, literatürde de belirtilen eğilme baskın yapıların enerjiyi daha geniş bir gerinim aralığına yayarak sönümleme yeteneği ile ilişkilidir (Carlsson ve ark., 2024; Chen ve ark., 2023). **KELVIN5** greftinde eğri, düşük gerinimlerden itibaren hemen hemen doğrusal artan ve %25 gerinime kadar belirgin bir yumuşama göstermeden ilerleyen bir karakter sergilemektedir. Yaklaşık 18 MPa civarında sınırlı fakat nispeten düzgün artan bir dayanım elde edilmiştir. Bu davranış, literatürde eğilme baskın yapılar için tanımlanan geniş deformasyon aralığı ile uyumaktadır (Duan ve ark., 2020). **KELVIN10** greftinde eğrinin başlangıç eğimi belirgin biçimde artmış ve yaklaşık 29,5 MPa mertebesinde maksimum

gerilme elde edilmiştir. **KELVIN5** greftine kıyasla hem elastik modül hem de enerji soğurma alanı önemli ölçüde yükselmiştir. Benzer şekilde, Kelvin kafeslerin basma altında daha belirgin bir plato gerilmesi geliştirdiği ve bu sayede enerji soğurma kapasitesinin belirgin biçimde arttığı literatürdeki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Hu ve ark., 2024; Duan ve ark., 2019). **KELVIN15** grefti, Kelvin serisinin en rijit ve en fazla enerji soğuran greft türü olmuştur. Başlangıç eğiminin oldukça dik olması, bu greftin yüksek elastik modüle sahip bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Eğri yaklaşık 43 MPa'a kadar artan ani bir pik yapmış; sonrasında keskin bir düşüş göstermemiştir. Literatürdeki çalışmalara göre, üzerindeki yük miktarı fazla olan ve ağırlıklı olarak eğilme kuvvetine maruz kalan yapılarda burkulma olayı daha geç yaşanmaktadır. İncelenen bu davranış da **KELVIN15** greftinin performansı ile benzerlik göstermektedir (Rammerstorfer, 2018; Budiansky, 1974). Elde edilen sonuçlar üzerinden değerlendirildiğinde **KELVIN15** grefti, hem yüksek dayanımı hem de geniş deformasyon aralığı sayesinde enerji soğurma açısından çalışmadaki en avantajlı greftlerden biridir.

BCC5 greftinde gerilme, düşük gerinimlerde hızlı bir artışla yaklaşık 14,5 MPa seviyesine ulaşmıştır sonrasında eğri hafifçe yataylaşarak %25 gerinime kadar kısa bir plato benzeri bölge sergilemiştir. Literatürde benzer yoğunluğa sahip BCC kafesler için de sınırlı plato uzunluğu ve erken yapı burkulması nedeniyle enerji soğurma kapasitesinin orta düzeyde kaldığı gösterilmiştir (Gao ve ark., 2022). Bu bağlamda **BCC5** grefti, BCC greftleri içerisinde rijit fakat sınırlı deformasyon kapasitesine sahip bir greft olarak yorumlanmıştır. **BCC10**, **KELVIN10** ve **FCC10** greftleri, gerilme-gerinim eğrisinde belirgin bir pik ve ardından kısmi bir yumuşama göstermektedir. Bu tür pik sonrası düşüş, literatürde BCC kafeslerin göçme veya kayma tipi geliştirdiği durumlar olarak belirtilmiştir (Zhao ve ark., 2025). **BCC15** grefti, hem 880 MPa'lık en yüksek elastik modül değerine sahip olması hem de plato bölgesinde 130 MPa gibi güçlü bir direnç sergilemesi sayesinde, birim hacim başına en yüksek enerji yutma performansına ulaşmıştır. BCC geometrisinin yükü strut boyunca aksel olarak dağıtma yeteneği, selülozun sağladığı matris sertliğiyle birleştiğinde greftin çökme eşiğini yukarı çekerek enerji sönümleme kapasitesini arttırmıştır. Buna karşın Kelvin greftleri, enerji sönümleme karakteri açısından daha sünek ve stabil bir alternatif sunmaktadır. **KELVIN15** grefti, elastik bölgedeki 800 MPa'lık yüksek direncine rağmen, plato bölgesinde 60 MPa gibi daha kontrollü bir modül değeriyle enerjiyi zamana yayarak sönümlemektedir. Bu durum, Kelvin geometrisinin eğilme baskın deformasyon mekanizmasının bir sonucu olup, greftin darbe anında ani bir kırılma yerine kademeli bir ezilme sergilemesini sağlamaktadır. **FCC5** gibi düşük katkılı greftler yoğunlaşma bölgesinde -40 MPa değerine gerileyerek yapısal kararlılığını kaybederken, **FCC15** grefti plato bölgesinde 150 MPa'lık yüksek bir modül değerine ulaşarak enerji soğurma verimliliğini kritik bir seviyeye taşımıştır. **BCC10** grefti, dayanım açısından **BCC5** greftine göre bir artış sunmakla birlikte stabilitesinin zayıf olması nedeniyle enerji soğurma kapasitesi, benzer selüloz oranlarındaki Kelvin ve FCC greftleri kadar yüksek değildir (Şekil 44).



Şekil 44. Greftlere ait maksimum gerilme ve enerji soğurma kapasitesi karşılaştırması.

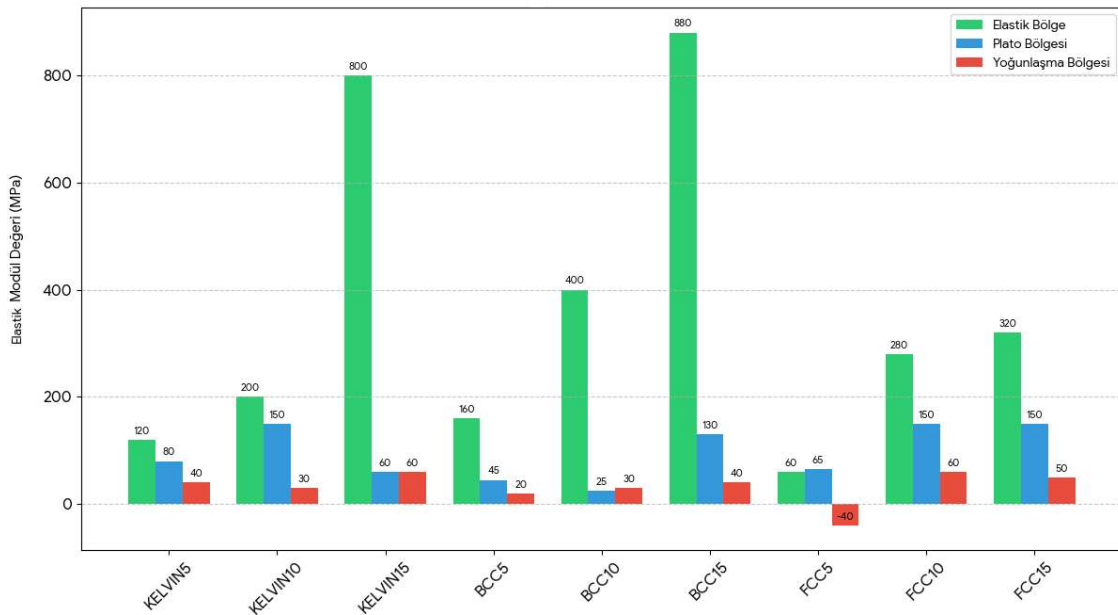
Greftlerin elastik modül değerleri gerilme gerinim eğrisinin başlangıç kısmındaki doğrusal elastik bölgenin eğimi kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama için eğrinin başlangıç noktasından itibaren doğrusal kabul edilebilecek ilk birkaç veri noktası seçilmiş ve bu noktalar arasında doğrusal regresyon uygulanarak eğim belirlenmiştir. Elde edilen eğim değeri, greftin elastik rijitliğini göstermektedir ve MPa birimi ile ifade edilmiştir (Tablo 8).

Tablo 8. Lattice greftlere ait bölgesel elastik modül değerleri.

Greft	Elastik Bölge(Mpa)	Plato Bölgesi(Mpa)	Yoğunlaşma Bölgesi(Mpa)
KELVIN5	120	80	40
KELVIN10	200	150	30
KELVIN15	800	60	60
BCC5	160	45	20
BCC10	400	25	30
BCC15	880	130	40
FCC5	60	65	-40
FCC10	280	150	60
FCC15	320	150	50

Tablo 8'de verilen elastik bölgede elde edilen modül değerleri incelendiğinde, **BCC15** greftinin 880 MPa ile en yüksek rijitliği sergilediği görülmektedir. Bu durum, artan selüloz oranının kafes elemanlarının kesit alanını ve dolayısıyla direnci doğrudan artırmasıyla açıklanmaktadır. **KELVIN15** greftleri 800 MPa ile ikinci sırada yer alırken, **FCC5** grefti 60 MPa ile en düşük elastik modülü

sergilemiştir. Plato bölgesinde en yüksek elastik modül değeri, **KELVIN10** greftinde 150 MPa olarak ölçülmüştür. Bu bölgede **FCC15** greftinin, **BCC15** ve **KELVIN15** greftine kıyasla yüksek elastik modül değerleri sergilediği dikkat çekmektedir. Bu durum, FCC kafes geometrisinin plato bölgesinde daha kararlı bir deformasyon mekanizması geliştirdiğine işaret etmektedir. **BCC10** greftinin plato modülünün (25 MPa), elastik modülüne (400 MPa) oranla belirgin biçimde düşmesi; bu yapının erken plastik çöküşe uğradığını ve geniş bir plato bölgesi oluşturduğunu göstermektedir. Yoğunlaşma bölgesinde **FCC10** ve **KELVIN15** greftleri 60 MPa ile en yüksek modülü gösterirken, **FCC5** grefti -40 MPa ile negatif bir modül değeri sergilemiştir. Negatif elastik modül değeri, bu bölgede gerilmenin gerinim artışına rağmen azaldığına, yani greftin yumuşama davranışı gösterdiğine işaret etmektedir. Bu durum, düşük selüloz oranlı FCC greftinin yoğunlaşma bölgesine ulaşmadan önce yapısal bütünlüğünü yitirdiği şeklinde yorumlanmıştır. **BCC5** greftinin yoğunlaşma modüllerinin (20 MPa) diğer greftlere kıyasla düşük kalması, bu geometrinin enerji emilimini ağırlıklı olarak plato bölgesinde gerçekleştirdiğini ortaya koymaktadır. **KELVIN10**, **FCC10** ve **FCC15** greftleri (150 MPa), akma sonrası plato kapasitesinde en yüksek değerlere sahiptir. Bu greftler, plastik deformasyon sırasında enerjiyi daha yüksek bir gerilme seviyesinde sönümleyebilmişlerdir. Elde edilen bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde, kafes geometrisi ve selüloz miktarının mekanik davranış üzerinde belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Yüksek enerji emilimi gerektiren uygulamalar için **BCC15** ve **KELVIN15** greftleri ön plana çıkmaktadır; zira bu greftler elastik bölgelerinde yüksek elastik modül değerleri sergilemektedir. Sonuç olarak greft tasarımında, hedef uygulama gereksinimlerine göre geometri ve yoğunluk parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Greftlere ait elastik modül karşılaştırmalı görseli Şekil 45'te verilmiştir.



Şekil 45. Greftlere ait bölgesel elastik modül değerleri.

Tablo 9’da greftlere ait dinamik nokta takip verileri, greftlerin mekanik performansını belirlemek amacıyla piksel cinsinden karşılaştırılmıştır. Basma deneylerinden elde edilen maksimum gerilme değerleri incelendiğinde; **BCC15** greftinin 49.5 MPa ile en yüksek dayanıma, **FCC5** greftinin ise 11,5 MPa ile en düşük dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Bu iki uç değer arasındaki yaklaşık 4,3 katlık dayanım farkı, merkez noktası yer değiştirme büyüklükleriyle doğrudan ilişkilidir. **FCC5** greftinde $\Delta r(\text{Sol Üst}) = 72,30 \text{ px}$ ve $\Delta r(\text{Merkez}) = 66,36 \text{ px}$ gibi oldukça yüksek deformasyon değerleri gözlenmiştir; bu durum, FCC yapılarının göçme modlarına yatkın olduğunu bildiren çalışmaları desteklemektedir (Huang, 2024; Tancogne-Dejean ve ark., 2018). Özellikle FCC geometrilerinde düğüm noktalarının gerilme birikimine açık olması, merkezi bölgelerdeki 60 px üzeri kaymalarla net biçimde ortaya konmuştur. **BCC5** grefti 14,5 MPa dayanım sergilemiş olmasına rağmen; $\Delta r(\text{Sol Üst}) = 86,72 \text{ px}$ ve $\Delta r(\text{Sağ Üst}) = 86,66 \text{ px}$ ile çalışmada ölçülen en yüksek düğüm kaymalarına sahiptir. Bu bulgu, BCC yapılarının özellikle yanal burkulmaya karşı hassas olduğunu belirten araştırma ile uyum göstermektedir (Dai ve Victoria, 1997). Orta dayanım grubunu oluşturan **FCC10**, **BCC10** ve **KELVIN10** greftleri arasında **KELVIN10** grefti, tüm noktalarda $\Delta r = 40,53 \text{ px}$ ile düzenli ve dengeli bir deformasyon davranışı sergilemiştir. Bu davranış Kelvin hücrelerinin izotropik yük taşıma kapasitesinin FCC ve BCC geometrilerine kıyasla daha dengeli olduğunu gösteren çalışmaları desteklemiştir (Abueidda ve ark., 2017).

Tablo 9.Lattice greftlerin dinamik nokta takibi sonuçları.

Greft	Maks. Gerilme (MPa)	Nokta	X ilk	Y ilk	X son	Y son	Δx (px)	Δy (px)	Δr (px)
FCC5	11,7	Sol Üst	206,24	392,90	229,46	461,37	23,22	68,47	72,30
		Sağ Üst	274,18	429,87	260,22	438,73	-13,96	8,86	16,53
		Merkez	238,69	394,51	240,18	460,85	1,49	66,34	66,36
BCC5	14,5	Sol Üst	331,57	344,13	382,22	273,74	50,64	-70,39	86,72
		Sağ Üst	440,91	352,75	418,08	269,15	-22,84	-83,60	86,66
		Merkez	368,43	317,79	397,12	282,31	28,68	-35,48	45,63
KELVIN5	19,5	Sol Üst	204,03	427,36	208,44	444,39	4,41	17,03	17,59
		Sağ Üst	250,60	430,85	249,03	419,01	-1,57	-11,84	11,94
		Merkez	230,21	402,09	239,69	441,51	9,48	39,41	40,54
BCC10	23,5	Sol Üst	371,03	199,53	371,20	232,67	0,17	33,14	33,14
		Sağ Üst	419,58	215,24	413,65	256,52	-5,93	41,28	41,70
		Merkez	404,09	194,13	401,77	231,34	-2,32	37,21	37,28
KELVIN10	30,5	Sol Üst	450,61	280,96	419,72	254,72	-30,90	-26,24	40,53
		Sağ Üst	450,61	280,96	419,72	254,72	-30,90	-26,24	40,53
		Merkez	450,61	280,96	419,72	254,72	-30,90	-26,24	40,53
FCC10	37,0	Sol Üst	370,77	273,61	368,24	302,51	-2,54	28,90	29,01
		Sağ Üst	438,66	283,80	446,55	312,31	7,89	28,51	29,58
		Merkez	410,00	260,66	411,91	281,51	1,94	20,85	20,94
FCC15	39,0	Sol Üst	200,07	457,91	195,07	446,20	-5,00	-11,70	12,73
		Sağ Üst	238,50	459,19	226,34	454,90	-12,15	-4,30	12,89
		Merkez	224,07	453,54	211,01	442,43	-13,06	-11,12	17,15
KELVIN15	45,0	Sol Üst	210,01	436,73	233,00	443,00	22,99	6,27	23,83
		Sağ Üst	250,77	409,15	250,63	421,91	-0,14	12,76	12,76
		Merkez	224,75	411,97	242,60	423,82	17,85	11,85	21,43
BCC15	51,0	Sol Üst	376,17	295,94	393,57	288,27	17,40	-7,67	19,02
		Sağ Üst	376,17	295,94	393,57	288,27	17,40	-7,67	19,02
		Merkez	376,17	295,94	393,57	288,27	17,40	-7,67	19,02

FCC5 ve **BCC5** düşük dayanım ve yüksek deformasyon nedeniyle kararsızlık sergilerken Kelvin geometrisi orta ve yüksek selüloz oranlarında en dengeli deformasyon davranışı sergilemiş, **BCC15** ise hem en yüksek dayanım hem de en düşük pixel kaymasıyla lattice greftler arasında en başarılı model olarak öne çıkmıştır.

5.2.4. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

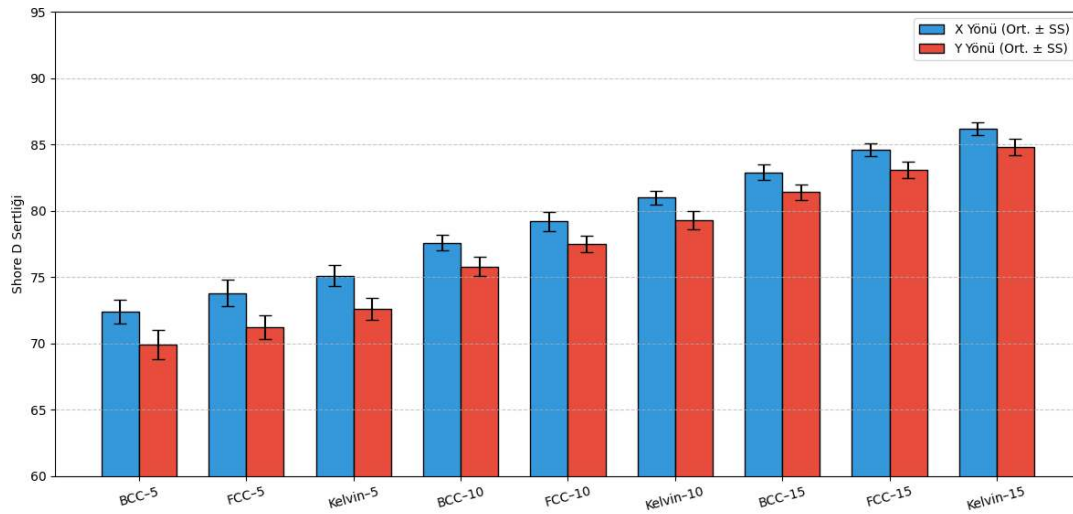
Üretilen lattice greftlerin sertlik davranışı Shore D durometre yöntemiyle X ve Y yönlerinde değerlendirilmiştir. Ölçümler her greft üzerinde beş bağımsız noktadan alınmıştır. Yön bazında ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Shore durometre ölçümü yüzeyin batmaya karşı direncini temsil ettiğinden ölçüm noktaları lattice greftlerin boşluklarına denk gelmeyecek şekilde süreklilik gösteren bölgelerinden seçilmiş ve lattice greftler rijit bir destek üzerinde test edilmiştir.

Tablo 10. Lattice greftlere ait Shore D sertlik değerleri.

Greft	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X Ort. ± SS	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y Ort. ± SS
BCC5	71,2	73,5	72,8	71,9	72,6	72,4 ± 0,9	68,5	70,8	69,3	71,2	69,7	69,9 ± 1,1
FCC5	72,8	74,6	73,1	75,0	73,5	73,8 ± 1,0	70,1	72,3	70,8	71,9	70,9	71,2 ± 0,9
Kelvin5	74,5	76,2	75,8	74,3	74,7	75,1 ± 0,8	71,8	73,6	72,1	73,4	72,1	72,6 ± 0,8
BCC10	76,8	78,2	77,9	77,1	78,0	77,6 ± 0,6	74,6	76,3	75,8	76,1	76,2	75,8 ± 0,7
FCC10	78,5	79,8	79,0	80,1	78,6	79,2 ± 0,7	76,8	78,2	77,1	77,9	77,5	77,5 ± 0,6
Kelvin10	80,2	81,5	80,8	81,3	81,2	81,0 ± 0,5	78,5	80,1	79,2	79,8	78,9	79,3 ± 0,7
BCC15	82,1	83,6	82,8	83,2	82,8	82,9 ± 0,6	80,6	82,1	81,2	81,8	81,3	81,4 ± 0,6
FCC15	83,8	85,2	84,5	84,9	84,6	84,6 ± 0,5	82,3	83,8	82,9	83,4	83,1	83,1 ± 0,6
Kelvin15	85,6	86,8	86,1	86,5	86,0	86,2 ± 0,5	84,1	85,6	84,5	85,2	84,6	84,8 ± 0,6

CNC konsantrasyonunun %5'ten %15'e çıkarılması, tüm greft tiplerinde sertlik değerlerinde belirgin bir artışa yol açmıştır. En yüksek sertlik değerleri **KELVIN15** greftinde (X: 86,2 ± 0,5; Y: 84,8 ± 0,6) elde edilmiştir. Bu artış, nanokristalin selülozun yüksek en-boy oranı ve kristal yapısı sayesinde matris içerisindeki polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlaması ve yük transfer verimliliğini artırması ile ilişkilendirilmektedir (İbrahim ve ark., 1991). Birim hücre geometrisi açısından yapılan karşılaştırmada, Kelvin yapısının BCC ve FCC yapılarına göre daha yüksek sertlik sergilediği görülmüştür. Bu durum, Kelvin geometrisinin daha yüksek düğüm noktası yoğunluğuna sahip olması ve batma kuvvetini strutlar üzerinden daha homojen dağıtarak deformasyon direncini artırmasından kaynaklanmaktadır (Liu ve ark., 2022). Şekil 46'da görüldüğü üzere, tüm greftlerde X yönünde ölçülen sertlik değerleri Y yönüne kıyasla ortalama %2,5 ile %3,5 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bu

anizotropik davranışın, MSLA üretim sürecindeki katmanlaşma yönü ve fotopolimerizasyonun yönsel farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Bazan ve ark., 2025).



Şekil 46. Lattice greftlerin X ve Y yönlü sertlik değişimleri.

Selüloz oranının %5'ten %15'e yükselmesiyle birlikte, X ve Y yönleri arasındaki anizotropinin zayıfladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, CNC nanopartiküllerinin matris içerisinde oluşturduğu üç boyutlu ağ yapısının üretimden kaynaklanan yönsel zayıflıkları azaltarak malzemeyi daha izotropik bir karaktere yaklaştırdığını göstermektedir (Xu ve ark.,2021). X ve Y yönleri arasındaki farklar eklemeli imalat süreçlerinde görülen anizotropinin bir yansımasıdır (Dixit ve ark.,2023). Fotopolimer esaslı 3B baskıda katmanlar arası bağlanma, post-kür koşulları ve ışınlama geometrisi yönsel mekanik yanıtı etkilemektedir. CNC oranının artmasıyla X–Y farkının azaldığı gözlemlenmiş bu da eklenen selülozun matris içerisinde yönden bağımsız sertleştirme etkisi yarattığını göstermektedir. Sonuç olarak yüksek selüloz içeriği yalnızca malzemenin mekanik direncini artırmakla kalmamış, aynı zamanda üretimden kaynaklanan anizotropik karakteri kırarak daha homojen bir sertlik dağılımı sağlamıştır. Bu bulgular selüloz takviyesinin fotopolimer reçinelerde hem yapısal bir güçlendirici hem de yönsel özellikleri dengeleyici bir ajan olarak işlev gördüğünü kanıtlamaktadır.

5.2.5. Termal Yorulma Testi Sonuçları

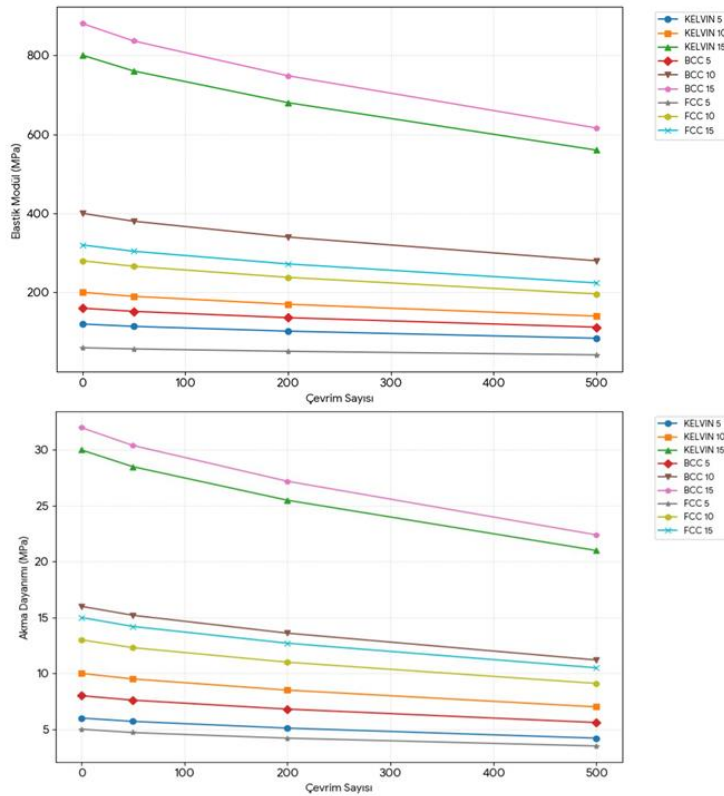
Lattice greftler 0–100 °C aralığında iki aşamalı termal yorulma çevrimlerine tabi tutularak termal yorulmanın basma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Termal çevrimler öncesinde gerçekleştirilen basma testleri referans durumda lattice greftlerin akma dayanımı ve elastik modül değerlerini ortaya koymuş daha sonra 50, 200 ve 500 çevrime maruz bırakılan greftler aynı protokol altında yeniden test edilerek çevrim sayısına bağlı değişimler incelenmiştir (Tablo 11).

Tablo 11. Lattice greftlerin termal yorulma çevrimlerine bağlı akma dayanımı ve elastik modül değerlerinin değişimi.

Greft	Çevrim	Akma Dayanımı (MPa)	Elastik Bölge (MPa)	Plato Bölgesi (MPa)	Yoğunlaşma Bölgesi (MPa)
KELVIN5	0	6	120	80	40
	50	5,7	114	76	38
	200	5,1	102	68	34
	500	4,2	84	56	28
KELVIN10	0	10	200	150	30
	50	9,5	190	142	28
	200	8,5	170	127	25
	500	7	140	105	21
KELVIN15	0	30	800	60	60
	50	28,5	760	57	57
	200	25,5	680	51	51
	500	21	560	42	42
BCC5	0	8	160	45	20
	50	7,6	152	42	19
	200	6,8	136	38	17
	500	5,6	112	31	14
BCC10	0	16	400	25	30
	50	15,2	380	23	28
	200	13,6	340	21	25
	500	11,2	280	17	21
BCC15	0	32	880	130	40
	50	30,4	836	123	38
	200	27,2	748	110	34
	500	22,4	616	91	28
FCC5	0	5	60,00	65	-40,00
	50	4,7	57	61	-37
	200	4,2	51	55	-33
	500	3,5	42	45	-27
FCC10	0	13	280	150	60
	50	12,3	266	142	57
	200	11	238	127	51
	500	9,1	196	105	42
FCC15	0	15	320	160	50
	50	14,2	304	143	47
	200	12,7	272	129	42
	500	10,5	224	109	35

Tablo 11 incelendiğinde, çevrim sayısı arttıkça tüm greftlerde hem akma dayanımı hem de bölgesel elastik modül değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, tekrarlı ısı genleşme-büzülme döngülerinin kafes kollarında mikro yapısal çatlak oluşumuna, bağ noktalarında zayıflamaya ve sonuç olarak mekanik bütünlüğün azalmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Azalma oranının greft geometrisi ve selüloz yoğunluğuna göre farklılaştığı görülmüş; düşük selüloz oranlı greftlerde (**FCC5**) daha belirgin bir rijitlik ve dayanım kaybı gözlemlenirken, yüksek selüloz içerikli greftlerde (**BCC15**,

KELVIN15) bu kaybın sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Bölgesel elastik modül analizi, termal yorulma kaynaklı performans düşüşünün yalnızca elastik bölgede değil, plato ve yoğunlaşma evrelerinde de görüldüğünü ortaya koymaktadır. FCC greftlerinin termal yorulma altındaki bu kırılgan davranışı, eğilme baskın topolojilerin ısı yorulma karşısında daha zayıf performans sergilediğini gösteren çalışmalarla paralellik göstermektedir (Wismans ve ark., 2011). Buna karşılık BCC greftlerinin termal çevrimlerden daha az etkilendiği görülmektedir. Bu durumun, BCC greftlerinin termal gerilmeleri daha homojen dağıtabilen yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde BCC yapılarının termal ve mekanik yorulma açısından daha kararlı olduğu çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Salavati, 2016; Zhao ve ark., 2018; Wang ve ark., 2024). Kelvin greftleri orta düzeyde bir direnç sunarken, FCC greftlerinin özellikle yüksek selüloz içeriklerinde dahi termal yorulmaya karşı daha duyarlı olduğu görülmüştür. FCC greftlerinde 50, 200 ve 500 çevrim sonunda gözlenen farklı oranlardaki kayıplar, FCC greftlerinin geometrik yapısının daha keskin gerilme birikimi bölgeleri oluşturmasıyla açıklanmaktadır (Jin ve ark., 2019; Peng ve ark., 2020). Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, termal şok çevrim sayısı arttıkça tüm greftlerin mekanik özelliklerinde belirgin bir düşüş yaşandığı; ancak bu düşüşün şiddetinin geometriye bağlı olarak değiştiği görülmektedir (Şekil 47). Dolayısıyla termal gerilmenin yüksek olduğu biyomedikal implant uygulamalarında BCC tabanlı greft tasarımlarının daha uzun ömürlü ve güvenilir bir seçenek oluşturabileceği düşünülmektedir.

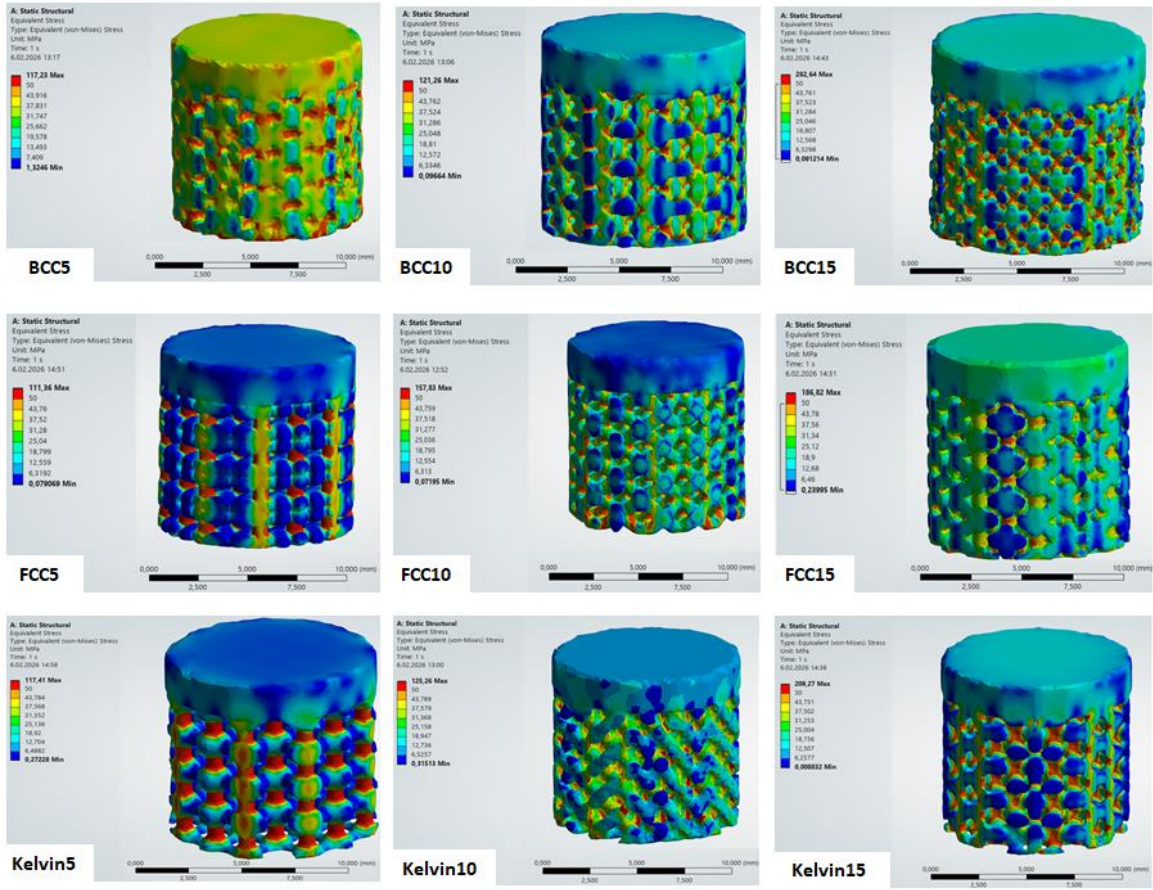


Şekil 47. Termal yorulma çevrimleri sonrası greftlerde meydana gelen elastik modül ve akma dayanımı değişimi.

Selüloz oranındaki artış tüm greft türlerinde başlangıç dayanım değerlerini artırmış olsa da yorulma sonrasındaki mekanik kayıpların büyüklüğünü tam olarak lineer bir şekilde azaltmamıştır. Bu durum literatürde, selüloz takviye miktarı arttıkça matris-takviye ara yüzey alanının da yükselmesi ve ara yüzeylerin termal gerilmelere daha açık hâle gelmesiyle açıklanmaktadır (Sangid, 2013). Termal yorulma çevrimleri sonrasında greftlerin durumu genel olarak değerlendirildiğinde; en yüksek termal kararlılığı **BCC15** ve **BCC10** greftleri göstermiş, Kelvin greftleri orta düzeyde dayanım sergilemiş, FCC greftleri ise termal yorulma karşısında en fazla mekanik kaybı yaşamıştır. Termal yorulma testlerinden elde edilen veriler, greftlerin mekanik performansının yalnızca selüloz oranıyla değil, aynı zamanda birim hücrenin geometrik konfigürasyonu da doğrudan ilişkili olduğunu doğrulamaktadır. BCC geometrisi, diyagonal strut dizilimi sayesinde termal genleşme ve büzülme sırasında oluşan iç gerilmeleri daha esnek bir şekilde sönmüleyebilmiş bu da çevrimsel sıcaklık değişimlerine karşı en yüksek kararlılığı sergilemesini sağlamıştır. Buna karşılık FCC yapısının sahip olduğu yüksek bağlantı yoğunluğu ve karmaşık düğüm noktaları, termal gerilmelerin bu bölgelerde yoğunlaşmasına neden olarak yorulmayı hızlandırmış ve en yüksek mekanik kayıpların bu grupta gözlenmesine yol açmıştır. Kelvin hücresi ise izotropik karakteriyle orta düzeyde bir direnç göstererek dengeli bir profil çizmiştir. Sonuç olarak selüloz takviyesi, başlangıçtaki akma dayanımı ve elastik modül değerlerini yukarı çekse de uzun vadeli termal kararlılıkta hücre topolojisinin gerilme dağıtma kapasitesi belirleyici rol oynamaktadır. Bu durum, zorlu termal koşullar altında çalışacak greft tasarımlarında BCC gibi gerilme yığılmasına karşı daha dirençli topolojilerin tercih edilmesinin kritik önemini ortaya koymaktadır.

5.2.6. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Bu çalışmada MSLA yöntemiyle üretilen ve kütlece %5, %10 ve %15 oranlarında selüloz takviyesi içeren lattice greft modellerinin mekanik yanıtları von Mises gerilme dağılımları üzerinden sonlu elemanlar analizi yöntemi ile kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sayısal veriler selüloz miktarındaki artışın malzemenin elastisite modülü ve yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin gerilme yığılmalarıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Analizlerde temel alınan von Mises gerilme kriteri takviye fazının matris içerisindeki yük paylaşım mekanizmasını ve yapının plastik deformasyona karşı direncini belirlemek amacıyla kullanılmıştır (Zienkiewicz ve Taylor, 2000). Şekil 48’de verilen sonuçlar incelendiğinde kırmızı ile temsil edilen yüksek gerilme bölgelerinin, selüloz miktarının %5 olduğu düşük takviyeli greftlerde (**BCC5**, **FCC5**, **Kelvin5**) çok daha geniş bir alana yayıldığı ve kritik tepe değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 48. Greftlerin von Mises gerilme dağılım sonuçları.

Özellikle **BCC5** ve **FCC5** greftlerinde dikey ve çapraz strutların birleştiği düğüm noktalarında yoğunlaşan kırmızı bölgeler bu kısımların zayıflık gösterdiğini ve ilk hasarın bu noktalardan başlayabileceğini işaret etmektedir. Bu durum düşük selüloz içeriğinin matrisin rijitliğini yeterince destekleyememesi sonucu yükün strutlar üzerinde aşırı yığılmasına neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır (Han ve ark., 2022). Kırmızı bölgelerin hemen çevresinde gözlenen sarı ve açık yeşil tonlar gerilmenin geçiş bölgelerini temsil etmekte olup %5 selüloz içeren greftlerde bu renklerin strut gövdelerine kadar uzandığı görülmektedir. Bu durum greftin büyük bir kısmının akma sınırına yakın bir gerilme altında olduğunu ve güvenlik sınırlarının daraldığını kanıtlamaktadır. Buna karşın selüloz oranının %15'e yükseltildiği greftlerde (**BCC15**, **FCC15**, **Kelvin15**) kırmızı ve sarı bölgelerin belirgin şekilde daralarak spektrumda yeşil ve mavi tonlara doğru dağıldığı belirlenmiştir. Greftlerin geri kalan büyük bölümünde hakim olan mavi ve koyu mavi tonlar gerilmenin bu bölgelerde minimum seviyelerde tutulduğunu ve yükün takviye edilmiş matris tarafından başarıyla sönmüldüğünü göstermektedir. Özellikle **Kelvin15** greftinde gerilme değişiminin diğer greftlere kıyasla çok daha yumuşak bir geçiş sergilediği ve kırmızı bölgelerin sadece düğüm noktalarıyla sınırlı kaldığı saptanmıştır. Bu bulgu yüksek takviye oranlarının karmaşık geometrili kafes yapılarda yükü daha geniş bir hacme yayarak stabiliteyi artırdığını kanıtlamaktadır (Fan ve ark.,2010). Birim hücre

açısından yapılan karşılaştırmalarda, selüloz miktarındaki değişime en dirençli yanıtın Kelvin hücre yapısı tarafından verildiği tespit edilmiştir. **BCC** ve **FCC** geometrilerinde selüloz oranının düşük olduğu durumlarda strutların orta kısımlarında eğilme kaynaklı gerilme birikintileri saptanırken **Kelvin15** greftinde bu birikintilerin yerini daha dengeli bir gerilme alanına bıraktığı gözlenmiştir. MSLA üretim sürecinde selüloz partiküllerinin reçine içerisindeki homojen dağılımının %15 gibi yüksek oranlarda dahi korunabilmesinin greftin izotropik mekanik yanıtı ve yorulma ömrü için önemli bir durumdur. Sonuç olarak MSLA tekniği ile üretilen greftlerde selüloz miktarının %15 seviyesine çıkarılmasının von Mises gerilme dağılımı ve güvenlik açısından en optimize sonuçları verdiği saptanmıştır. Yüksek selüloz içeriğinin greftin rijitliğini artırarak kırmızı ile temsil edilen tehlikeli gerilme yığılmalarını minimize ettiği ve böylece daha geniş bir dayanım kapasitesi sağladığı sonucuna varılmıştır.

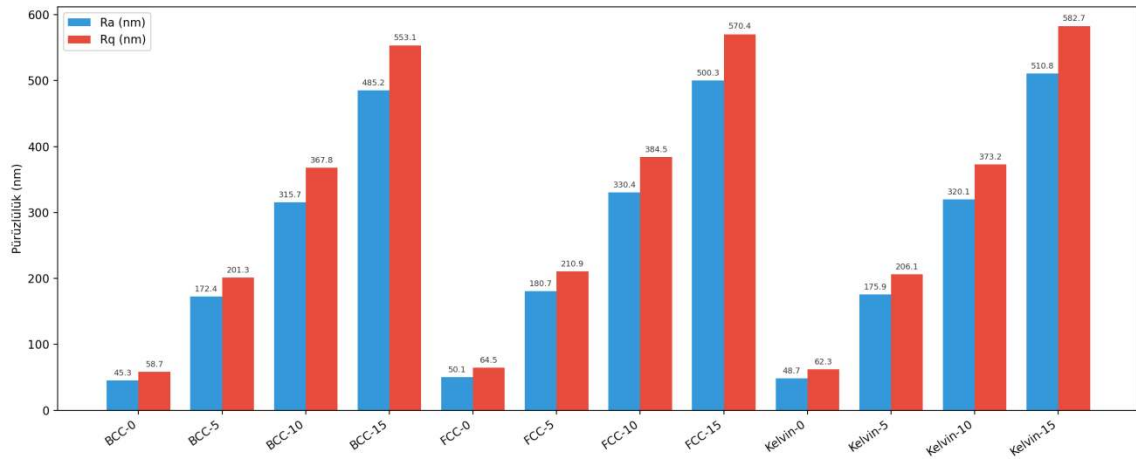
5.2.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Hazırlanan greft modellerinin yüzey pürüzlülükleri selüloz katkı oranına bağlı olarak incelenmiş ve elde edilen ortalama pürüzlülük (R_a) ile karekök ortalama pürüzlülük (R_q) değerleri Tablo 12’de sunulmuştur.

Tablo 12. Lattice greftlere ait yüzey pürüzlülük değerleri.

Greft	Selüloz İçeriği (%)	Yüzey Pürüzlülüğü (R_a , nm)	Yüzey Pürüzlülüğü (R_q , nm)
BCC-0	0	45,3 ± 4,8	58,7 ± 6,1
BCC-5	5	172,4 ± 11,5	201,3 ± 13,2
BCC-10	10	315,7 ± 20,3	367,8 ± 24,5
BCC-15	15	485,2 ± 33,7	553,1 ± 38,9
FCC-0	0	50,1 ± 5,2	64,5 ± 6,8
FCC-5	5	180,7 ± 12,1	210,9 ± 14,0
FCC-10	10	330,4 ± 21,2	384,5 ± 25,3
FCC-15	15	500,3 ± 34,7	570,4 ± 40,3
Kelvin-0	0	48,7 ± 5,0	62,3 ± 6,5
Kelvin-5	5	175,9 ± 11,8	206,1 ± 13,5
Kelvin-10	10	320,1 ± 20,7	373,2 ± 24,1
Kelvin-15	15	510,8 ± 35,4	582,7 ± 41,2

Tablo 12’de görüldüğü üzere selüloz içeriğinin artmasıyla birlikte tüm lattice greft tiplerinde yüzey pürüzlülük değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. BCC yapısında R_a değeri %0 selülozda ortalama 45,3 nm iken %15 selülozda 485,2 nm’ye yükselmiştir. Benzer şekilde FCC ve Kelvin greftlerinde de pürüzlülük artışı paralel bir eğilim göstermektedir (Şekil 49). R_q değerlerinin R_a değerlerinden daha yüksek çıkması yüzeyde keskin tepe ve çukur noktalarının varlığına işaret etmektedir. Selüloz konsantrasyonundaki artışın yüzey pürüzlülüğünü artırması literatürle uyumlu olarak katkı maddesinin matris içindeki topaklanma eğilimi veya yüzeyde oluşturduğu mikroskobik çıkıntılardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 49. Lattice greftlere ait karşılaştırmalı yüzey pürüzlülüğü grafiği.

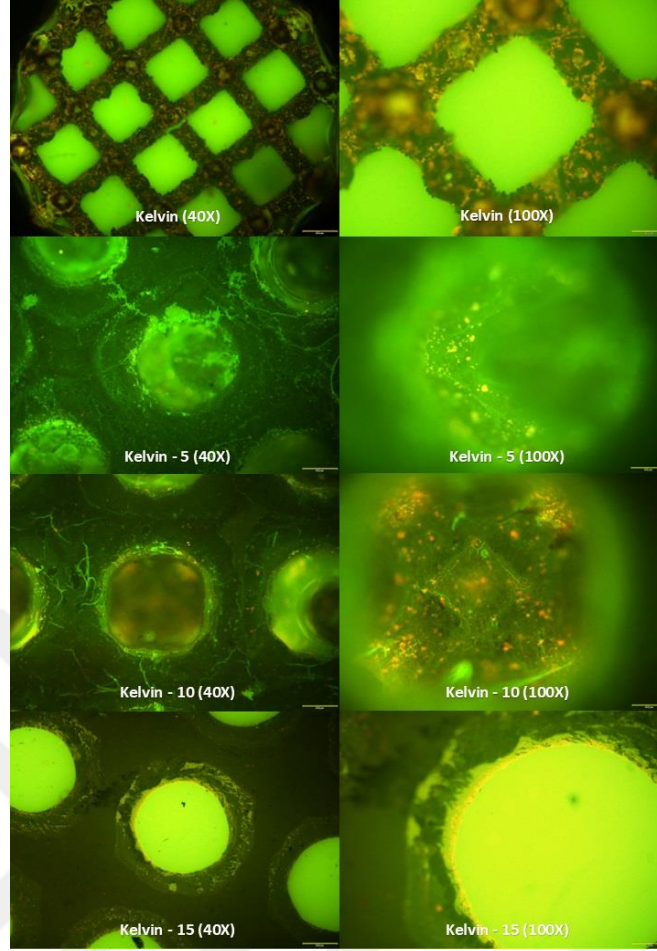
Bu durum selüloz partiküllerinin matris içinde dağılımının yüzey topografisini etkilediğini ve katmanlar arası bağlanma bölgelerinde düzensizliklere yol açtığını göstermektedir. Selülozun yüzey pürüzlülüğünü artırması literatürde de benzer şekilde rapor edilmiştir. Literatürde selüloz takviyeli kompozitlerde partikül dağılımının yüzey özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu belirtilmiş ve partikül yoğunluğunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün yükseldiği vurgulanmıştır (Peng ve ark.,2015). Ayrıca MSLA yöntemiyle üretilen kompozitlerde reçine ve takviye malzemenin ışık kirlenme sürecine etkisi yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir (Saha ve ark., 2026). Selüloz partiküllerinin UV ışığını saçması ve kirlenme homojenliğini bozması, yüzeyde pürüzlülüğün artmasına neden olmaktadır. Geometri açısından **FCC** ve **Kelvin** greftlerinde pürüzlülük değerlerinin **BCC**'ye kıyasla biraz daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu farklılık tasarımın katmanların üst üste binme ve kirlenme davranışını etkileyerek yüzey morfolojisini değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bazan ve ark. (2025) MSLA ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünün baskı parametreleri ve geometrik karmaşıklıkla yakından ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Tablo verileri ve geometrik analizler birlikte değerlendirildiğinde, yüzey pürüzlülüğündeki artışın sadece selüloz miktarına değil birim birim hücrelerin yapısal karmaşıklığına da duyarlı olduğu görülmektedir. BCC geometrisi, daha az bağlantı noktası ve görece daha sade strut dizilimi sayesinde reçine akışını daha az kısıtlamış, bu da tüm selüloz oranlarında en düşük pürüzlülük değerlerinin bu yapıda elde edilmesini sağlamıştır. Buna karşın FCC ve Kelvin modellerinde gözlenen daha yüksek pürüzlülük değerleri, bu geometrilerin sahip olduğu yoğun düğüm noktaları ve dar açılar, yüksek viskoziteli selülozlu reçineyi hapsederek yüzeyde mikroskobik yığılmalara yol açmasıyla açıklanabilir. Özellikle Kelvin yapısında %15 selüloz oranında ulaşılan en yüksek pürüzlülük değeri (510,8 nm), karmaşık hücre topolojisinin ışık saçılım etkisini artırarak kirlenme sınırlarında daha düzensiz bir morfoloji oluşturduğunu göstermektedir. Sonuç olarak selüloz takviyesi yüzey dokusunu mikron altı seviyede yeniden şekillendirirken BCC gibi

daha açık gözenekli topolojilerin yüzey kalitesini korumada FCC ve Kelvin'e göre daha avantajlı olduğu saptanmıştır.

5.3. Biyolojik Değerlendirme Sonuçları

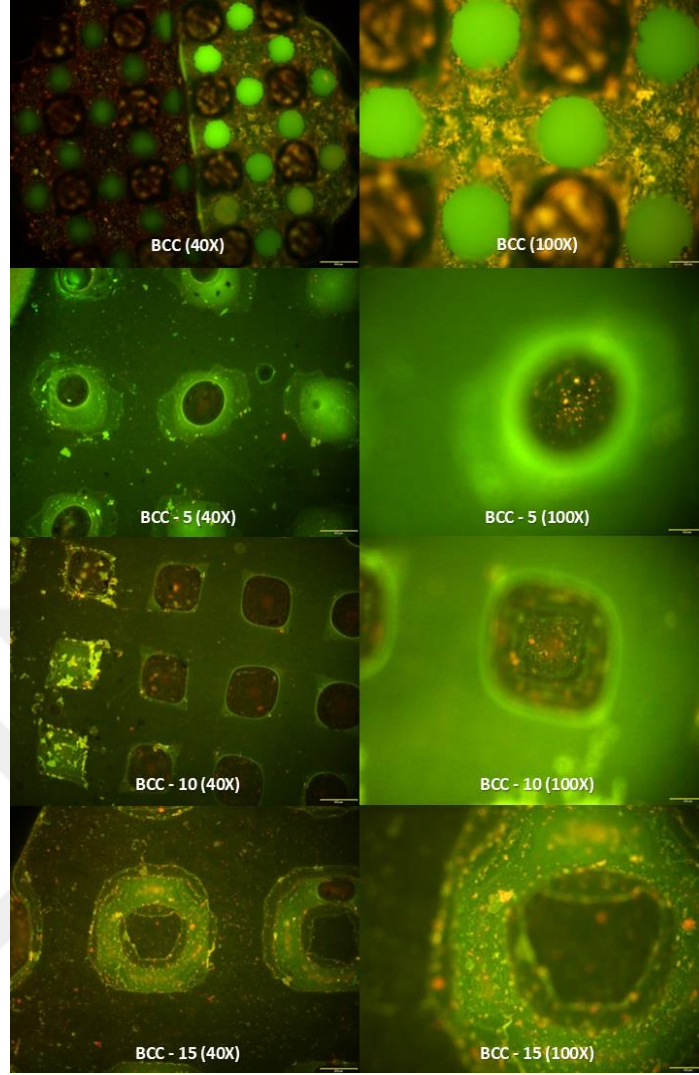
5.3.1. Greftlerin Hücre Gelişim Sonuçları

Kelvin, BCC ve FCC geometrilerine sahip lattice greftlerin farklı selüloz oranlarında hücre tutunma davranışı floresans görüntüleme ile değerlendirilmiştir. Hücre tutunma analizlerinde kontrol grubu olarak biyomedikal alanda yüksek biyouyumluluğu ile bilinen ve yük taşıyan implantlarda standart referans materyali kabul edilen CoCrMo alaşımı kullanılmıştır (Marti,2000). Bu sayede farklı gözenek geometrilerine sahip greftlerin biyolojik performansı halihazırda klinik kullanımda olan metalik implant yapılarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular her üç greft tipinde de kontrol gruplarında yüzeylere hücrelerin belirgin biçimde tutunduğunu göstermiştir. Buna karşılık greftlerin farklı selüloz oranlarına sahip varyasyonları karşılaştırıldığında hücrelerin yüzeylere ve delikli iç bölgelere tutunma düzeylerinin değiştiği gözlenmiştir. Özellikle kırmızı-turuncu floresans sinyalinin dağılımındaki farklılıklar Kelvin,BCC ve FCC yapıları arasında tutunma miktarının ve hücrelerin yerleşim bölgelerinin geometrik tasarıma bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.Bu bulgular genel olarak greftlerin yapısal özelliklerinin hücre tutunmasını doğrudan etkilediğini ve her bir mimarinin hücresel yerleşim açısından farklı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 50'deki floresans görüntüler incelendiğinde kontrol olarak kullanılan Kelvin isimli malzemenin metal kısımlarına tutunan hücreler kırmızı-turuncu renkli olarak gözükmemektedir. Herhangi bir hücrenin tutunamadığı yani hücre görülmeyen kısımlar ise yeşil renklidir. **Kelvin5** ve Kelvin15'in yüzeyine tutunmuş kırmızı-turuncu renkli pek hücre gözükmezken **Kelvin10**'un yüzeyinde nadiren de olsa tutunmuş hücrelere rastlanmıştır. Kırmızı-turuncu renkli olarak gözlenen hücreler özellikle **Kelvin5** ve **Kelvin10** greftlerinin delikli iç kısımlarına 100X görüntülerden de anlaşılacağı gibi tutunmuşlardır.Hücreler **Kelvin15** greftinin ise deliklerinin kenarlarını ve iç yüzeyini kaplamış şekilde gözükmemektedirler.



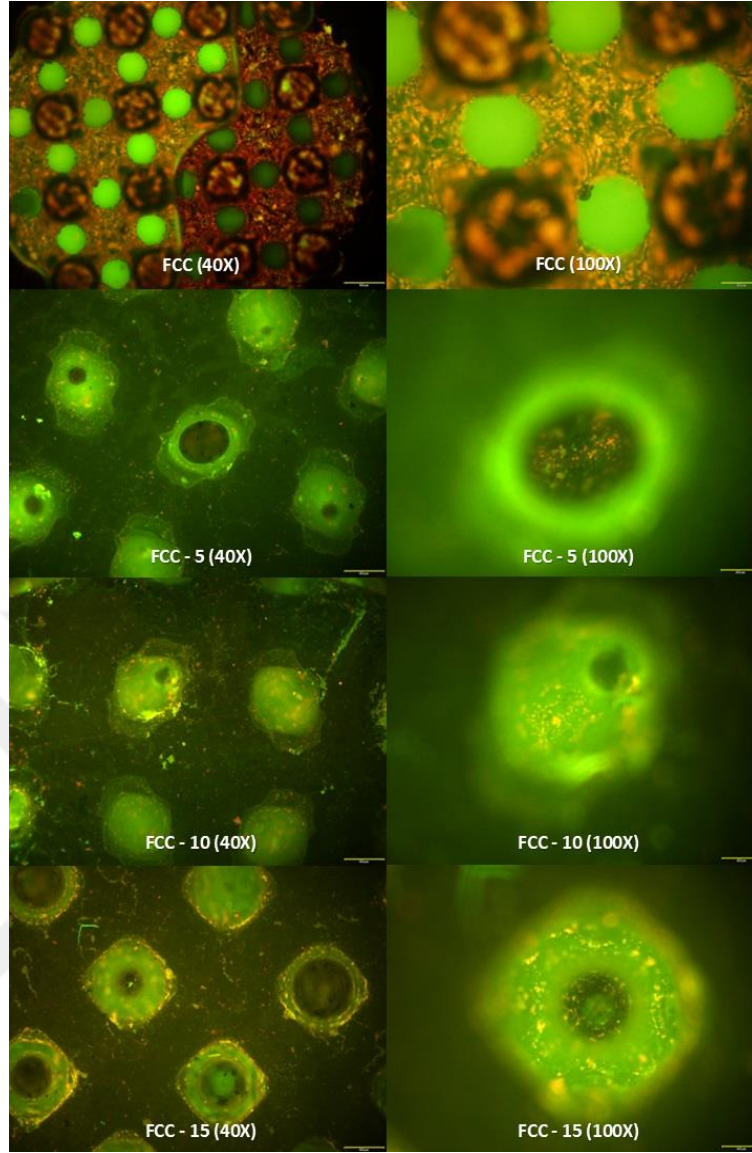
Şekil 50. Kelvin lattice greftlerinin AO/EB ile boyandıktan sonraki L-929 hücrelerinin yapışmalarına ait 40X ve 100X büyütmelelerdeki floresans görüntüleri.

Şekil 51'deki floresans görüntüler incelendiğinde kontrol olarak kullanılan BCC isimli malzemenin metal kısımlarına tutunan hücreler kırmızı-turuncu renkli olarak gözükmemektedir. **BCC5** ve **BCC10**'un yüzeyine tutunmuş kırmızı-turuncu renkli pek hücre gözükmezken **BCC15**'in yüzeyinde pek çok tutunmuş hücrelere rastlanmıştır. Kırmızı-turuncu renkli olarak hücreler özellikle **BCC5** ve **BCC10** greftlerinin delikli iç kısımlarına 100X görüntülerden de anlaşılacağı gibi tutunmuşlardır. Hücreler BCC15 greftinin ise hem malzeme yüzeyini hem de deliklerinin içini kaplamış şekilde gözükmemektedirler.



Şekil 51. BCC lattice greftlerinin AO/EB ile boyandıktan sonraki L-929 hücrelerinin yapışmalarına ait 40X ve 100X büyütmelerdeki floresans görüntüleri.

Şekil 52'deki floresans görüntüler incelendiğinde kontrol olarak kullanılan FCC isimli malzemenin metal kısımlarına tutunan hücreler kırmızı-turuncu renkli olarak gözükmemektedir. **FCC10** ve **FCC15**'in yüzeyinde pek çok tutunmuş hücrelere rastlanmıştır. Hücreler özellikle **FCC5**, **FCC10** ve **FCC15** greftlerinin delikli iç kısımlarına 100X görüntülerden de anlaşılacağı gibi kırmızı-turuncu renkli olarak tutunmuşlardır. Hücreler **FCC5**'e kıyasla **FCC10** ve **FCC15** greftlerinin yüzeylerine daha fazla tutunmuşlardır. Hücrelerin tutunma davranışının değişen greft tasarımlarına göre karşılaştırması Tablo 13'de verilmiştir.



Şekil 52. FCC lattice greftlerinin AO/EB ile boyandıktan sonraki L-929 hücrelerinin yapışmalarına ait 40X ve 100X büyütmelelerdeki floresans görüntüleri.

Tablo 13. Lattice greftlerin hücre tutunma davranışının karşılaştırılması.

Greft Türü	Yüzey	Delikli iç kısım	Delik kenarı / iç yüzey kaplama
Kelvin-5	+	+++	—
Kelvin-10	++	+++	—
Kelvin-15	+	+++	++++
BCC-5	+	+++	—
BCC-10	+	+++	—
BCC-15	+++	++++	++++
FCC-5	+	+++	—
FCC-10	+++	+++	—
FCC-15	+++	+++	—

Not: Çizelge Sembolleri

—

+

++

+++

++++

Yok

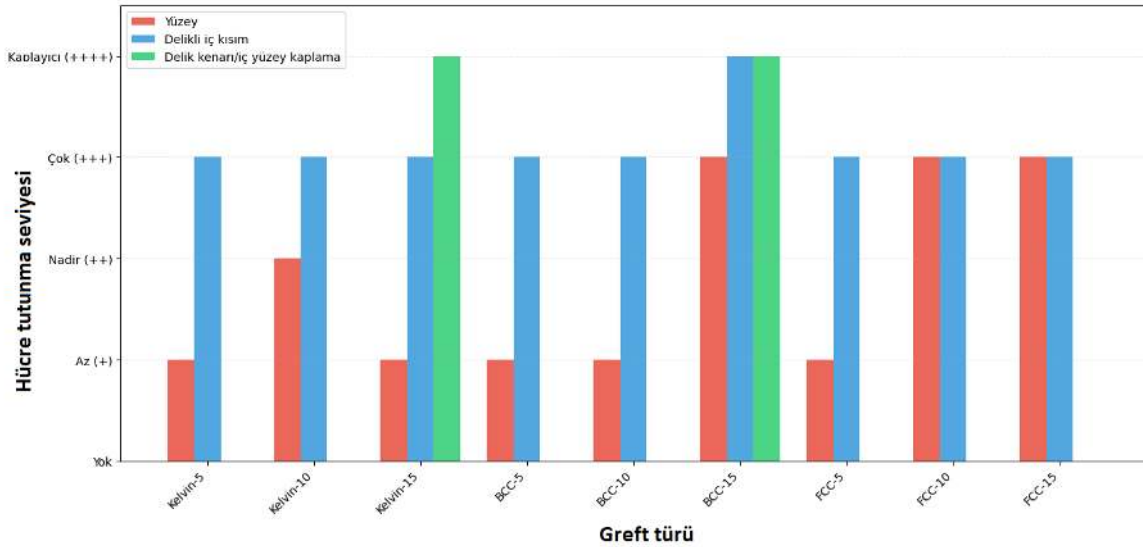
Az (pek hücre gözükmez)

Nadir/orta (nadiren rastlanmıştır)

Çok (pek çok)

Kaplayıcı (kaplamış şekilde)

Şekil 53’de sunulan karşılaştırmalı analiz, Kelvin, BCC ve FCC serisi malzemelerin yüzey, delikli iç kısım ve delik kenarı bölgelerindeki hücre tutunma yoğunluklarını özetlemektedir.

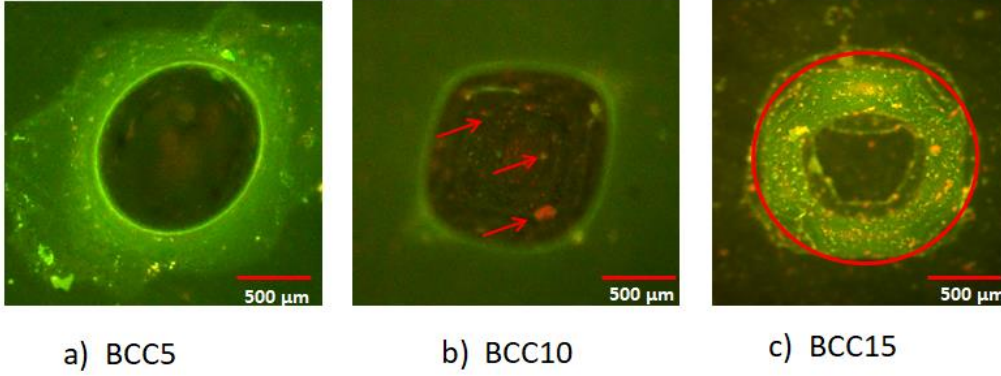


Şekil 53. Lattice greftlerin farklı bölgelerindeki hücre tutunma davranışlarının karşılaştırmalı analizi.

Grafiksel veriler incelendiğinde tüm greft gruplarında hücrelerin özellikle delikli iç kısımlara tutunma eğiliminde olduğu görülmektedir. Yüzey tutunma performansı açısından **FCC10** ve **FCC15** ile **BCC15** greftleri en yüksek yoğunluğu sergilerken Kelvin serisinde yüzey tutunmasının diğer gruplara oranla daha sınırlı kaldığı ancak **Kelvin10** lattice greftinde nadir de olsa hücre varlığının olduğu görülmektedir. **Kelvin15** ve **BCC15** greftleri hücrelerin delik kenarlarını ve iç yüzeylerini tamamen kaplamasıyla diğer greftlerden ayrılmaktadır.

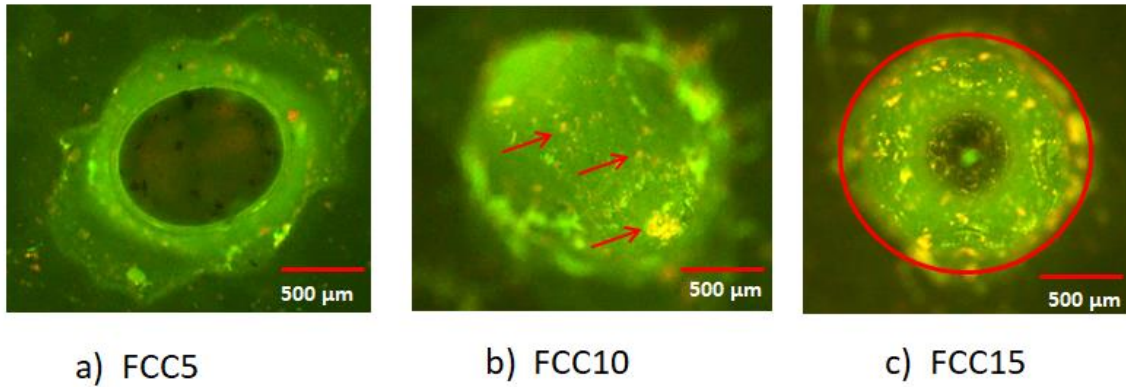
5.3.2. Graft Geometrisinin Hücre Çoğalması Üzerindeki Rolü

Birim hücrelerin geometrik konfigürasyonları hücre-yüzey etkileşimini doğrudan belirleyerek hücre proliferasyonu ve morfolojisi üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada da BCC, FCC ve Kelvin birim hücrelerinin sahip olduğu özgün geometrik formların hücresel yanıt süreçlerinde belirgin farklılıklara yol açtığı görülmüştür. Özellikle keskin kenar hatları, yuvarlatılmış köşe geometrileri ve gözenekli yapı hücrelerin yüzeye tutunma ve yayılma dinamiklerini şekillendiren temel parametreler olarak öne çıkmıştır. BCC tipi greftlerde keskin kenarlar ve delikli iç bölgelerin hücre tutunma davranışını doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. **BCC5** ve **BCC10** greftlerinde hücrelerin öncelikli olarak iç kısımdaki delikli bölgelere yerleştiği, yüzey alanlarında ise yayılımın oldukça kısıtlı kaldığı belirlenmiştir. Öte yandan **BCC15** greftinde hem dış yüzeyin hem de iç deliklerin hücrelerle tamamen kaplandığı tespit edilmiştir.(Şekil 54)



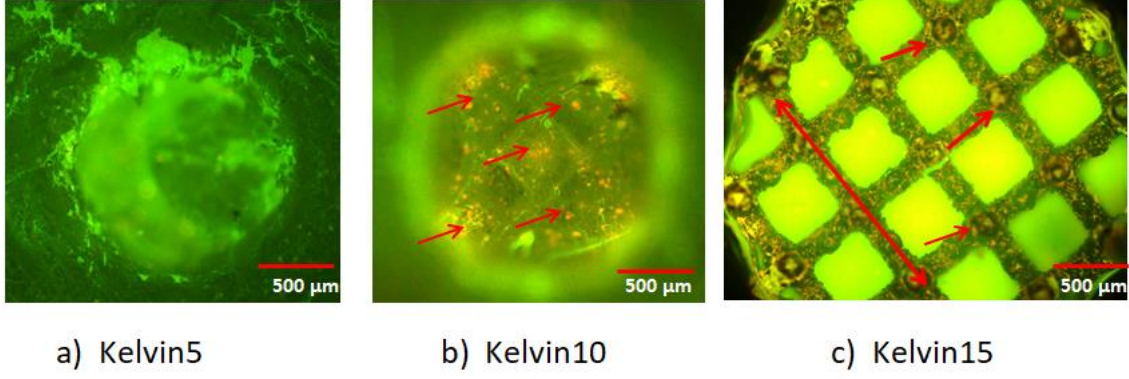
Şekil 54. BCC lattice greftlerinde hücre dağılımı a) BCC5 b) BCC10 c) BCC15.

Bu bulgular BCC15 greftinin hem yüzey hem de iç bölgelerde hücrelerin daha etkin biçimde yayılmasına olanak tanıyan, hücreler açısından daha elverişli bir mikroçevre sunduğunu göstermektedir. Keskin kenarların hücrelerin tutunabileceği adezyon noktalarının sayısını artırarak hücre yüzey etkileşimini güçlendirdiği düşünülmektedir(Rabel ve ark.,2020). FCC greftlerinde ise yuvarlatılmış köşeler ve delikli iç bölgelerin hücre tutunmasını belirgin şekilde desteklediği gözlenmiştir. **FCC10** ve **FCC15** greftleri hem yüzey hem de iç gözeneklerde daha homojen bir hücre dağılımı ve daha yüksek hücre tutunması sergilerken, **FCC5** greftinde hücre tutunmasının daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar **FCC10** ve **FCC15** greftlerinde bulunan yuvarlatılmış köşe geometrisinin ve delikli mimarının daha sağlıklı hücre morfolojisini ve daha hızlı hücre proliferasyonunu desteklediğini düşündürmektedir (Lecuit ve Lenne 2007) (Şekil 55).



Şekil 55. FCC lattice greftlerinde hücre dağılımı a) FCC5 b) FCC10 c) FCC15.

Kelvin greftlerinde gözenekli ve izotropik tasarımın hücre tutunması üzerindeki etkileri belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. **Kelvin5** ve **Kelvin10** greftlerinde hücre tutunmasının sınırlı kaldığı ve hücrelerin ağırlıklı olarak delikli iç bölgelerde konumlandığı gözlenmiştir (Şekil 56).



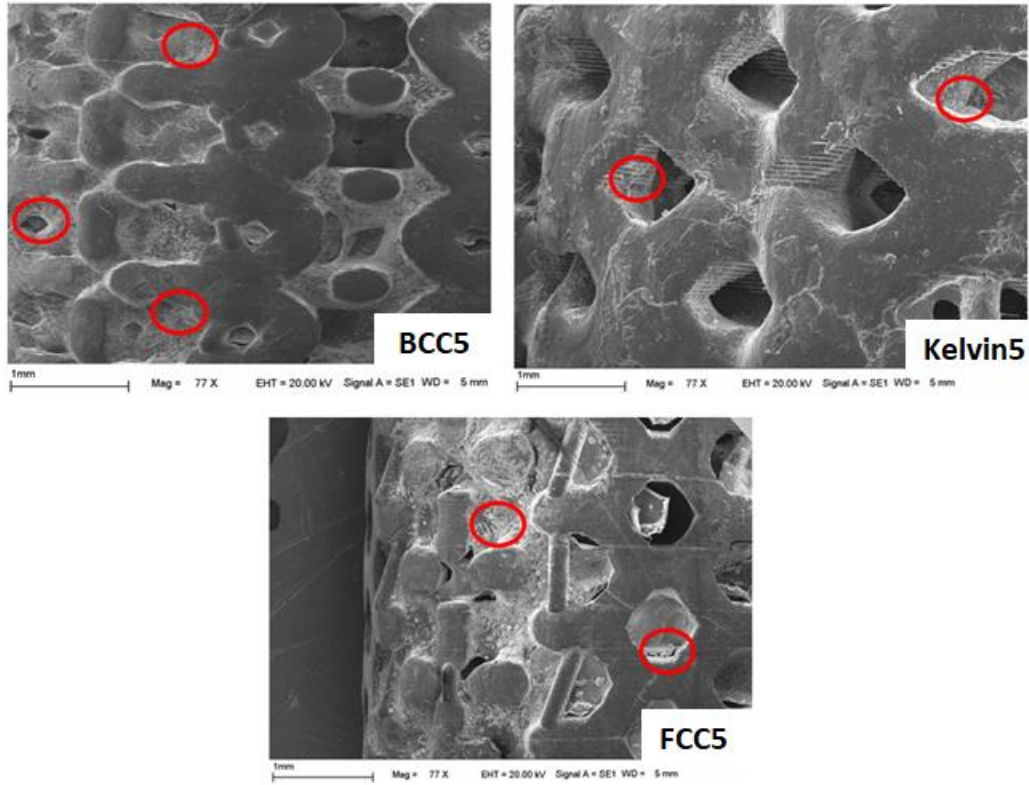
Şekil 56. Kelvin lattice greftlerinde hücre dağılımı a) Kelvin5 b) Kelvin10 c) Kelvin15

Buna karşılık **Kelvin15** greftinde hücrelerin hem deliklerin kenarlarına hem de deliklerin iç yüzeylerine tutunduğu ve böylece daha geniş bir alana yayılan hücre dağılımı sergilediği görülmüştür. Yuvarlatılmış ve izotropik geometrilerin hücrelerin daha homojen şekilde yayılmasını teşvik ederek biyouyumluluğu arttırdığı literatürde mevcuttur (Sanas ve Mulay,2022) .Bu durum **Kelvin15**'in hem yüzeyde hem de iç bölgelerde daha etkili hücre yayılımını destekleyen elverişli bir ortam sunduğunu düşündürmektedir.

5.3.3. Kitosan Kaplama Sonuçları

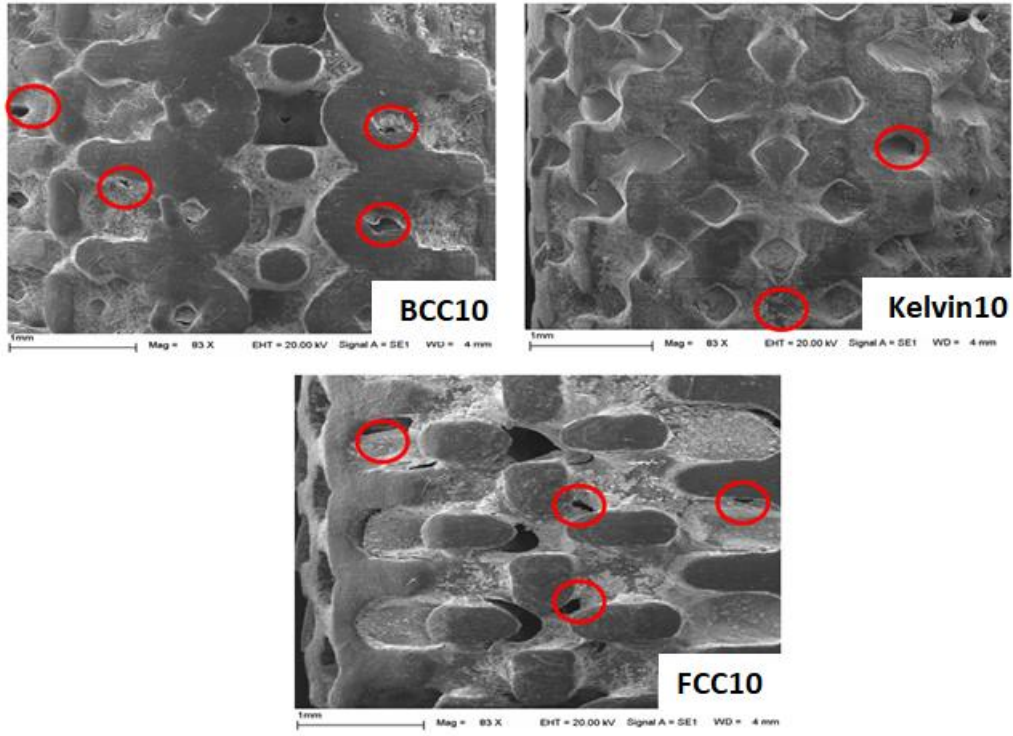
Bu tez çalışmasında BCC,FCC ve Kelvin birim hücreleri kullanılarak üretilen ve tamamı kitosan ile kaplanan lattice greftlerin yüzey morfolojisi SEM görüntüleri ile yüzey elementel bileşimi ise EDX analizi ile değerlendirilmiştir. SEM görüntüleri, kafes mimarisinin korunumu,strut yüzeyindeki kaplama sürekliliği, kaplamanın gözenek açıklıkları ve birleşim bölgelerindeki davranışını ortaya koyarken, EDX sonuçları kitosan kaplamanın beklenen kimyasal kanıtı olan azot (N) sinyalinin varlığını destekleyici kanıt olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte EDX'in noktasal ve yüzeye duyarlı bir analiz olması nedeniyle azotun düşük çıkması ya da bazı spektrumlarda tespit edilememesi kaplamanın tamamen yokluğu anlamına gelmemektedir. Ölçüm noktasına kaplama kalınlığının bölgesel değişimine ve yüzeydeki olası kalıntıların etkisine bağlı dalgalanmalar görülebilmektedir. SEM incelemeleri kapsamında BCC, FCC ve Kelvin geometrilerine sahip lattice greftlerde selüloz içeriği 5–10–15 olacak şekilde üç kompozisyon grubu karşılaştırılmıştır.Selüloz takviyesinin polimer matrislerde yüzey topografyasını ve pürüzlülüğü etkileyebildiği literatürde bildirilmiştir(Mohit ve ark.,2018). Şekil 57'de verilen SEM görüntülerinde strut yüzeylerinde kaplamanın sürekli bir yüzey oluşturarak izlenebildiği ve selüloz katkısının düşük olması nedeniyle belirgin partikül kaynaklı pürüzlülüğün daha az ortaya çıktığı tespit edildi. **BCC5** greftinde bulunan doğrusal strutlar sayesinde kaplama çözeltisinin homojen bir şekilde yayıldığı ve strut boyunca kesintisiz bir kılıf oluşturduğu görülmüştür. **FCC5** greftlerinde strut birleşim noktalarında kaplamanın hafif kalınlaşma gösterdiği ancak gözenek

tıkanıklığına yol açmadığı tespit edildi. **Kelvin5** greftinde ise iç gözeneklere nüfuz ettiği ve ince bir tabaka halinde tutunduğu belirlendi.



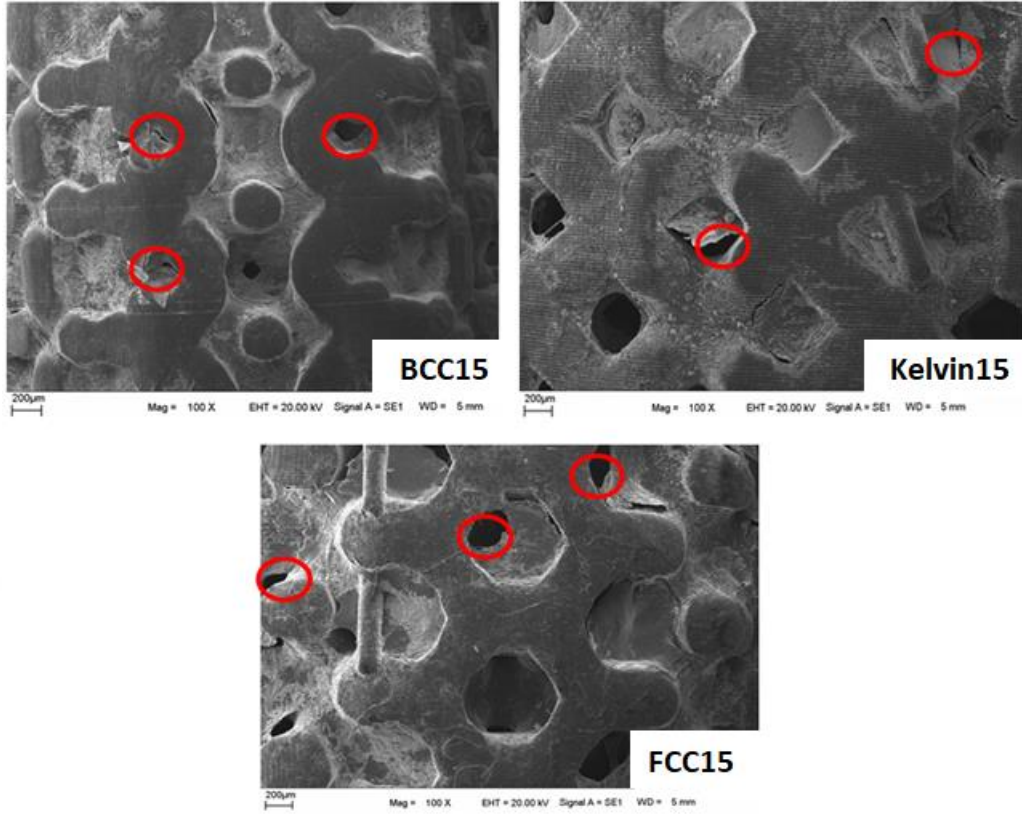
Şekil 57. BCC5, Kelvin5, FCC5 lattice greftlerinin gözenek yapılarının kaplama sonrası SEM görüntüsü.

BCC10 ve **FCC10** lattice greftlerinin gözenek görünümüne bakıldığında (Şekil 58) kaplama sonrası gözeneklerin tamamen kapanmadığı görülmektedir. **Kelvin10** grefti kitosanın düğüm bölgelerinde tutunma eğilimi gösterebileceği bir geometri sunmaktadır. Selüloz oranının artmasıyla strut yüzeylerinde mikro pürüzlülüğün arttığı ve kaplama sonrası yüzeyin daha kalın bir topografya sergilediği görüldü. Bu artışın selüloz fazının yüzeye yakın bölgelerde bulunması veya kaplama tabakasıyla birlikte yüzey enerjisini değiştirmesi sonucu ortaya çıkmış olabileceği değerlendirildi. Bununla birlikte gözenek açıklıklarının korunduğu (**FCC10**) ve kaplamanın yapısal bütünlüğü bozmadığı tespit edildi.



Şekil 58. BCC10, Kelvin10, FCC10 lattice greftlerinin gözenek yapılarının kaplama sonrası SEM görüntüsü.

BCC15, FCC15 ve Kelvin15 greftlerinden alınan SEM görüntülerinde kaplama morfolojisinin yer yer heterojen bir dağılım sergilediği gözlenmiştir (Şekil 59). Graft yüzeyinde mikro pürüzlülüğün arttığı buna karşın kitosan kaplamanın mimari bütünlüğü bozmadığı ve gözeneklerin açık kaldığı tespit edilmiştir. **BCC15** greftinde strut yüzeyindeki kaplamanın daha tanecikli bir yapı sergilediği ve diğer greftlere oranla kaplamanın gözeneklerde tam tutunmadığı tespit edildi. **FCC15** greftlerinde strut birleşim bölgelerinde daha kalın ve düzensiz kaplama bölgelerinin olduğu saptandı. **Kelvin15** greftinde kaplamanın diğer greftlere oranla en yüksek mikroskobik pürüzlülüğe sahip olduğu ve nanopürüzlü bir yüzey karakteri kazandığı belirlendi.



Şekil 59. BCC15, Kelvin15, FCC15 lattice greftlerinin gözenek yapılarının kaplama sonrası SEM görüntüsü.

Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda selüloz oranı arttıkça kitosan kaplama sonrası yüzeydeki mikro pürüzlülüğün arttığı tespit edilmiştir. Geometrik açıdan ise **BCC** lattice greftlerinin en homojen kaplama dağılımını sunduğu, **FCC** lattice greftlerinin düğüm noktalarında en iyi tutunmayı sağladığı ve **Kelvin** lattice greftlerinin ise kaplama ile en yüksek yüzey pürüzlülüğünü oluşturduğu saptanmıştır. Kitosan kaplama uygulanmış BCC, FCC ve Kelvin lattice greftlerinin yüzey karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu ile entegre enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. EDX analizi ile her lattice greft için seçilen analiz noktalarından elde edilen spektrumlar değerlendirilmiş ve elementel kompozisyon değerleri ağırlıkça yüzde (wt.%) ve atomik yüzde (at.%) cinsinden belirlenmiştir. Elde edilen ham veriler düzenlenerek karşılaştırmalı bir özet tablo halinde sunulmuştur (Tablo 14). Tablo 14’de verilen element içerik değerleri incelendiğinde tüm greftlerde karbon (C) ve oksijenin (O) baskın olduğu görülmektedir. C içeriği yaklaşık %37,96–51,56 (wt.%) aralığında, O içeriği ise yaklaşık %29,50–47,98 (wt.%) aralığındadır. Bu bulgu analiz edilen lattice greft yüzeylerinin organik karakterli bir faz ile temsil edildiğini ve oksijen içeren fonksiyonel grupların yüzeyde önemli yer tuttuğunu göstermektedir. Kitosanın polisakkarit omurgasında C ve O’nun doğal olarak yüksek beklenen bileşenler olması da bu elementel dağılımla uyumaktadır. Ayrıca kitosanın kimyasal yapısı amino ve hidroksil grupları gibi

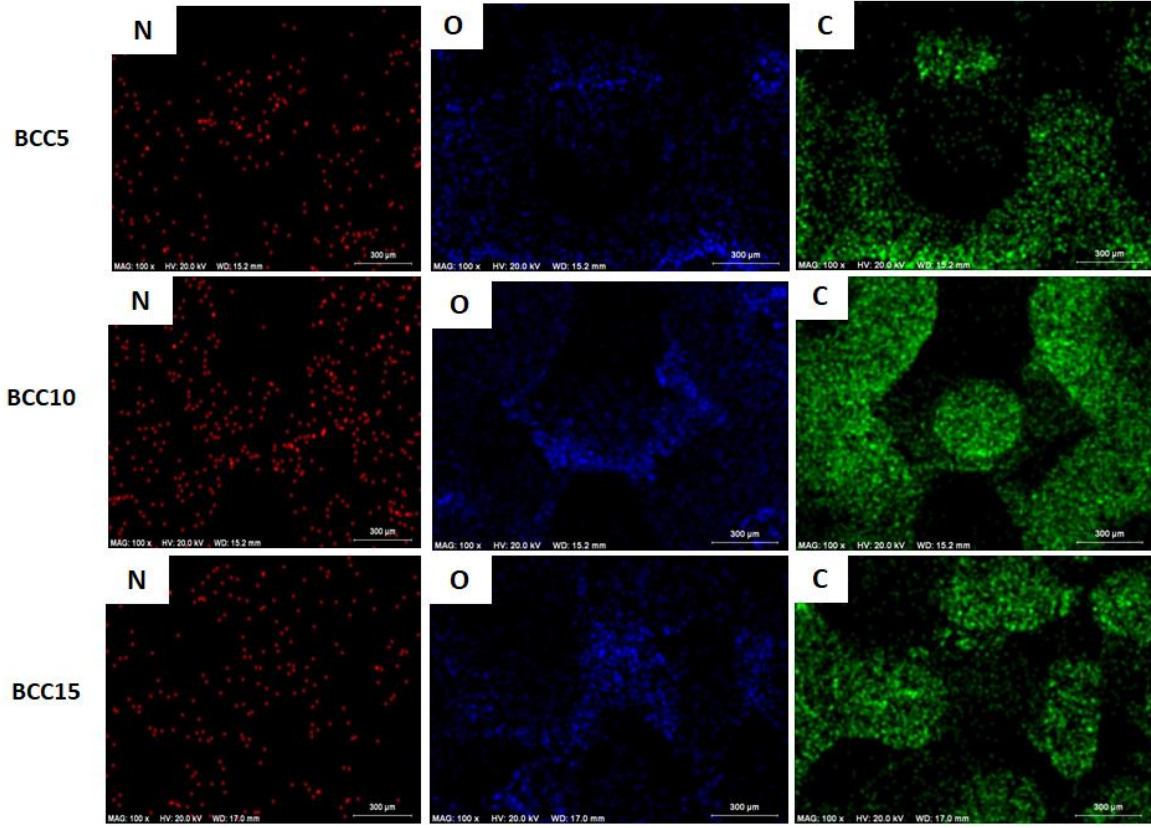
hetero atom içeren fonksiyonellikler üzerinden yüzeye tutunma ve etkileşim potansiyeli taşımaktadır (Rinaudo,2006).

Tablo 14. Greftlere ait EDX elementel kompozisyon özeti (C, O, N, Na, Cl)

Greft	C (wt.)	C (at.%)	O (wt.%)	O (at.%)	N (wt.%)	N (at.%)	Na (wt.%)	Na (at.%)	Cl (wt.%)	Cl (at.%)
BCC5	45,98	56,19	38,29	35,13	0,96	1,00	6,90	4,40	7,73	3,20
BCC10	51,56	61,15	35,75	31,83	0,70	0,71	6,19	3,84	3,91	1,57
BCC15	47,14	58,89	30,42	28,53	0,29	0,31	12,33	8,04	9,13	3,86
FCC5	41,50	53,03	34,54	33,13	0,90	0,99	11,91	7,95	10,51	4,55
FCC10	48,77	60,15	31,18	28,87	0,01	0,01	11,29	7,28	8,43	3,52
FCC15	37,96	47,12	47,98	44,71	0,05	0,06	9,17	5,94	3,64	1,53
Kelvin5	40,45	51,09	38,90	36,88	0,29	0,31	12,59	8,31	6,98	2,99
Kelvin10	50,06	61,46	29,50	27,19	0,49	0,52	11,11	7,13	8,59	3,57
Kelvin15	45,46	55,88	36,60	33,77	0,49	0,51	11,04	7,09	5,70	2,38

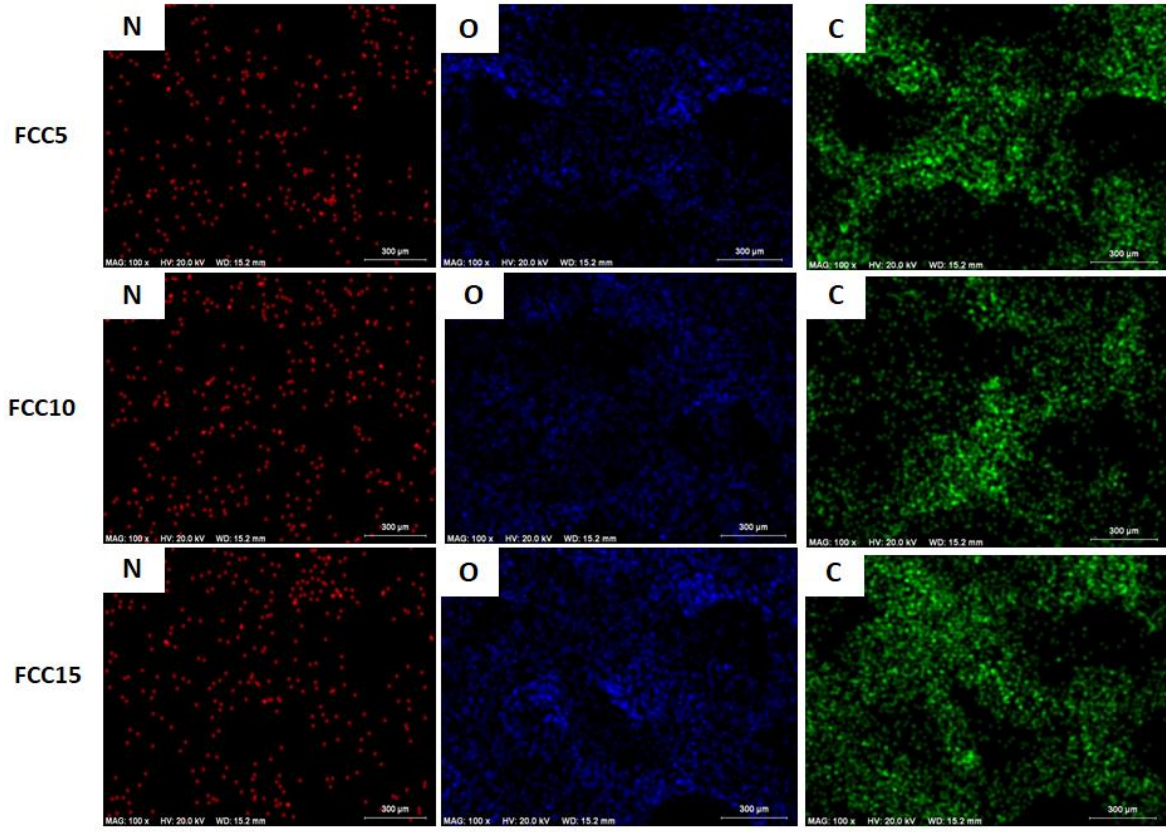
Kaplama başarısının değerlendirilmesinde kritik göstergelerden biri kitosanın amino grupları ile ilişkili olabilecek azot (N) sinyalidir. EDX sonuçlarına göre N, greftler arasında değişmekle birlikte düşük ancak seçilebilir düzeylerde görülmüştür. BCC serisinde N, BCC5'te %0,96 (wt.%), BCC10'da %0,70 (wt.%) ve BCC15'te %0,29 (wt.%) seviyelerindedir. FCC serisinde FCC5'te %0,90 (wt.%) değerine karşılık, FCC10'da %0,01 (wt.%) ve FCC15'te %0,05 (wt.%) gibi çok düşük seviyeler elde edilmiştir. Kelvin serisinde ise Kelvin5'te %0,29 (wt.%), Kelvin10 ve Kelvin15'te sırasıyla %0,49 (wt.%) ve %0,49 (wt.%) düzeyinde N gözlemlenmiştir. Bu dağılım kitosan kaplamanın farklı geometri ve farklı ölçüm bölgelerinde değişen derecelerde temsil edilebildiğini göstermektedir. Burada özellikle vurgulanması gereken nokta EDX'in noktasal/alan bazlı ölçüm mantığı nedeniyle sonuçların greftin tamamından ziyade analiz edilen bölgeye özgü olduğudur. Dolayısıyla N'nin bazı greftlerde çok düşük bulunması kaplamanın yerel olarak daha ince olması ölçümün kaplamayı daha az temsil eden bir bölgeden alınması veya hafif elementlerin ölçüm hassasiyetiyle ilişkili etkilerle açıklanmaktadır (Larnøy ve ark.,2011; Xu ve ark.,2022). Geometri bazında değerlendirildiğinde azot sinyalinin **BCC5** ve **FCC5** greftlerinde yüksek olması ölçüm alınan yüzey bölgelerinde N içeren fazın daha belirgin temsil edildiğini göstermektedir. Buna karşın **FCC10** ve **FCC15**'te N değerlerinin çok düşük seviyelere gerilemesi FCC geometrisinde kaplamanın yerel dağılımının daha heterojen olabileceğine veya ölçüm bölgelerinin kaplamayı daha az temsil eden alanlara karşılık geldiğine işaret etmektedir. Kelvin serisinde **Kelvin10** ve **Kelvin15** için N'nin aynı seviyede raporlanması ise en azından bu seride ölçülen

bölgeler açısından daha tutarlı bir elementel görünüm bulunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak SEM–EDX analizleri tüm greftlerde C ve O açısından zengin bir yüzey kimyası bulunduğunu ayrıca grefte bağlı olarak değişen düzeylerde N varlığının raporlandığını göstermiştir. Kitosanın azot içeren fonksiyonel yapısı dikkate alındığında N sinyalinin gözlenmesi kaplamanın varlığına yönelik destekleyici bir bulgu olarak değerlendirilmektedir (Keshvaridoostchokami ve ark.,2022). BCC greftlerinin element haritalama sonuçları Şekil 60’da verilmiştir.



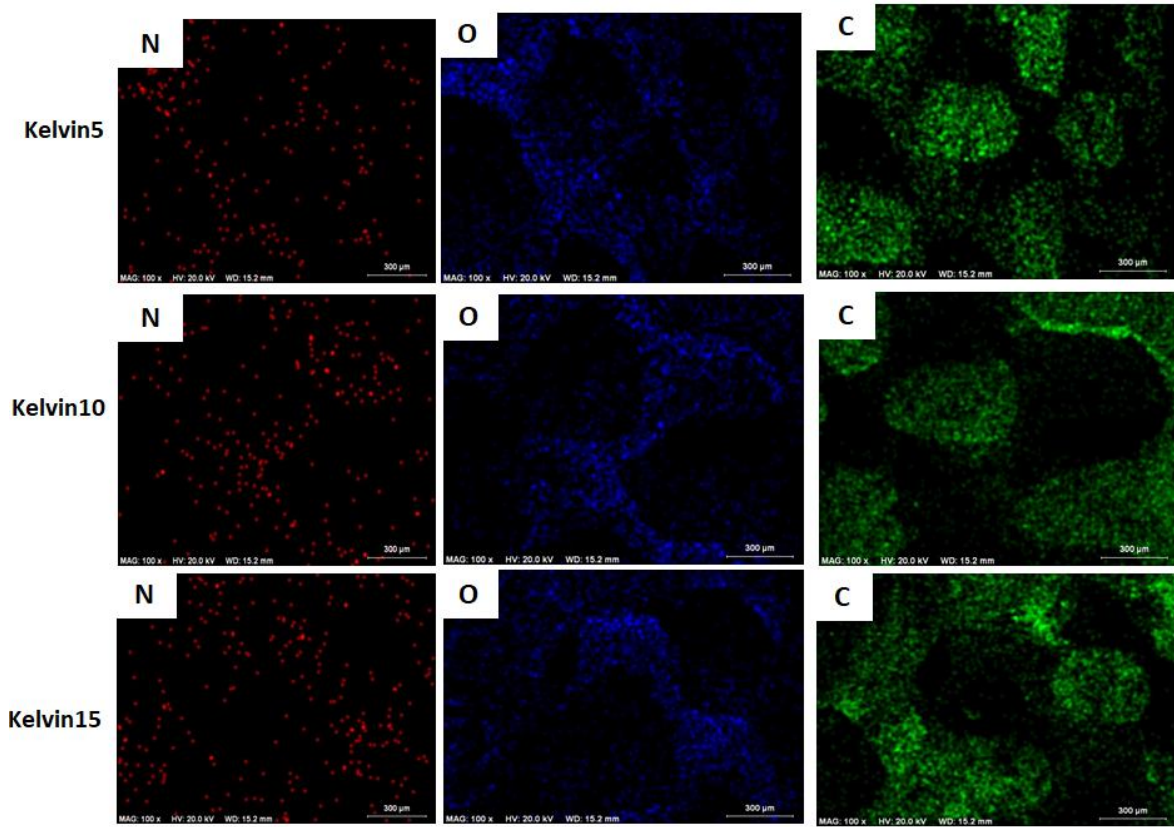
Şekil 60. BCC lattice greftlerinin element haritalama sonuçları.

BCC5 lattice greftinde selülozün matris içinde nispeten düşük bir konsantrasyonda homojen olarak dağıldığı gözlemlenirken **BCC15** lattice grefti en yüksek sinyal yoğunluğunu sergilemektedir. Karbon ve oksijen haritaları arasındaki korelasyon selüloz nanokristallerinin kümelenme olmaksızın polimerik ağ içinde iyi bir şekilde entegre olduğunu doğrulamaktadır. Bu durum CNC yüzeylerindeki hidroksil grupları ile metakrilat matrisi arasındaki güçlü moleküler etkileşimlere bağlanmaktadır. FCC lattice greftlerinin daha karmaşık gözenek geometrisine rağmen selüloz dağılımı son derece etkili olmaya devam etmiştir (Şekil 61).



Şekil 61. FCC lattice greftlerinin element haritalama sonuçları.

FCC10 ve **FCC15** lattice greftlerinin oksijen haritaları greft yüzeylerinde yoğun selüloz kaplamasını göstermektedir ve hücre yapışması için elverişli olan yüzey pürüzlülüğündeki artışı desteklemektedir. Karbon haritalarında gözlemlenen süreklilik yüksek selüloz oranlarında bile stereolitografi baskı hassasiyetinin korunduğunu ve faz ayrışmasının en aza indirildiğini göstermektedir. Kelvin greftinde strutlar üzerindeki selüloz dağılımı kritik öneme sahiptir (Şekil 62).



Şekil 62. Kelvin lattice greftlerinin element haritalama sonuçları.

Kelvin geometrisinde karbon haritaları, selüloz oranı arttıkça sinyal yoğunluğunun yükseldiğini ancak dağılımın diğer geometrilere kıyasla daha düzenli ve sürekli bir yapı koruduğunu ortaya koymaktadır. **Kelvin15**'te dahi büyük ölçekli faz ayrışması belirtisi gözlemlenmemesi bu hücre topolojisinin izotropik strut organizasyonunun selüloz dağılımını desteklediğini göstermektedir. Oksijen sinyali Kelvin greftlerinde strut yüzeyleri boyunca görece dengeli bir dağılım sergilemiş, bu da yüzey kimyasının geometri genelinde tutarlı kaldığına işaret etmektedir. Tüm greft tiplerinde azot sinyalinin tespit edilmesi kitosan kaplamanın BCC, FCC ve Kelvin geometrilerinin tamamında başarıyla uygulandığını doğrulamaktadır. Azot dağılımının selüloz oranından bağımsız olarak görece sabit bir yoğunluk sergilemesi kitosan kaplamanın kalınlığının ve homojenliğinin selüloz içeriğinden etkilenmediğini göstermektedir. Bu bulgu yüzey fonksiyonizasyonunun iç kompozisyon değişikliklerinden bağımsız olarak kontrol edilebildiğini ve kitosanın greft yüzeylerinde tutarlı bir biyoaktif tabaka oluşturduğunu kanıtlamaktadır. Sonuç olarak EDX haritalama analizleri selüloz nanokristallerinin fotopolimer matris içerisinde tüm kafes geometrilerinde başarıyla entegre edildiğini ve artan konsantrasyona bağlı olarak karbon ve oksijen sinyallerinin karakteristik bir artış sergilediğini doğrulamaktadır. Karbon haritalarındaki süreklilik yüksek selüloz oranlarında bile stereolitografi yönteminin baskı hassasiyetini koruduğunu ve makro ölçekli bir faz ayrışmasının yaşanmadığını kanıtlamaktadır. Özellikle azot haritalarında gözlenen homojen dağılım kitosan

kaplamanın hücre topolojisinden ve selüloz oranından bağımsız olarak tüm strut yüzeylerine kararlı bir şekilde tutunduğunu göstermektedir. Bu durum geliştirilen lattice greftlerin hem iç yapısal bütünlüğünün hem de yüzey biyoaktivitesinin hedeflenen tasarım parametreleriyle tam uyum içerisinde olduğunu ve kemik doku mühendisliği uygulamaları için gerekli olan çok fonksiyonlu yüzey kimyasının başarıyla oluşturulduğunu ortaya koymaktadır.

5.3.4. Antibakteriyel Aktivite Sonuçları

E. faecalis'e karşı selüloz katkılı lattice greftlerin antibakteriyel aktivitesi, inhibisyon zon çapları ölçülerek değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre BCC5, BCC10, FCC5, FCC10, FCC15, Kelvin5, Kelvin10 ve Kelvin15 greftlerinde inhibisyon zonu oluşumu gözlenmemiştir. BCC15 greftinde ise 3,26 mm çapında inhibisyon zonu ölçülmüştür. Pozitif kontrol olarak kullanılan Cefadroxil (Bioanalyse) diskleri tüm deney gruplarında inhibisyon zonu oluşturmuştur. **BCC15** grubunda elde edilen aktivitenin antibiyotikle kıyaslandığında yaklaşık %48 oranında etkili olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen inhibisyon zon çaplarına ait veriler Tablo 15'de verilmiştir.

Tablo 15. İnhibisyon zon çapları.

İnhibisyon zon çapı (mm)									
Greft İsimleri	BCC5	BCC10	BCC15	FCC5	FCC10	FCC15	Kelvin5	Kelvin10	Kelvin15
Enterococcus faecalis	-	-	3,26	-	-	-	-	-	-
Cefadroxil	5,80	6,68	6,79	6,57	6,01	6,60	6,56	6,72	6,75

Tablo 15'de sunulan veriler incelendiğinde; BCC5, BCC10, FCC5, FCC10, FCC15, Kelvin5, Kelvin10 ve Kelvin15 greftlerinde *E. faecalis* bakterisine karşı herhangi bir inhibisyon zonu oluşumu gözlenmemiştir. Bu bulgu söz konusu lattice greftlerin mevcut konsantrasyon ve geometrilerde test edilen mikroorganizma üzerinde antibakteriyel aktivite sergilemediğini göstermektedir.

5.3.5. Temas Açısı Ölçüm Sonuçları

Lattice greftlerin ıslanabilirlik karakteristikleri temas açısı ölçümleri ile değerlendirilmiştir (Tablo 1). Elde edilen veriler ışığında tüm greft türlerinde temas açısının yapıya selüloz takviyesi yapılmasıyla birlikte bir düşüş sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum selüloz içeriğinin artmasıyla birlikte greft yüzeylerinin hidrofilik karakterinin güçlendiğini ortaya koymaktadır (Tablo 16).

Tablo 16. Lattice greftlerin temas açısı ölçüm sonuçları.

Greft	Temas Açısı (°)	Standart Sapma(±)
BCC5	71,2	2,8
BCC10	65,8	3,0
BCC15	62,5	3,2
FCC5	69,5	2,6
FCC10	64,1	2,9
FCC15	61,8	3,1
Kelvin5	79,4	2,5
Kelvin10	66,3	2,8
Kelvin15	63,1	3,0

Literatürde belirtildiği üzere selüloz molekül zincirleri üzerinde yoğun miktarda bulunan hidroksil (-OH) grupları su molekülleri ile güçlü hidrojen bağları kurma eğilimindedir (Wohlert ve ark.,2022). Bu kimyasal etkileşim yüzeyin serbest enerjisini artırarak su damlasının yüzeyde daha fazla yayılmasına ve dolayısıyla temas açısının azalmasına neden olmaktadır. Çalışmada selüloz oranının %5'ten %15'e çıkarılmasıyla temas açısının en düşük değer olan 61.8° (**FCC15**) gerilemesi dolgu maddesi konsantrasyonunun yüzey ıslanabilirliği üzerindeki belirleyici rolünü doğrulamaktadır (Semakina ve ark.,2015). Ayrıca farklı greftlerin benzer selüloz oranlarında dahi temas açısı üzerinde farklı etkiler yarattığı görülmektedir. Özellikle FCC greftlerinin BCC ve Kelvin greftlerine kıyasla daha düşük temas açısı değerleri sergilemesi yapısal geometrinin yüzey pürüzlülüğü ve selülozun yüzeydeki homojen dağılımı üzerindeki etkisinden kaynaklanıyor olabilir. Sonuç olarak tüm greftlerin 90° eşik değerinin altında kalması geliştirilen greftlerin tamamının hidrofilik karakterde olduğunu ve selüloz takviyesinin yüzey modifikasyonunda etkili olduğunu göstermektedir.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada hurma çekirdeğinden saflaştırılmış nanokristalin selüloz katkılı 3B lattice greft yapıları BCC, FCC ve Kelvin birim hücre geometrileri kullanılarak MSLA yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen greftlerin kimyasal, termal, mekanik ve biyolojik özellikleri çok yönlü olarak değerlendirilmiş ve selüloz katkı oranı ile geometri tasarımının performans üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

- **Kimyasal ve Termal Karakterizasyon Sonuçları**

Hurma çekirdeğinden elde edilen selülozun yapısal doğrulanması FTIR analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Spektrumda $3000\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen geniş bant, selüloz zincirlerindeki hidroksil (-OH) gruplarına ait gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. $2850\text{--}2950\text{ cm}^{-1}$ aralığında belirlenen pikler alifatik glikozit birimlerine ait C-H gerilmelerine karşılık gelmektedir. Ayrıca $900\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ aralığında tespit edilen karakteristik C-O-C eterik bağ titreşimleri selüloz omurgasının tipik göstergesi olarak değerlendirilmiştir. 1112 cm^{-1} 'de C-O, 1658 cm^{-1} 'de C=C, 1436 cm^{-1} 'de CH₂ ve yaklaşık 810 cm^{-1} 'de C-H titreşim piklerinin varlığı, elde edilen yapının ticari selüloz ile uyumlu kimyasal özellikler sergilediğini ve saflaştırma sürecinin başarılı şekilde gerçekleştirildiğini ortaya koymuştur. X-ışını kırınımı analizlerinde yaklaşık 15° , 23° ve 33° civarında belirlenen karakteristik pikler, selülozun yarı kristalin doğasını doğrulamış ve istenilen kristal yapının elde edildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar hurma çekirdeğinden elde edilen selülozun yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve literatürde bildirilen selüloz kristal formlarıyla uyumlu olduğunu kanıtlamaktadır. Termal davranış DTA, TGA ve DSC analizleri ile incelenmiştir. TGA sonuçlarına göre selüloz örneğinde üç aşamalı kütle kaybı gözlenmiştir. İlk kütle kaybı (%6,85 civarında) $50\text{--}120^\circ\text{C}$ aralığında gerçekleşmiş ve yapıda bulunan serbest suyun uzaklaşmasıyla ilişkilendirilmiştir. İkinci aşama $200\text{--}350^\circ\text{C}$ aralığında meydana gelmiş olup selülozun üç boyutlu makromoleküler yapısının parçalanmasına karşılık gelmektedir. Son aşama ise $400\text{--}550^\circ\text{C}$ aralığında gerçekleşmiş ve selüloz zincirlerinin termal bozunması ile ilişkilendirilmiştir. DTA ve DSC analizlerinde bir endotermik ve iki ekzotermik pik belirlenmiştir. İlk endotermik olayın ($\sim 31,85\text{ J/g}$) nem uzaklaşmasına bağlı olduğu ve ticari selüloza kıyasla daha yüksek enerji gerektirdiği tespit edilmiştir. $250\text{--}360^\circ\text{C}$ aralığındaki ekzotermik pik ise selüloz zincirlerinin ayrışması ve yapısal bütünlüğün kaybı ile ilişkilendirilmiştir. DSC eğrilerinin DTA sonuçları ve literatürde bildirilen selüloz verileri ile uyumlu olması elde edilen selülozun termal davranışının güvenilirliğini desteklemektedir.

- **Mekanik Performans ve Yapısal Değerlendirme Sonuçları**

MSLA yöntemi ile üretilen selüloz takviyeli lattice greftlerde boyutsal doğruluk ve yüzey morfolojisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler hem selüloz katkı oranının hem de birim hücre geometrisinin üretim kalitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Özellikle **BCC** ve **FCC** gibi keskin düğüm noktalarına sahip tasarımlarda fotokürleme yönüne dik konumlanan ince strut bölgelerinde lokal deformasyonlar, yanal genişlemeler ve mikro çatlak oluşumları gözlenmiştir. Nanokristalin selüloz ilavesinin reçine viskozitesini artırdığı ve ışık saçılımını etkileyerek baskı çözünürlüğünü ve boyutsal hassasiyeti kısmen sınırladığı belirlenmiştir. Basma testleri sonucunda gerilme–gerinim eğrileri elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere üç temel fazda değerlendirilmiştir. **BCC15** grefti yaklaşık 49,5 MPa ile en yüksek maksimum gerilme değerini göstermiş ve sürekli artan bir eğri ile yüksek yoğunlaşma gerinimine ulaşmıştır. Buna karşılık **FCC5** grefti yaklaşık 11–12 MPa seviyesinde tepe gerilmesine ulaştıktan sonra belirgin bir yumuşama davranışı sergileyerek en düşük mekanik dayanımı göstermiştir. Düşük selüloz oranına sahip **FCC5** ve **BCC5** örnekleri yüksek deformasyon ve kararsızlık eğilimi gösterirken Kelvin geometrisi özellikle orta ve yüksek selüloz oranlarında daha dengeli ve kontrollü bir deformasyon davranışı sunmuştur. Genel olarak **BCC15** grefti hem yüksek dayanım hem de düşük piksel kayması ile en başarılı tasarım olarak öne çıkmıştır. Shore D sertlik ölçümleri, X ve Y yönlerinde gerçekleştirilmiş ve selüloz oranının %5’ten %15’e artırılmasıyla anizotropik davranışın azaldığı belirlenmiştir. En yüksek sertlik değerleri **Kelvin15** greftinde (X: $86,2 \pm 0,5$; Y: $84,8 \pm 0,6$) elde edilmiştir. Bu artış nanokristalin selülozun yüksek kristalinitesi ve en-boy oranı sayesinde polimer matris içindeki zincir hareketliliğini sınırlandırarak yük transfer etkinliğini artırmasıyla açıklanmıştır. Termal yorulma testleri sonucunda çevrim sayısının artmasıyla birlikte tüm greftlerde akma dayanımı ve elastik modül değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Bu durumun tekrarlı genleşme-büzülme döngülerinin strut bölgelerinde mikroyapısal çatlaklara ve bağlantı noktalarında zayıflamaya yol açmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Termal kararlılık açısından **BCC15** ve **BCC10** greftleri en iyi performansı göstermiş, **Kelvin** grubu orta düzey dayanım sergilemiş, **FCC** grubu ise en fazla mekanik kayba uğramıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçları von Mises gerilme dağılımları üzerinden değerlendirilmiş ve selüloz oranındaki artışın elastisite modülü ve yük taşıma kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Düşük selüloz oranlarında **BCC** ve **FCC** geometrilerinde strut orta bölgelerinde eğilme kaynaklı gerilme yoğunlaşmaları gözlenirken **Kelvin15** greftinde daha homojen bir gerilme dağılımı elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük analizleri, selüloz oranındaki artışla birlikte tüm geometrilerde pürüzlülük değerlerinin yükseldiğini göstermiştir. **FCC** ve **Kelvin** tasarımlarında pürüzlülük değerlerinin **BCC**’ye göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun eklemeli imalat sürecinde kürlenme davranışı ve katman örtüşme mekanizmasındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

- **Biyolojik Değerlendirme Sonuçları**

Floresans görüntüleme sonuçları hücre tutunma davranışının hem selüloz oranı hem de geometriye bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. **FCC10, FCC15 ve BCC15** greftleri en yüksek hücre yoğunluğunu sergilemiştir. Kelvin serisinde hücre tutunması görece sınırlı olmakla birlikte Kelvin10 örneğinde lokal hücre varlığı gözlenmiştir. **Kelvin15** ve **BCC15** greftlerinde hücrelerin gözenek kenarlarını ve iç yüzeyleri büyük ölçüde kapladığı belirlenmiştir. Kitosan kaplama değerlendirmelerinde **BCC5** greftinde doğrusal strut yapısı sayesinde homojen ve süreklilik gösteren bir kaplama olduğu saptanmıştır. **FCC5** örneklerinde düğüm noktalarında hafif kalınlaşma gözlenmiş ancak gözenek kapanması oluşmamıştır. **Kelvin5**'te kaplamanın iç gözeneklere nüfuz ederek ince bir film tabakası oluşturduğu belirlenmiştir. Yüksek selüloz oranlarında özellikle **Kelvin15** örneğinde mikroskobik pürüzlülüğün arttığı ve nanopürüzlü bir yüzey karakteri olduğu gözlenmiştir. Antibakteriyel testlerde pozitif kontrol olarak kullanılan Cefadroxil diskleri tüm gruplarda inhibisyon zonu oluşturmuştur. **BCC15** greftinin antibiyotik aktivitesine kıyasla yaklaşık %48 oranında antibakteriyel etkinlik gösterdiği belirlenmiştir. Temas açısı ölçümleri selüloz oranının %5'ten %15'e yükseltilmesiyle temas açısının 61,8° (**FCC15**) değerine kadar düştüğünü göstermiştir. Tüm greftlerin 90° eşik değerinin altında kalması greftlerin hidrofilik karakterde olduğunu ve selüloz takviyesinin yüzey ıslanabilirliğini artırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur.

6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen veriler ve ulaşılan sonuçlar ışığında, konunun geliştirilmesi ve derinleştirilmesi adına şu adımlar atılabilir:

- **Dinamik Mekanik Analizler:** Statik basma testlerine ek olarak vücut içi fizyolojik yükleri simüle eden dinamik yorulma testleri gerçekleştirilebilir ve yapıların uzun süreli mekanik kararlılığı incelenebilir.
- **Biyobozunurluk ve Salınım Kinetiği:** Üretilen greftlerin yapay vücut sıvısı içerisindeki kütle kaybı ve yapısal bütünlük değişimleri zamana bağlı olarak takip edilebilir.
- **Kantitatif Biyolojik Analizler:** Floresans görüntüleme ile elde edilen nitel veriler, MTT veya XTT gibi hücre canlılık testleri ve ALP aktivitesi gibi osteojenik farklılaşma analizleri ile desteklenerek hücre-yüzey etkileşimi sayısal olarak doğrulanabilir.
- **Reçine Modifikasyonu:** Nanokristalin selülozun neden olduğu viskozite artışını ve ışık saçılımını minimize etmek amacıyla reçine formülasyonuna uygun seyreltici eklenebilir.
- **Fonksiyonel Derecelendirilmiş Tasarımlar:** Tek bir birim hücre geometrisi yerine greftin farklı bölgelerinde farklı gözeneklilik sunan derecelendirilmiş kafes yapılar tasarlanarak doğal kemiğin anizotropik yapısı daha hassas şekilde taklit edilebilir.

- **Antibakteriyel Mekanizmanın Aydınlatılması:** BCC15 greftinde gözlenen antibakteriyel etkinliğin kaynağını belirlemek adına farklı bakteri suşları üzerinde geniş kapsamlı testler yapılabilir ve yüzey pürüzlülüğü ile antibakteriyel performans arasındaki ilişki incelenebilir.
- **In-vivo Çalışmalar:** Laboratuvar ortamında (in-vitro) elde edilen başarılı sonuçların ardından yapıların canlı organizma içindeki biyoyumluluğunu ve kemik doku ile entegrasyonunu gözlemek amacıyla hayvan deneyleri planlanabilir.
- **Yüzey Karakterizasyonunun Derinleştirilmesi:** Selüloz katkısının yüzey enerjisi ve protein adsorpsiyonu üzerindeki etkileri daha detaylı analiz edilerek hidrofilik karakterin hücre tutunma mekanizması üzerindeki rolü netleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Abueidda, D. W., Bakir, M., Al-Rub, R. K. A., Bergström, J. S., Sobh, N. A., & Jasiuk, I. (2017).** Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials & Design*, 122, 255-267.
- Adawi, H., Hengjeerajaras, P., Froum, S. J., & Bagheri, Z. (2019).** A Less-Invasive Window Design for Lateral Wall Maxillary Sinus Augmentations. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 39(6).
- Adel, I. M., ElMeligy, M. F., & Elkasabgy, N. A. (2022).** Conventional and recent trends of scaffolds fabrication: a superior mode for tissue engineering. *Pharmaceutics*, 14(2), 306.
- Akbay, Ö. C., Bahçe, E., Köytepe, S., Kanmaz, H., & Hayaloğlu, A. A. (2025).** Production of natural source nanocrystalline cellulose and performance comparison with industrial cellulose. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanomaterials, Nanoengineering and Nanosystems*, 23977914251397585.
- Alagha, A. N., Sheikh-Ahmad, J. Y., Almesmari, A., Jarrar, F., Almaskari, F., & Abu Al-Rub, R. K. (2024).** Mechanical behavior and energy absorption of TPMS diamond structures and hybrid SC-FCC-BCC plate-lattices. *Journal of Engineering Mechanics*, 150(12), 04024088.
- Alavi, M. (2019).** Modifications of microcrystalline cellulose (MCC), nanofibrillated cellulose (NFC), and nanocrystalline cellulose (NCC) for antimicrobial and wound healing applications. *e-Polymers*, 19(1), 103-119.
- Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Al-Rub, R. K. A. (2018).** Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. *Additive manufacturing*, 19, 167-183.
- Almaiman, M., Al-Bargi, H. H., & Manson, P. (2013).** Complication of anterior iliac bone graft harvesting in 372 adult patients from May 2006 to May 2011 and a literature review. *Craniofacial trauma & reconstruction*, 6(4), 257-265.
- Alves, C. T. R. R., Junqueira, E. M. D., Sandoval-Filho, C. D. L., Antonio, J. C., Iyomasa-Pilon, M. M., Souza, H. R., & Girol, A. P. (2021).** Cutaneous wound healing modulation of lesions infected by *Staphylococcus epidermidis* and treated with 4% stabilized sodium hypochlorite solution. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 7(2), 032-042.
- Amini, M., Hosseini, H., Hashemi, S. A., & Arjmand, M. (2025).** Roadmap to Precision 3D Printing of Cellulose: Rheology-Guided Formulation, Fidelity Assessment, and Application Horizons. *Advanced Materials Technologies*, e01324.

- Ansari, M.** (2019). Bone tissue regeneration: biology, strategies and interface studies. *Progress in biomaterials*, 8(4), 223-237.
- Antony Jose, S., Cowan, N., Davidson, M., Godina, G., Smith, I., Xin, J., & Menezes, P. L.** (2025). A comprehensive review on cellulose Nanofibers, nanomaterials, and composites: Manufacturing, properties, and applications. *Nanomaterials*, 15(5), 356.
- Araújo, M. G., Silva, C. O., Misawa, M., & Sukekava, F.** (2015). Alveolar socket healing: what can we learn?. *Periodontology 2000*, 68(1), 122-134.
- Arnold, C., Monsees, D., Hey, J., & Schweyen, R.** (2019). Surface quality of 3D-printed models as a function of various printing parameters. *Materials*, 12(12), 1970.
- Asti, A., & Gioglio, L.** (2014). Natural and synthetic biodegradable polymers: different scaffolds for cell expansion and tissue formation. *The International journal of artificial organs*, 37(3), 187-205.
- Atykyan, N., Revin, V., & Shutova, V.** (2020). Raman and FT-IR Spectroscopy investigation the cellulose structural differences from bacteria *Gluconacetobacter sucrofermentans* during the different regimes of cultivation on a molasses media. *Amb Express*, 10(1), 84.
- Awaja, F., Nguyen, M. T., Zhang, S., & Arhatari, B.** (2011). The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(4), 408-418.
- Bae, S. U., & Kim, B. J.** (2021). Effects of cellulose nanocrystal and inorganic nanofillers on the morphological and mechanical properties of digital light processing (DLP) 3D-printed photopolymer composites. *Applied Sciences*, 11(15), 6835.
- Bahnini, I., Rivette, M., Rechia, A., Siadat, A., & Elmesbahi, A.** (2018). Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1), 147-161.
- Bakhiet, E., Mohamat Johari, N. F. I., Jahir Hussain, F. S., & Zulkifli, F. H.** (2023). Biom mineralization of carboxymethyl cellulose-sodium alginate infused with cellulose nanocrystals for bone regeneration. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 38(5), 400-414.
- Baldwin, P., Li, D. J., Auston, D. A., Mir, H. S., Yoon, R. S., & Koval, K. J.** (2019). Autograft, allograft, and bone graft substitutes: clinical evidence and indications for use in the setting of orthopaedic trauma surgery. *Journal of orthopaedic trauma*, 33(4), 203-213.
- Bassetti, M. A., Bassetti, R. G., & Bosshardt, D. D.** (2016). The alveolar ridge splitting/expansion technique: a systematic review. *Clinical oral implants research*, 27(3), 310-324.
- Baumgaertel, S., & Hans, M. G.** (2009). Buccal cortical bone thickness for mini-implant placement. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 136(2), 230-235.

- Bayir, E., Bilgi, E., Hames, E. E., & Sendemir, A.** (2019). Production of hydroxyapatite–bacterial cellulose composite scaffolds with enhanced pore diameters for bone tissue engineering applications. *Cellulose*, 26(18), 9803-9817.
- Bazan, A., Turek, P., Budzik, G., Niestony, P., Grygoruk, R., & Siemiński, P.** (2025). The Influence of Model Orientation on the Surface Roughness of Polymeric Models Produced by FFF, mSLA, PJ, and SLS Methods. *Materials*, 18(24), 5600.
- Bernard, A. R., & ElSayed, M. S.** (2024). Design, manufacturing, and analysis of periodic three-dimensional cellular materials for energy absorption applications: a critical review. *Materials*, 17(10), 2181.
- Betz, R. R.** (2002). Limitations of autograft and allograft: new synthetic solutions. *Orthopedics*, 25(5), S561-S570.
- Biermann, J. S., Holt, G. E., Lewis, V. O., Schwartz, H. S., & Yaszemski, M. J.** (2009). Metastatic bone disease: diagnosis, evaluation, and treatment. *JBJS*, 91(6), 1518-1530.
- Bisht, B., Hope, A., Mukherjee, A., & Paul, M. K.** (2021). Advances in the fabrication of scaffold and 3D printing of biomimetic bone graft. *Annals of biomedical engineering*, 49(4), 1128-1150.
- Borikar, G. P., Patil, A. R., & Kolekar, S. B.** (2023). Additively manufactured lattice structures and materials: present progress and future scope. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(11), 2133-2180.
- Bovo, F., Corassin, C. H., Rosim, R. E., & de Oliveira, C. A.** (2013). Efficiency of lactic acid bacteria strains for decontamination of aflatoxin M1 in phosphate buffer saline solution and in skimmed milk. *Food and bioprocess technology*, 6(8), 2230-2234.
- Bružauskaitė, I., Bironaitė, D., Bagdonas, E., & Bernotienė, E.** (2016). Scaffolds and cells for tissue regeneration: different scaffold pore sizes—different cell effects. *Cytotechnology*, 68(3), 355-369.
- Budiansky, B.** (1974). Theory of buckling and post-buckling behavior of elastic structures. *Advances in applied mechanics*, 14, 1-65.
- Buser, D., Sennerby, L., & De Bruyn, H.** (2017). Modern implant dentistry based on osseointegration: 50 years of progress, current trends and open questions. *Periodontology 2000*, 73(1), 7-21.
- Cañas-Gutiérrez, A., Toro, L., Fornaguera, C., Borrós, S., Osorio, M., Castro-Herazo, C., & Arboleda-Toro, D.** (2023). Biomineralization in three-dimensional scaffolds based on bacterial nanocellulose for bone tissue engineering: Feature characterization and stem cell differentiation. *Polymers*, 15(9), 2012.
- Carlsson, J., Kuswoyo, A., Shaikeea, A., & Fleck, N. A.** (2024). Compression of filled, open-cell, 3D-printed Kelvin lattices. *Mechanics of Materials*, 188, 104851.

- Carlström, I. E., Rashad, A., Campodoni, E., Sandri, M., Syverud, K., Bolstad, A. I., & Mustafa, K.** (2020). Cross-linked gelatin-nanocellulose scaffolds for bone tissue engineering. *Materials Letters*, 264, 127326.
- Cavallo, V., Pruvost, S., Gerard, J. F., & Fina, A.** (2023). Dispersion of Cellulose Nanofibers in Methacrylate-Based Nanocomposites. *Polymers*, 15(15), 3226.
- Cavo, M., & Scaglione, S.** (2016). Scaffold microstructure effects on functional and mechanical performance: integration of theoretical and experimental approaches for bone tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering: C*, 68, 872-879.
- Cheah, C. W., Al-Namnam, N. M., Lau, M. N., Lim, G. S., Raman, R., Fairbairn, P., & Ngeow, W. C.** (2021). Synthetic material for bone, periodontal, and dental tissue regeneration: where are we now, and where are we heading next?. *Materials*, 14(20), 6123.
- Chen, A. Y. J., Chen, A., Fitzhugh, A., Hartman, A., Kaiser, P., Nwaogwugwu, I., ... & Gu, G. X.** (2023). Multi Jet Fusion printed lattice materials: characterization and prediction of mechanical performance. *Materials Advances*, 4(4), 1030-1040.
- Chen, H., Song, G., Xu, T., Meng, C., Zhang, Y., Xin, T., ... & Han, B.** (2024). Biomaterial scaffolds for periodontal tissue engineering. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(8), 233.
- Chesley, M. P.** (2019). Characterization of Nano-Cellulose Based Composites For Biomedical Applications. The University of Maine.
- Cho, J., Kim, E., Kim, J. H., Lee, C. Y., & Cho, J. Y.** (2025). Enhancement of Energy Absorption Capability of 3D Printed Ti-6Al-4V BCC Lattice Structures by Adding Auxiliary Struts. *Materials*, 18(4), 732.
- Chu, T. M. G., Liu, S. S. Y., & Babler, W. J.** (2014). Craniofacial biology, orthodontics, and implants. In *Basic and applied bone biology* (pp. 225-242). Academic Press.
- Clarkson, C. M., El Awad Azrak, S. M., Forti, E. S., Schueneman, G. T., Moon, R. J., & Youngblood, J. P.** (2021). Recent developments in cellulose nanomaterial composites. *Advanced Materials*, 33(28), 2000718.
- Čolić, M., Mihajlović, D., Mathew, A., Naseri, N., & Kokol, V.** (2015). Cytocompatibility and immunomodulatory properties of wood based nanofibrillated cellulose. *Cellulose*, 22(1), 763-778.
- Čolić, M., Tomić, S., & Bekić, M.** (2020). Immunological aspects of nanocellulose. *Immunology letters*, 222, 80-89.
- Crini, G., & Badot, P. M.** (2008). Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. *Progress in polymer science*, 33(4), 399-447.

- Croisier, F., & Jérôme, C.** (2013). Chitosan-based biomaterials for tissue engineering. *European polymer journal*, 49(4), 780-792.
- d'Avanzo, N., Bruno, M. C., Giudice, A., Mancuso, A., Gaetano, F. D., Cristiano, M. C., ... & Fresta, M.** (2021). Influence of materials properties on bio-physical features and effectiveness of 3D-scaffolds for periodontal regeneration. *Molecules*, 26(6), 1643.
- Dai, Y., & Victoria, M.** (1997). Defect structures in deformed fcc metals. *Acta materialia*, 45(8), 3495-3501.
- Dakhli, C. E., Ben Fathallah, B., Soula, M., & Aouadi, B.** (2024, May). MSLA 3D Printing of Wax Pattern for Rapid Investment Casting Inconel 718-Superalloy Aeronautical Part. In *Advances In Additive Manufacturing Conference* (pp. 115-132). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Dauber, J. H., Paradis, I. L., & Dummer, J. S.** (1990). Infectious complications in pulmonary allograft recipients. *Clinics in chest medicine*, 11(2), 291-308.
- Deb, P., Deoghare, A. B., Borah, A., Barua, E., & Lala, S. D.** (2018). Scaffold development using biomaterials: a review. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12909-12919.
- Deng, J., Li, X., Liu, Z., Wang, Z., & Li, S.** (2022). Mechanical properties of three-dimensional printed combination-design truss lattice materials: Static and dynamic loading. *Journal of Aerospace Engineering*, 35(5), 04022067.
- Dimitriou, R., Mataliotakis, G. I., Angoules, A. G., Kanakaris, N. K., & Giannoudis, P. V.** (2011). Complications following autologous bone graft harvesting from the iliac crest and using the RIA: a systematic review. *Injury*, 42, S3-S15.
- Dixit, S., Liu, S., Murdoch, H. A., & Smith, P. M.** (2023). Investigating build orientation-induced mechanical anisotropy in additive manufacturing 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 880, 145308.
- Dobrzański, L. A., Dobrzańska-Danikiewicz, A. D., Czuba, Z. P., Dobrzański, L. B., Achteik-Franczak, A., Malara, P., ... & Kroll, L.** (2018). The new generation of the biologicalengineering materials for applications in medical and dental implant-scaffolds. *Archives of Materials Science and Engineering*, 91(2), 56-85.
- Duan, G., Zhang, C., Li, A., Yang, X., Lu, L., & Wang, X.** (2008). Preparation and characterization of mesoporous zirconia made by using a poly (methyl methacrylate) template. *Nanoscale research letters*, 3(3), 118.
- Duan, S., Wen, W., & Fang, D.** (2020). Additively-manufactured anisotropic and isotropic 3D plate-lattice materials for enhanced mechanical performance: Simulations & experiments. *Acta Materialia*, 199, 397-412.

- Duan, Y., Du, B., Shi, X., Hou, B., & Li, Y.** (2019). Quasi-static and dynamic compressive properties and deformation mechanisms of 3D printed polymeric cellular structures with Kelvin cells. *International Journal of Impact Engineering*, 132, 103303.
- Dutta, S. D., Hexiu, J., Patel, D. K., Ganguly, K., & Lim, K. T.** (2021). 3D-printed bioactive and biodegradable hydrogel scaffolds of alginate/gelatin/cellulose nanocrystals for tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 167, 644-658.
- Erturk, A. T., Bulduk, M. E., Tarakçi, G., Özer, G., & Yazar, E.** (2022). Investigation of the microstructure and mechanical characteristics of lattice structures produced by laser powder bed fusion method. *Metals and Materials International*, 28(1), 155-167.
- Esposito, M., Felice, P., Worthington, H. V., & Cochrane Oral Health Group.** (1996). Interventions for replacing missing teeth: augmentation procedures of the maxillary sinus. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2014(8).
- Fakhri, E., Eslami, H., Maroufi, P., Pakdel, F., Taghizadeh, S., Ganbarov, K., ... & Kafil, H. S.** (2020). Chitosan biomaterials application in dentistry. *International journal of biological macromolecules*, 162, 956-974.
- Fan, H. L., Zeng, T., Fang, D. N., & Yang, W.** (2010). Mechanics of advanced fiber reinforced lattice composites. *Acta Mechanica Sinica*, 26(6), 825-835.
- Farzin, A., Bahrami, N., Mohamadnia, A., Mousavi, S., Gholami, M., Ai, J., & Moayeri, R. S.** (2019). Scaffolds in dental tissue engineering: A review. *Arch Neurosci*, 7(1), e97014.
- Ferraz, M. P.** (2023). Bone grafts in dental medicine: an overview of autografts, allografts and synthetic materials. *Materials*, 16(11), 4117.
- Ferreira, F. V., Souza, L. P., Martins, T. M., Lopes, J. H., Mattos, B. D., Mariano, M., ... & Rojas, O. J.** (2019). Nanocellulose/bioactive glass cryogels as scaffolds for bone regeneration. *Nanoscale*, 11(42), 19842-19849.
- Fiedor, P., & Ortyl, J.** (2020). A new approach to micromachining: High-precision and innovative additive manufacturing solutions based on photopolymerization technology. *Materials*, 13(13), 2951.
- Fretwurst, T., Gad, L. M., Nelson, K., & Schmelzeisen, R.** (2015). Dentoalveolar reconstruction: modern approaches. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*, 23(4), 316-322.
- Gallo, P., & Díaz-Báez, D.** (2019). Management of 80 complications in vertical and horizontal ridge augmentation with nonresorbable membrane (d-PTFE): A cross-sectional study. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 34(4), 927-935.

- Gandhi, R., Salmi, M., Roy, B., Pagliari, L., & Concli, F.** (2025). Mechanical performance, fatigue behaviour, and biointegration of additively manufactured architected lattices. *Virtual and Physical Prototyping*, 20(1), e2530733.
- Gao, F., Zeng, Q., Wang, J., Liu, Z., & Liang, J.** (2022). Compressive properties and energy absorption of BCC lattice structures with bio-inspired gradient design. *Acta Mechanica Sinica*, 38(1), 421345.
- Gao, W., Sun, L., Zhang, Z., & Li, Z.** (2020). Cellulose nanocrystals reinforced gelatin/bioactive glass nanocomposite scaffolds for potential application in bone regeneration. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 31(8), 984-998.
- Gardner, D. J., Oporto, G. S., Mills, R., & Samir, M. A. S. A.** (2008). Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose. *Journal of adhesion science and technology*, 22(5-6), 545-567.
- Gašparovič, M., Jungová, P., Tomášik, J., Mriňáková, B., Hirjak, D., Timková, S., ... & Thurzo, A.** (2024). Evolving strategies and materials for scaffold development in regenerative dentistry. *Applied Sciences*, 14(6), 2270.
- Gauvin, R., Chen, Y. C., Lee, J. W., Soman, P., Zorlutuna, P., Nichol, J. W., ... & Khademhosseini, A.** (2012). Microfabrication of complex porous tissue engineering scaffolds using 3D projection stereolithography. *Biomaterials*, 33(15), 3824-3834.
- Ge, L., Dong, L., Wang, D., Ge, Q., & Gu, G.** (2018). A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 273, 285-292.
- Ghavidel, A., Mousavi, S. R., & Rashki, M.** (2018). The effect of FEM mesh density on the failure probability analysis of structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(7), 2370-2383.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M.** (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- Goyal, A., Rumaiz, A. K., Miao, Y., Hazra, S., Ni, C., & Shah, S. I.** (2008). Synthesis and characterization of TiO₂-Ge nanocomposites. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 26(4), 1315-1320.
- Guerra, A. J., Lara-Padilla, H., Becker, M. L., Rodriguez, C. A., & Dean, D.** (2019). Photopolymerizable resins for 3D-printing solid-cured tissue engineered implants. *Current drug targets*, 20(8), 823-838.
- Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A.** (2021). The state of the art of material jetting—a critical review. *Polymers*, 13(16), 2829.

- Gumrah Dumanli, A.** (2017). Nanocellulose and its composites for biomedical applications. *Current medicinal chemistry*, 24(5), 512-528.
- Guvendiren, M., Molde, J., Soares, R. M., & Kohn, J.** (2016). Designing biomaterials for 3D printing. *ACS biomaterials science & engineering*, 2(10), 1679-1693.
- Guzzi, E. A., & Tibbitt, M. W.** (2020). Additive manufacturing of precision biomaterials. *Advanced materials*, 32(13), 1901994.
- Hafilah, D., & Nandiyanto, A. B. D.** (2022). A Bibliometric Analysis of Nanocrystalline Cellulose Research as Medical Implant Using VOSviewer. *Jurnal Kedokteran Diponegoro (Diponegoro Medical Journal)*, 11(6), 285-292.
- Halib, N., Perrone, F., Cemazar, M., Dapas, B., Farra, R., Abrami, M., ... & Grassi, M.** (2017). Potential applications of nanocellulose-containing materials in the biomedical field. *Materials*, 10(8), 977.
- Han, X., Wang, J., Wang, X., Tian, W., Dong, Y., & Jiang, S.** (2022). Finite element analysis of strengthening mechanism of Ultrastrong and tough cellulosic materials. *Polymers*, 14(21), 4490.
- Hasan, A., Waibhaw, G., Saxena, V., & Pandey, L. M.** (2018). Nano-biocomposite scaffolds of chitosan, carboxymethyl cellulose and silver nanoparticle modified cellulose nanowhiskers for bone tissue engineering applications. *International journal of biological macromolecules*, 111, 923-934.
- Heinemann, F., Hasan, I., Bourauel, C., Biffar, R., & Mundt, T.** (2015). Bone stability around dental implants: Treatment related factors. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger*, 199, 3-8.
- Herrmann, K.** (2011). hardness Measurement of Plastics and elastomers. *Hardness Testing: Principles and Applications*, 119-165.
- Herzberg, R.** (2017). Vertical Guided Bone Regeneration for a Single Missing Tooth Span with Titanium-Reinforced d-PTFE Membranes: Clinical Considerations and Observations of 10 Consecutive Cases with up to 36 Months Follow-up. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 37(6).
- Hong, J. K., Cooke, S. L., Whittington, A. R., & Roman, M.** (2021). Bioactive cellulose nanocrystal-poly (ϵ -caprolactone) nanocomposites for bone tissue engineering applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 9, 605924.
- Hu, Q., Lu, G., & Tse, K. M.** (2024). Tensile Mechanical Behaviors of Re-entrant and Kelvin Cell Lattice Structures: Hu, Lu, and Tse. *Jom*, 76(1), 387-396.
- Huang, A.** (2024). Dynamic properties and microstructural development of FCC-based and BCC-based high-entropy alloys (Doctoral dissertation, University of California, San Diego).

- Huo, Y., Lu, Y., Meng, L., Wu, J., Gong, T., Zou, J. A., ... & Cheng, L.** (2021). A critical review on the design, manufacturing and assessment of the bone scaffold for large bone defects. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 753715.
- Husna, A., Ashrafi, S., Tomal, A. A., Tuli, N. T., & Rashid, A. B.** (2024). Recent advancements in stereolithography (SLA) and their optimization of process parameters for sustainable manufacturing. *Hybrid Advances*, 7, 100307.
- Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J.** (1991). Particulate reinforced metal matrix composites—a review. *Journal of materials science*, 26(5), 1137-1156.
- Ingole, V. H., Vuherer, T., Maver, U., Vinchurkar, A., Ghule, A. V., & Kokol, V.** (2019). Mechanical properties and cytotoxicity of differently structured nanocellulose-hydroxyapatite based composites for bone regeneration application. *Nanomaterials*, 10(1), 25.
- Iravani, S., & Varma, R. S.** (2022). Cellulose-based composites as scaffolds for tissue engineering: recent advances. *Molecules*, 27(24), 8830.
- Jeršovaitė, J., Šarachovaitė, U., Matulaitienė, I., Niaura, G., Baltriukienė, D., & Malinauskas, M.** (2023). Biocompatibility enhancement via post-processing of microporous scaffolds made by optical 3D printer. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 11, 1167753.
- Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., Espinosa, M. D. M., & Domínguez, M.** (2019). Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects. *Complexity*, 2019(1), 9656938.
- Jin, N., Wang, F., Wang, Y., Zhang, B., Cheng, H., & Zhang, H.** (2019). Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading. *Materials & Design*, 169, 107655.
- Karimian, A., Parsian, H., Majidinia, M., Rahimi, M., Mir, S. M., Kafil, H. S., ... & Yousefi, B.** (2019). Nanocrystalline cellulose: Preparation, physicochemical properties, and applications in drug delivery systems. *International journal of biological macromolecules*, 133, 850-859.
- Katz, M. S., Ooms, M., Heitzer, M., Peters, F., Winnand, P., Kniha, K., ... & Modabber, A.** (2021). Postoperative morbidity and complications in elderly patients after harvesting of iliac crest bone grafts. *Medicina*, 57(8), 759.
- Keijsers, E. R., Yilmaz, G., & van Dam, J. E.** (2013). The cellulose resource matrix. *Carbohydrate polymers*, 93(1), 9-21.
- Keshvardoostchokami, M., Majidi, M., Zamani, A., & Liu, B.** (2021). A review on the use of chitosan and chitosan derivatives as the bio-adsorbents for the water treatment: Removal of nitrogen-containing pollutants. *Carbohydrate polymers*, 273, 118625.

- Khalili, S. M. R., Najafi, M., & Eslami-Farsani, R.** (2017). Effect of thermal cycling on the tensile behavior of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers. *Mechanics of composite materials*, 52(6), 807-816.
- Khojasteh, A., Kheiri, L., Motamedian, S. R., & Khoshkam, V.** (2017). Guided bone regeneration for the reconstruction of alveolar bone defects. *Annals of maxillofacial surgery*, 7(2), 263-277.
- Kim, H., Lin, Y., & Tseng, T. L. B.** (2018). A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 645-669.
- Kreide, C., Koricho, E., & Kardel, K.** (2024). Energy absorption of 3D printed multi-material elastic lattice structures. *Progress in Additive Manufacturing*, 9(6), 1653-1655.
- Kuhlmann-Wilsdorf, D.** (1989). Theory of plastic deformation:-properties of low energy dislocation structures. *Materials Science and Engineering: A*, 113, 1-41.
- Kumar, K., Zindani, D., & Davim, J. P.** (2020). Rapid prototyping, rapid tooling and reverse engineering: from biological models to 3D Bioprinters (Vol. 5). Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Kumar, M. B., Sathiya, P., & Varatharajulu, M.** (2021). Selective laser sintering. In *Advances in additive manufacturing processes* (pp. 28-47). Bentham Science Publishers.
- Lang, N. P., & Lindhe, J. (Eds.).** (2015). *Clinical periodontology and implant dentistry*, 2 Volume Set. John Wiley & Sons.
- Larnøy, E., Eikenes, M., & Militz, H.** (2011). Detection of chlorine-labelled chitosan in Scots pine by energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Wood science and technology*, 45(1), 103-110.
- Lecuit, T., & Lenne, P. F.** (2007). Cell surface mechanics and the control of cell shape, tissue patterns and morphogenesis. *Nature reviews Molecular cell biology*, 8(8), 633-644.
- Lee, K. W., Lee, S. H., Noh, K. H., Park, J. Y., Cho, Y. J., & Kim, S. H.** (2019). Theoretical and numerical analysis of the mechanical responses of BCC and FCC lattice structures. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(5), 2259-2266.
- LeGeros, R. Z.** (2008). Calcium phosphate-based osteoinductive materials. *Chemical reviews*, 108(11), 4742-4753.
- Li, C., Feng, C., Zhang, L., Shan, J., & Shi, M.** (2024). A review of the effect of hydrothermal aging on the mechanical properties of 2D fiber-reinforced resin matrix composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 35(1), e6239.
- Li, H., Zhou, J., Ao, S., & Zhao, J.** (2024). Cellulose nanocrystals/fluorinated polyacrylate with mechanical tunability, water-oil resistance and self-healing capability via light actuated reversible associations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 687, 133516.

- Liu, H., Gu, D., Yang, J., Shi, K., & Yuan, L.** (2022). Laser powder bed fusion of node-reinforced hybrid lattice structure inspired by crystal microstructure: structural feature sensitivity and mechanical performance. *Materials Science and Engineering: A*, 858, 144048.
- Liu, J., & Kerns, D. G.** (2014). Mechanisms of guided bone regeneration: a review. *The open dentistry journal*, 8, 56.
- Liu, R., Chen, W., & Zhao, J.** (2024). A review on factors affecting the mechanical properties of additively-manufactured lattice structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(10), 4685-4711.
- Liu, Y., Zhang, J., Gu, X., Zhou, Y., Yin, Y., Tan, Q., ... & Zhang, M. X.** (2020). Mechanical performance of a node reinforced body-centred cubic lattice structure manufactured via selective laser melting. *Scripta Materialia*, 189, 95-100.
- Loh, Q. L., & Choong, C.** (2013). Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: role of porosity and pore size. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 19(6).
- Łopianiak, I., Butruk-Raszeja, B., & Wojasiński, M.** (2025). Shore hardness of bulk polyurethane affects the properties of nanofibrous materials differently. *journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 161, 106793.
- Lu, H. H., El-Amin, S. F., Scott, K. D., & Laurencin, C. T.** (2003). Three-dimensional, bioactive, biodegradable, polymer–bioactive glass composite scaffolds with improved mechanical properties support collagen synthesis and mineralization of human osteoblast-like cells in vitro. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 64(3), 465-474.
- Lu, T., Li, Y., & Chen, T.** (2013). Techniques for fabrication and construction of three-dimensional scaffolds for tissue engineering. *International journal of nanomedicine*, 337-350.
- Ma, Y., Chai, X., Bao, H., Huang, Y., & Dong, W.** (2023). Study on nanocellulose isolated from waste chilli stems processing as dietary fiber in biscuits. *Plos one*, 18(1), e0281142.
- Madihally, S. V., & Matthew, H. W.** (1999). Porous chitosan scaffolds for tissue engineering. *Biomaterials*, 20(12), 1133-1142.
- Mahmoud, D., & Elbestawi, M. A.** (2017). Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review. *Journal of Manufacturing and materials Processing*, 1(2), 13.
- Malevez, C., Daelemans, P., Adriaenssens, P., & Durdu, F.** (2003). Use of zygomatic implants to deal with resorbed posterior maxillae. *Periodontology 2000*, 33(1).
- Marti, A.** (2000). Cobalt-base alloys used in bone surgery. *Injury*, 31, D18-D21.

- McAllister, B. S., & Gaffaney, T. E.** (2003). Distraction osteogenesis for vertical bone augmentation prior to oral implant reconstruction. *Periodontology* 2000, 33(1).
- McAllister, B. S., & Haghighat, K.** (2007). Bone augmentation techniques. *Journal of periodontology*, 78(3), 377-396.
- Meththananda, I. M., Parker, S., Patel, M. P., & Braden, M.** (2009). The relationship between Shore hardness of elastomeric dental materials and Young's modulus. *Dental materials*, 25(8), 956-959.
- Mirtaghavi, A., Baldwin, A., Tanideh, N., Zarei, M., Muthuraj, R., Cao, Y., ... & Luo, J.** (2020). Crosslinked porous three-dimensional cellulose nanofibers-gelatine biocomposite scaffolds for tissue regeneration. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1949-1959.
- Modulevsky, D. J., Cuerrier, C. M., & Pelling, A. E.** (2016). Biocompatibility of subcutaneously implanted plant-derived cellulose biomaterials. *PloS one*, 11(6), e0157894.
- Mohan, D., Teong, Z. K., Bakir, A. N., Sajab, M. S., & Kaco, H.** (2020). Extending cellulose-based polymers application in additive manufacturing technology: A review of recent approaches. *Polymers*, 12(9), 1876.
- Mohit, H., & Arul Mozhi Selvan, V.** (2018). A comprehensive review on surface modification, structure interface and bonding mechanism of plant cellulose fiber reinforced polymer based composites. *Composite Interfaces*, 25(5-7), 629-667.
- Montanheiro, T. L. D. A., Schatkoski, V. M., de Menezes, B. R. C., Pereira, R. M., & Ribas, R. G.** (2022). Recent progress on polymer scaffolds production: Methods, main results, advantages and disadvantages. *Express Polymer Letters*, 16(2), 197-219.
- Murizan, N. I. S., Mustafa, N. S., Ngadiman, N. H. A., Mohd Yusof, N., & Idris, A.** (2020). Review on nanocrystalline cellulose in bone tissue engineering applications. *Polymers*, 12(12), 2818.
- Mustafa, A., Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., & Al-Mufadi, F. A.** (2022). Shore hardness characterization of FDM printed PLA/Epoxy/MGFs composite material structure. In *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems: Select Proceedings of RAM 2021* (pp. 919-926). Singapore: Springer Nature Singapore.
- N'gatta, K. M., Belaid, H., El Hayek, J., Assanvo, E. F., Kajdan, M., Masquelez, N., ... & Salameh, C.** (2022). 3D printing of cellulose nanocrystals based composites to build robust biomimetic scaffolds for bone tissue engineering. *Scientific Reports*, 12(1), 21244.
- Naenni, N., Lim, H. C., Papageorgiou, S. N., & Hämmerle, C. H.** (2019). Efficacy of lateral bone augmentation prior to implant placement: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Periodontology*, 46, 287-306.

- Nappe, C. E., Rezuc, A. B., Montecinos, A., Donoso, F. A., Vergara, A. J., & Martinez, B. (2016).** Histological comparison of an allograft, a xenograft and alloplastic graft as bone substitute materials. *Journal of Osseointegration*, 8(2), 20-26.
- Oakdale, J. S., Ye, J., Smith, W. L., & Biener, J. (2016).** Post-print UV curing method for improving the mechanical properties of prototypes derived from two-photon lithography. *Optics express*, 24(24), 27077-27086.
- Ornaghi Jr, H. L., Monticeli, F. M., & Agnol, L. D. (2023).** A review on polymers for biomedical applications on hard and soft tissues and prosthetic limbs. *Polymers*, 15(19), 4034.
- Paderni, S., Terzi, S., & Amendola, L. (2009).** Major bone defect treatment with an osteoconductive bone substitute. *Musculoskeletal Surgery*, 93(2), 89-96.
- Palaganas, N. B., Mangadlao, J. D., de Leon, A. C. C., Palaganas, J. O., Pangilinan, K. D., Lee, Y. J., & Advincula, R. C. (2017).** 3D printing of photocurable cellulose nanocrystal composite for fabrication of complex architectures via stereolithography. *ACS applied materials & interfaces*, 9(39), 34314-34324.
- Palucci Rosa, R., Rosace, G., Arrigo, R., & Malucelli, G. (2022).** Preparation and characterization of 3D-printed biobased composites containing micro-or nanocrystalline cellulose. *Polymers*, 14(9), 1886.
- Patil, T. V., Patel, D. K., Dutta, S. D., Ganguly, K., Santra, T. S., & Lim, K. T. (2022).** Nanocellulose, a versatile platform: From the delivery of active molecules to tissue engineering applications. *Bioactive materials*, 9, 566-589.
- Peng, C., Tran, P., Nguyen-Xuan, H., & Ferreira, A. J. M. (2020).** Mechanical performance and fatigue life prediction of lattice structures: Parametric computational approach. *Composite Structures*, 235, 111821.
- Peng, Y., Gardner, D. J., & Han, Y. (2015).** Characterization of mechanical and morphological properties of cellulose reinforced polyamide 6 composites. *Cellulose*, 22(5), 3199-3215.
- Piasecka-Zelga, J., Zelga, P., Gronkowska, K., Madalski, J., Szulc, J., Wietecha, J., ... & Dziuba, R. (2021).** Toxicological and sensitization studies of novel vascular prostheses made of bacterial nanocellulose modified with chitosan (MBC) for application as the tissue-engineered blood vessels. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*, 7(2), 218-233.
- Poothanari, M. A., Schreier, A., Missoum, K., Bras, J., & Leterrier, Y. (2022).** Photocured nanocellulose composites: recent advances. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(10), 3131-3149.
- Qi, H. J., Joyce, K., & Boyce, M. C. (2003).** Durometer hardness and the stress-strain behavior of elastomeric materials. *Rubber chemistry and technology*, 76(2), 419-435.

- Raheem, D., & Majid, Z.** (2020). Polymethyl Methacrylate-Collagen-Magnesium hydroxyapatite bone cement Preparation for orthopedic application. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 29(3), 18-23.
- Rahimi, S., & Asghari, M.** (2025). Design and evaluation of two proposed hybrid FCC-BCC lattice structures for enhanced mechanical performance. *Heliyon*, 11(1).
- Rajan, K., Samykano, M., Kadirgama, K., Harun, W. S. W., & Rahman, M. M.** (2022). Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3), 1531-1570.
- Ramamoorthy, S. K., Skrifvars, M., & Persson, A.** (2015). A review of natural fibers used in biocomposites: Plant, animal and regenerated cellulose fibers. *Polymer reviews*, 55(1), 107-162.
- Rammerstorfer, F.** (2018). Buckling of elastic structures under tensile loads. *Acta Mechanica*, 229(2), 881-900.
- Reddy, B. V. S., Kumar, D. A., C. C. S., Suryakumar, S., Rahman, A. H., & Kumar, J. R.** (2025). Machine learning-based prediction of high-strain-rate response in additively manufactured lattice structures using split hopkinson pressure bar experiments. *Advanced Engineering Materials*, 27(20), 2501406.
- Reddy, M. S. B., Ponnammam, D., Choudhary, R., & Sadasivuni, K. K.** (2021). A comparative review of natural and synthetic biopolymer composite scaffolds. *Polymers*, 13(7), 1105.
- Reininger, D., Cobo-Vázquez, C., Monteserín-Matesanz, M., & López-Quiles, J.** (2016). Complications in the use of the mandibular body, ramus and symphysis as donor sites in bone graft surgery. A systematic review. *Medicina oral, patologia oral y cirugía bucal*, 21(2), e241.
- Retzepi, M. A. R. I., & Donos, N.** (2010). Guided bone regeneration: biological principle and therapeutic applications. *Clinical oral implants research*, 21(6), 567-576.
- Rezaie, F., Farshbaf, M., Dahri, M., Masjedi, M., Maleki, R., Amini, F., ... & Tayebi, L.** (2023). 3D printing of dental prostheses: Current and emerging applications. *Journal of composites science*, 7(2), 80.
- Rider, P., Kačarevič, Ž. P., Alkildani, S., Retnasingh, S., Schnettler, R., & Barbeck, M.** (2018). Additive manufacturing for guided bone regeneration: A perspective for alveolar ridge augmentation. *International journal of molecular sciences*, 19(11), 3308.
- Rinaudo, M.** (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in polymer science*, 31(7), 603-632.
- Ronda, M., Rebaudi, A., Torelli, L., & Stacchi, C.** (2014). Expanded vs. dense polytetrafluoroethylene membranes in vertical ridge augmentation around dental implants: a prospective randomized controlled clinical trial. *Clinical oral implants research*, 25(7), 859-866.

- Rozis, M., Polyzois, V., & Pneumaticos, S.** (2021). The distraction osteogenesis callus: a review of the literature. *Clinical Reviews in Bone and Mineral Metabolism*, 19(1), 24-35.
- Saha, R. K., Rahman, M. M., Islam, M. T., Mumin, M. M., & Ray, N. C.** (2026). Investigating the impact of layer thickness and print orientation on strength and structural integrity of SLA 3D printed composites. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 9(2), 165-181.
- Sakkas, A., Wilde, F., Heufelder, M., Winter, K., & Schramm, A.** (2017). Autogenous bone grafts in oral implantology—is it still a “gold standard”? A consecutive review of 279 patients with 456 clinical procedures. *International journal of implant dentistry*, 3(1), 23.
- Sallent, I., Capella-Monsonís, H., Procter, P., Bozo, I. Y., Deev, R. V., Zubov, D., ... & Zeugolis, D. I.** (2020). The few who made it: commercially and clinically successful innovative bone grafts. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 952.
- Sanas, M. M., & Mulay, A. V.** (2022). Evaluating biological behavior of Kelvin cellular bone scaffold. *Materials Today: Proceedings*, 62, 32-36.
- Sangid, M. D.** (2013). The physics of fatigue crack initiation. *International journal of fatigue*, 57, 58-72.
- Schneider, M., Günter, C., & Taubert, A.** (2018). Co-deposition of a hydrogel/calcium phosphate hybrid layer on 3D printed poly (lactic acid) scaffolds via dip coating: Towards automated biomaterials fabrication. *Polymers*, 10(3), 275.
- Schorn, L., Fienitz, T., Berndsen, K., Kübler, N. R., Holtmann, H., & Rothamel, D.** (2021). The use of solvent-preserved human and bovine cancellous bone blocks for lateral defect augmentation-an experimental controlled study in vivo. *Head & Face Medicine*, 17(1), 21.
- Schropp, L., Wenzel, A., Kostopoulos, L., & Karring, T.** (2003). Bone healing and soft tissue contour changes following single-tooth extraction: a clinical and radiographic 12-month prospective study. *International journal of periodontics & restorative dentistry*, 23(4).
- Schwartz-Arad, D., Levin, L., & Sigal, L.** (2005). Surgical success of intraoral autogenous block onlay bone grafting for alveolar ridge augmentation. *Implant dentistry*, 14(2), 131-138.
- Semakina, O. K., Phomenko, A. N., Leonteva, A. A., & Rymanova, I. E.** (2015). Research of surface properties of fillers for polymers. *Procedia Chemistry*, 15, 79-83.
- Sethi, A., Kaus, T., Cawood, J. I., Plaha, H., Boscoe, M., & Sochor, P.** (2020). Onlay bone grafts from iliac crest: a retrospective analysis. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 49(2), 264-271.
- Sharma, S., Acharya, A. D., & Bhawna.** (2023). Fabrication of Exfoliated BiOCl-Based PMMA Nanocomposite with Enhanced Structural and Thermal Properties. *Brazilian Journal of Physics*, 53(3), 67.

- Sharma, S., Srivastava, D., Grover, S., & Sharma, V.** (2014). Biomaterials in tooth tissue engineering: a review. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR*, 8(1), 309.
- Sheikh, Z., Hamdan, N., Ikeda, Y., Grynpas, M., Ganss, B., & Glogauer, M.** (2017). Natural graft tissues and synthetic biomaterials for periodontal and alveolar bone reconstructive applications: a review. *Biomaterials research*, 21(1), 9.
- Smith, M., Guan, Z. W., & Cantwell, W. J.** (2013). Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 28-41.
- Starch-Jensen, T., Deluiz, D., & Tinoco, E. M. B.** (2020). Horizontal alveolar ridge augmentation with allogeneic bone block graft compared with autogenous bone block graft: a systematic review. *Journal of oral & maxillofacial research*, 11(1), e1.
- Stuart, C. H., Schwartz, S. A., Beeson, T. J., & Owatz, C. B.** (2006). *Enterococcus faecalis*: its role in root canal treatment failure and current concepts in retreatment. *Journal of endodontics*, 32(2), 93-98.
- Suksawang, B., Chaijareenont, P., & Silthampitag, P.** (2025). Effect of Unit Cell Design and Volume Fraction of 3D-Printed Lattice Structures on Compressive Response and Orthopedics Screw Pullout Strength. *Materials*, 18(6), 1349.
- Sun, Y., Zhang, H., Li, Q., Vardhanabhuti, B., & Wan, C.** (2022). High lignin-containing nanocelluloses prepared via TEMPO-mediated oxidation and polyethylenimine functionalization for antioxidant and antibacterial applications. *RSC advances*, 12(46), 30030-30040.
- Suresh, S. S., Mohanty, S., & Nayak, S. K.** (2017). Investigation into the mechanical and thermal properties of poly (methyl methacrylate) recovered from light guidance panels with a focus on future remanufacturing and sustainable waste management. *Journal of Remanufacturing*, 7(2), 217-233.
- Szczęśniak, L., Rachocki, A., & Tritt-Goc, J.** (2008). Glass transition temperature and thermal decomposition of cellulose powder. *Cellulose*, 15(3), 445-451.
- Tancogne-Dejean, T., Diamantopoulou, M., Gorji, M. B., Bonatti, C., & Mohr, D.** (2018). 3D plate-lattices: an emerging class of low-density metamaterial exhibiting optimal isotropic stiffness. *Advanced Materials*, 30(45), 1803334.
- Tao, W., & Leu, M. C.** (2016, August). Design of lattice structure for additive manufacturing. In 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA) (pp. 325-332). IEEE.
- Tarrahi, R., Khataee, A., Karimi, A., & Yoon, Y.** (2022). The latest achievements in plant cellulose-based biomaterials for tissue engineering focusing on skin repair. *Chemosphere*, 288, 132529.

- Telfer, S., Pallari, J., Munguia, J., Dalgarno, K., McGeough, M., & Woodburn, J.** (2012). Embracing additive manufacture: implications for foot and ankle orthosis design. *BMC musculoskeletal disorders*, 13(1), 84.
- Temiz, A., Pehlivan, F., Öztürk, F. H., & Demir, S.** (2024). Compression behavior of sheet-network triply periodic minimal surface metamaterials as a function of density grading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 43(23-24), 1430-1443.
- Tortorella, S., Vetri Buratti, V., Maturi, M., Sambri, L., Comes Franchini, M., & Locatelli, E.** (2020). Surface-modified nanocellulose for application in biomedical engineering and nanomedicine: A review. *International journal of nanomedicine*, 9909-9937.
- Tosun, E., Akkocaoğlu, M., Tüz, H. H., Avağ, C., & Göktürk, T.** (2019). Complications associated with anterior iliac bone grafting for the reconstruction of dentoalveolar defects. *Journal of Craniofacial Surgery*, 30(4), 980-984.
- Tripathi, G., Park, M., & Lee, B. T.** (2022). Physical and in-vitro biological evaluations of plant based nano cellulose loaded injectable bone substitutes. *Materials Technology*, 37(11), 1742-1754.
- Tsolakis, I. A., Papaioannou, W., Papadopoulou, E., Dalampira, M., & Tsolakis, A. I.** (2022). Comparison in terms of accuracy between DLP and LCD printing technology for dental model printing. *Dentistry journal*, 10(10), 181.
- Udroiu, R., Braga, I. C., & Nedelcu, A.** (2019). Evaluating the quality surface performance of additive manufacturing systems: Methodology and a material jetting case study. *Materials*, 12(6), 995.
- Unlu, F., Boran, F., Yesilada, O., & Koytepe, S.** (2023). Laccase immobilization on bacterial cellulose produced in a mulberry pomace waste extract medium: Characterization and use for dye decolorization. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(24), e53952.
- Valls-Esteve, A., Lustig-Gainza, P., Adell-Gomez, N., Tejo-Otero, A., Engli-Rueda, M., Julian-Alvarez, E., ... & Munuera, J.** (2023). A state-of-the-art guide about the effects of sterilization processes on 3D-printed materials for surgical planning and medical applications: A comparative study. *International journal of bioprinting*, 9(5), 756.
- Venkatesan, J., & Kim, S. K.** (2010). Chitosan composites for bone tissue engineering—an overview. *Marine drugs*, 8(8), 2252-2266.
- Vian, W. D., & Denton, N. L.** (2018). Hardness comparison of polymer specimens produced with different processes.
- Waasdorp, J., & Reynolds, M. A.** (2010). Allogeneic bone onlay grafts for alveolar ridge augmentation: a systematic review. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 25(3).

- Wang, X., Li, X., Li, Z., Wang, Z., & Zhai, W.** (2024). A ribbed strategy disrupts conventional metamaterial deformation mechanisms for superior energy absorption. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1), e2337310.
- Wismans, I. J., van Dommelen, I. J., & Geers, I. M.** (2011). Microstructural modeling of the mechanical behavior of open-cell polyurethane foams. *Mechanics of Materials*.
- Wohlert, M., Benselfelt, T., Wågberg, L., Furó, I., Berglund, L. A., & Wohlert, J.** (2022). Cellulose and the role of hydrogen bonds: not in charge of everything. *Cellulose*, 29(1), 1-23.
- Wunderlich, B.** (2005). *Thermal analysis of polymeric materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Xu, T., Wang, C., Han, Z., & Wang, Y.** (2022). Chitosan-derived N-doped porous carbon with enhanced nitrogen concentration and tailored nitrogen configuration. *Journal of Materials Science*, 57(19), 8739-8751.
- Xu, W., Zhu, Y., Ravichandran, D., Jambhulkar, S., Kakarla, M., Bawareth, M., ... & Song, K.** (2021). Review of fiber-based three-dimensional printing for applications ranging from nanoscale nanoparticle alignment to macroscale patterning. *ACS Applied Nano Materials*, 4(8), 7538-7562.
- Yaman, Z., & Suer, B. T.** (2013). Piezoelectric surgery in oral and maxillofacial surgery. *Ann Oral Maxillofac Surg*, 1(1), 5.
- Yang, C., Jin, K., Yan, X., Zhang, X., Zhao, M., & Zhi, Z.** (2025). Body-centered cubic lattices composed of elliptical struts for superior mechanical properties and energy absorption. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-13.
- Yi, T., Zhao, H., Mo, Q., Pan, D., Liu, Y., Huang, L., ... & Song, H.** (2020). From cellulose to cellulose nanofibrils—a comprehensive review of the preparation and modification of cellulose nanofibrils. *Materials*, 13(22), 5062.
- Yoshidome, K., Torii, M., Kawamura, N., Shimpo, H., & Ohkubo, C.** (2021). Trueness and fitting accuracy of maxillary 3D printed complete dentures. *Journal of prosthodontic research*, 65(4), 559-564.
- Zhang, J., Hu, Q., Wang, S., Tao, J., & Gou, M.** (2019). Digital light processing based three-dimensional printing for medical applications. *International journal of bioprinting*, 6(1), 242.
- Zhang, M., Shang, J., Guo, S., Hur, B., & Yue, X.** (2020). Numerical investigation of effective thermal conductivity of strut-based cellular structures designed by spatial Voronoi tessellation. *Materials*, 14(1), 138.
- Zhang, X. Y., Chen, Y. P., Han, J., Mo, J., Dong, P. F., Zhuo, Y. H., & Feng, Y.** (2019). Biocompatible silk fibroin/carboxymethyl chitosan/strontium substituted hydroxyapatite/cellulose

- nanocrystal composite scaffolds for bone tissue engineering. *International journal of biological macromolecules*, 136, 1247-1257.
- Zhang, Z. C., Li, P. L., Chu, F. T., & Shen, G.** (2019). Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie*, 80(4), 194-204.
- Zhao, M., Liu, F., Fu, G., Zhang, D. Z., Zhang, T., & Zhou, H.** (2018). Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces fabricated by SLM. *Materials*, 11(12), 2411.
- Zhao, R., Yang, R., Cooper, P. R., Khurshid, Z., Shavandi, A., & Ratnayake, J.** (2021). Bone grafts and substitutes in dentistry: a review of current trends and developments. *Molecules*, 26(10), 3007.
- Zhao, X., Wang, X., & Shang, Y.** (2025). Mechanical properties and energy absorption characteristics of a combined gradient BCC lattice structure: A numerical study. *Materials*, 18(15), 3652.
- Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., ... & Bernat, J.** (2024). Additive manufacturing: a comprehensive review. *Sensors*, 24(9), 2668.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Özgün Ceren AKBAY

Eğitim Bilgileri

- **Lisans:**2009-2015,Gaziantep Üniversitesi,Mühendislik Fakültesi,Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans:** 2019-2021,İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı
- **Doktora:** 2022-2026,İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Akademik Çalışmalar

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- Akbay, Ö. C., Bahçe, E., Uysal, A., & Gezer, I. (2022). Production and cleaning of lattice structures used in the space and aerospace industry with metal additive manufacturing method. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(8), 6310-6321.
- Akbay, Ö. C., Özdemir, B., Bahçe, E., Emir, E., & Uslu Uysal, M. (2024). Mechanical characterization of lattice structure produced by additive manufacturing under torsion and compression. *Journal of Cellular Plastics*, 60(1), 3-22.
- Akbay, Ö. C., Özdemir, B., Bahçe, E., & Emir, E. (2023). Deformation behaviors investigation of CoCr alloy lattice structures under compression test. *Journal of Manufacturing Engineering*, 18[1], 001-010.
- Akbay, Ö. C., & Bahçe, E. (2024). Investigation of mechanical performance of hybrid design porous structures manufactured from CoCr Alloy. *Progress in Additive Manufacturing*, 1-16.
- Akbay, Ö. C., Bahce, E., & Ölmez, C. (2022). Investigation of Mechanical Behavior of Scaffolding Structures Produced Using CoCr Alloy by Selective Laser Melting Method. *Icontech International Journal*, 6(2), 18-26.
- Akbay, Ö. C., Bahçe, E., Köytepe, S., Kanmaz, H., & Hayaloğlu, A. A. (2025). Production of natural source nanocrystalline cellulose and performance comparison with industrial cellulose. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanomaterials, Nanoengineering and Nanosystems*, 23977914251397585.
- Akbay, Ö. C., Bahce, E.(2026). Investigation of the Effect of Unit Cell Type on the Mechanical Properties of Lattice Structures by Dynamic Point Tracking. *Journal of Materials Engineering and Performance*.

- **Uzunyol, Ö. F., Akbay, Ö. C., & Bahçe, E.** (2026). Effect of relative density and strut thickness on dimensional accuracy in lattice structures produced by additive manufacturing. *Journal of Cellular Plastics*, 0021955X261442906.
- **Akbay, Ö. C., Bahçe, E., Gürses, C., & Köytepe, S.** (2026). 3D printed biocompatible functionally graded cellulose-reinforced polymer scaffolds with varying unit cell architectures: evaluation of L-929 cell proliferation and morphology. *Journal of Polymer Research*, 33(4), 168.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- **Akbay, Ö. C., Özdemir, B., Bahçe, E., & Oymak, M. A.** Karbon fiber kaplamalı tpms kafes yapılarının basma testi analizi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 16(1), 177-184.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- **TPMS Tabanlı Gyroid Kafeslerin Reçine Dolgulu Yapılarında Mekanik Dayanımın Değerlendirilmesi**, 2. International Conference on Modern and Advanced Research ICMAR 2025
- **Selülozun Saflaştırılması ve İmplantlarda Potansiyel Uygulamaları**, 5th International Conference on Innovative Academic Studies
- **SLM Metodu ile CoCr Alaşımı Kullanılarak Üretilen Dental İmplantlarda SEM, EDX ve DTA Analizi**, 2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies
- **Fonksiyonel Derecelendirilmiş TPMS Bazlı Gyroid Kafes Yapısının Eklemeli İmalat ile Üretilirliğinin Nümerik Analiz ile İncelenmesi**, 3rd International Conference on Scientific and Academic Research
- **Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Kafes Yapılarda Dikme Geometrisi Değişiminin Basma Testi Altında İncelenmesi**, 10. Uluslararası Mardin Artuklu Bilimsel Araştırmalar Kongresi
- **Corrosion Behavior of CoCrMo Alloy in Dental Implants**, 5. International Göbeklitepe Scientific Studies Congress
- **Eklemeli İmalat İle ABS Kullanılarak Üretilmiş Modellerde Aseton Buharı İle Temizlemenin Yüzey Parlatmaya Etkisi**, 4. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi
- **Seçici Lazer Ergitme Metodu ile CoCr Alaşımı Kullanılarak Üretilen İskele Yapılarının Mekanik Davranışlarının İncelenmesi**, 3rd INTERNATIONAL MODERN SCIENTIFIC RESEARCH CONGRESS held on May 06-08, 2022 / Istanbul Gedik University, Istanbul, Turkey
- **Eklemeli İmalat Metodu İle Üretilen Gözenekli Yapıların Üretimi Ve Karakterizasyonu**, 4. International Symposium On Current Developments In Science, Technology And Social

Sciences April 12-13, 2021 / Gaziantep, Turkey

- **Eklemeli İmalat İle Üretilen Gözenekli Yapılar Ve Geometrik Kusurlar**, 4. International Symposium On Current Developments In Science, Technology And Social Sciences April 12-13, 2021 / Gaziantep, Turkey
- **Kübik Hacim Merkezli Yapı İskeleli Kalça Protezinin Yürüme Anındaki Biyomekanik Performansının Sonlu Elemanlar Analizi İle İncelenmesi**, 2. Uluslararası GAP Matematik - Mühendislik - Fen Ve Sağlık Bilimleri Kongresi 21-23 Haziran 2019 Adıyaman, Türkiye
- **Hap Kaplanmış Matkap İle Kemik Delinmesinin Deneysel İncelenmesi**, ISPEC Uluslararası Mühendislik Ve Fen Bilimler Kongresi.

Proje bilgileri

- **TÜBİTAK Tarafından Desteklenen Proje Bilgisi** 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programı-Bursiyer (2024-2026)

Proje No:118C250
Climate change effects on trophic structure and dynamics in saline and brackish water based on a space-for time field sampling, controlled mesocosm experiments,paleoecology, remote sensing and modelling (CLIMSALT LAKES)(2023-2024) Araştırmacı
- **BİÇABA-Birlikte Çalışıp Birlikte Başaracağız Burs Programı** Etkinlik Destekleri ve Eğitim Bursları Müdürlüğü, 2250-Lisansüstü Bursları Performans Programı, (2023-2024) Bursiyer
- **TÜSEB 2025-B-01-47203** Proje adı: Alveolar kemiğin ogmentasyonunda defekte özgü, biyomimetik ve vidalanabilen nanokristalin selüloz osteokonduktif blok greftin 3b üretilmesi, yüzey kaplamaları ile osteoindüktif ve antibakteriyel özellik kazandırılması ve deneysel oluşturulan tavşan calvarial defektlerinde uygulanması-Araştırmacı

- **BAP Tarafından Desteklenen**
Proje Bilgisi

Proje no: FYL-2021-2400

Kalça protezlerinde fonksiyonel derecelendirilmiş
iskele yapıların uygulanması ve özelliklerinin
belirlenmesi –Araştırmacı.

