



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**MXENE (Tİ3C2TX) İLE MODİFİYE BAKTERİYEL
SELÜLOZ NANO KOMPOZİT DOKU İSKELESİ
ÜRETİMİ: BİYOLOJİK DAVRANIŞLARIN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SALIHA NUR İLHAN

İSTANBUL, 2024



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**MXENE (Tİ3C2TX) İLE MODİFİYE BAKTERİYEL
SELÜLOZ NANO KOMPOZİT DOKU İSKELESİ ÜRETİMİ:
BİYOLOJİK DAVRANIŞLARIN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SALIHA NUR İLHAN
(220231004)**

**Danışman
(Dr. Öğr. Üyesi Fatih Çiftçi)**

İSTANBUL, 2024

02/07/2024

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı Biyomedikal Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans programı öğrencisi 220231004 numaralı Saliha Nur İLHAN'ın hazırladığı "Transdermal İlaç Dağıtımını Test Etmek İçin Yeniden Yapılandırılmış İnsan Epidermisinin Çip Üzerinde İn Vitro Modellemesi" konulu Yüksek Lisans/Doktora/Sanatta Yeterlik tezi ile ilgili Tez Savunma Sınavı, 02/07/2024 Salı günü saat 14:00'da yapılmış, sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin **Kabulüne Oy Çekilme/Oy Birliği** ile karar verilmiştir.

Tez adı değişikliği yapılmaması halinde: Tez adının (MXene (Ti3C2Tx) ile Modifiye Bakteriyel Selüloz Nano Kompozit Doku İskelesi Üretimi: Biyolojik Davranışların İncelenmesi) şeklinde değiştirilmesi uygundur.

Jüri Üyesi	Karar
1. Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇİFTÇİ (Danışman)	Kabul
2. Doç. Dr. Gökhan ÖZER	Kabul
3. Dr. Öğr. Üyesi Nilüfer DUYGULU	Kabul
4.
5.
6. (İkinci Danışman)*.....

*2. Danışman varsa doldurulması gerekmektedir.

ETİK BİLDİRİM

Bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bağlı olduğum üniversite veya bir başka üniversitedeki başka bir çalışma olarak sunulmadığını beyan ederim.

Saliha Nur İlhan

TEŞEKKÜR

Emek, tecrübe ve fedakârlık bekleyen yüksek lisans eğitimim ve tez yazma sürecinde, kapısını her çaldığımda elim boş dönmediğim, fikriyle ufkumu açan ve desteğini üzerimden çekmeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇİFTÇİ 'ye içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Bu tezin şekillenmesinde onun değerli rehberliği büyük önem taşıdı. Bilgisi ve yönlendirmesi sadece çalışmamı kolaylaştırmakla kalmadı, aynı zamanda öğrenme tutkumu da artırdı. Bu vesileyle, lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen tüm hocalarıma, fikir alışverişinde bulunduğum ve motivasyon kaynağı olan arkadaşlarıma ve akrabalarıma çok teşekkür ediyorum.

En büyük teşekkür ise, maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan, gölgelerini bir an bile eksik hissettirmeyen babam Osman İlhan'a ve annem Safiye İlhan'a, çabalamam için motivasyon kaynağım olan kardeşlerime. Verdikleri teşvik ve destek için minnettarım. İnançları ve sevgileri hayatımın temelini oluşturdu. Onların fedakârlıkları ve sevgileri tüm hedeflerimin yolunu aydınlattı.

Saliha Nur İlhan

MXENE (Ti₃C₂T_x) İLE MODİFİYE BAKTERİYEL SELÜLOZ NANO KOMPOZİT DOKU İSKELESİ ÜRETİMİ: BİYOLOJİK DAVRANIŞLARIN İNCELENMESİ

Saliha Nur İlhan

ÖZET

Bu tezde, modifiye bakteriyel selüloz (rBS) ve Ti₃C₂T_x-MXene esaslı modifiye hidrojellerin sentezi ve karakterizasyonu detaylı olarak incelenmiştir. İlk olarak, Ti₃AlC₂'in HF ile işlenmesi sonucunda elde edilen Ti₃C₂T_x-MXene ve *Gluconacetobacter xylinum* bakterisi ile üretilen BS peliküllerinin sentezi gerçekleştirilmiştir. Ardından, rBS ve rBS/MXene kompozit hidrojeller başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Oluşan hidrojellerin kristalografisi, yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, termal stabilitesi, elektriksel iletkenliği, hidrofilik özelliği, su emme kapasitesi, biyolojik uyumluluk ve hücresel davranışları ayrıntılı olarak test edilmiştir. XRD analizi Ti₃C₂T_x-MXene ve rBS tabanlı hidrojellerin kristalografik yapılarını göstermiş, XPS analizi Ti₃C₂T_x-MXene'nin başarılı sentezini doğrulamıştır. FTIR analizi hidrojellerin kimyasal bileşimini ve etkileşimlerini belirlemiştir. Mekanik testler dayanıklılık ve elastikiyeti değerlendirmiş, TGA analizi ise termal stabiliteyi değerlendirmiştir. MXene ile modifiye edilmiş bakteriyel selüloz nanokompozit doku iskeletinin üretimini ve biyolojik davranışını detaylı bir şekilde ele almaktadır. Bakteriyel selülozun özellikleri, nanokompozit malzemenin biyoyumluğunu ve doku uyumluluğunu artırmak için MXene entegrasyonunun potansiyelini değerlendirir. Bu analizler sonucunda yeni malzemenin gelecekteki biyomedikal uygulamalardaki potansiyelini anlamamıza katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bakteriyel Selüloz, Biyoyumluluk, Ti₃C₂T_x-Mxene, Modifiye Hidrojeller

**PRODUCTION OF MODIFIED BACTERIAL CELLULOSE
NANO COMPOSITE TISSUE SCAFFOLD WITH MXENE
(Ti₃C₂T_x): INVESTIGATION OF BIOLOGICAL BEHAVIOR**

Saliha Nur İlhan

ABSTRACT

In this thesis, the synthesis and characterization of rBC and Ti₃C₂T_x-MXene-based electroactive hydrogels were comprehensively investigated. Initially, Ti₃C₂T_x-MXene derived from processing Ti₃AlC₂ with HF and bacterial cellulose (BC) pellicles produced by *Gluconacetobacter xylinum* were synthesized. Subsequently, rBC and rBC/MXene composite hydrogels were successfully synthesized. The resulting hydrogels were extensively tested for crystallography, surface morphology, chemical composition, mechanical properties, thermal stability, electrical conductivity, hydrophilicity, water absorption capacity, biological compatibility, and cellular behavior. XRD analysis revealed the crystallographic structures of Ti₃C₂T_x-MXene and rBC-based hydrogels, while XPS analysis confirmed the successful synthesis of Ti₃C₂T_x-MXene. FTIR analysis identified the chemical composition and interactions within the hydrogels. Mechanical tests evaluated durability and elasticity, while TGA analysis assessed thermal stability. This study focuses on the production and biological behavior of MXene-modified BC nanocomposite tissue scaffolds, highlighting the potential of integrating MXene to enhance the biocompatibility and tissue compatibility of BC. These analyses contribute to understanding the future biomedical applications of this innovative material.

Keywords: Bacterial Cellulose, Biocompatibility, Ti₃C₂T_x-Mxene, Electroactive Hydrogels

ÖN SÖZ

Bu tez, modifiye hidrojenlerin sentezi ve karakterizasyonu üzerine yapılan kapsamlı bir araştırmayı sunmaktadır. Modifiye hidrojenler, biyomedikal, enerji depolama ve sensör uygulamaları gibi birçok alanda önemli potansiyele sahip olan yenilikçi malzemelerdir. Bu çalışma, $Ti_3C_2T_x$ -MXene ile modifiye edilmiş bakteriyel selüloz nano kompozit doku iskelesi üretimi üzerine odaklanmaktadır. Bu dokuların biyolojik davranışlarını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlayarak, malzeme seçimi, sentez koşullarının optimize edilmesi ve karakterizasyon süreçlerini içermektedir. Araştırma sürecinde, MXene ve bakteriyel selülozun birleşimiyle elde edilen bu nano kompozit dokuların potansiyel uygulama alanlarını keşfetmeyi ve bilimsel alandaki bilgi birikimine katkıda bulunmayı hedeflemekteyiz. Bu çalışma, modifiye hidrojenlerin sentezi ve karakterizasyonu alanında ileri düzeyde bir anlayış geliştirmeyi ve endüstriyel uygulamalar için yenilikçi çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

Tezin yazım sürecinde birçok kişiye teşekkür borçluyum. İlk olarak, tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇİFTÇİ'ye, beni araştırma sürecinde yönlendirmek ve desteklemek için gösterdiği büyük çaba ve değerli rehberlik için minnettarım. Onun tecrübesi ve bilgisi, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır.

Umarım bu tez, yeni araştırmalara ilham verir ve bilimsel literatüre önemli bir katkıda bulunur.

Haziran, 2024

Saliha Nur İlhan

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ÖN SÖZ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
TABLO LİSTESİ	xii
SEMBOLLER	xiii
KISALTMALAR	xv
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM.....	3
1. ARAŞTIRMANIN GEREKÇESİ.....	3
1.1. TEZİN AMAÇLARI VE KAPSAMI.....	4
İKİNCİ BÖLÜM	6
2. MALZEMELER	6
2.1. MXENE.....	6
2.1.1. MXene Tanımı	6
2.1.2. MXene Özellikleri.....	7
2.1.2.1. Yapısal Özellikler.....	8
2.1.2.2. Elektronik Özellikler	9
2.1.2.3. Manyetik Özellikler	10
2.1.2.4. Dielektrik Özellikler	10
2.1.2.5. Optik Özellikler	11
2.1.2.6. Metalik İletkenlik.....	12
2.1.2.7. Yüksek Mukavament ve Sertlik	12
2.1.2.8. Ölçeklenebilir Sentez	13
2.1.2.9. Çevresel Kararlılık	13
2.1.2.10. Biyouyumluluk	14
2.1.2.11. Hidrofilik ve Suda Dağılılabirlik.....	15
2.1.2.12. Ayarlanabilir Özellik.....	15
2.1.2.13. Elektrokimyasal İnterkalsasyon.....	16
2.1.2.14. Geniş Kompozisyon Malzemesi	16
2.1.3. MXene Uygulamaları	17
2.1.3.1. MXene Bazlı Kompozitler.....	18
2.1.3.2. Antibakteriyel Uygulamalar	20
2.1.3.3. Elektromanyetik Girişim (EMI) Koruma	21
2.1.3.4. Hidrojen Depolama	23
2.1.3.5. Sensör Uygulamaları	24

2.1.3.6. Fotokatalizör Uygulamaları.....	25
2.1.3.7. Süperkapasitör Uygulamaları	26
2.1.4. MXene Sentez Yöntemleri	28
2.1.4.1. Hidroflorik Asit Aşındırma	29
2.1.4.2. Florür Tuzları İle Aşındırma.....	29
2.1.4.3. Kimyasal Buhar Biriktirme	30
2.1.4.4. Alkali Aşındırma.....	31
2.1.4.5. Erimiş Tuz Aşındırma	31
2.1.5. SMXene'lerin BS ile Sentezi	32
2.1.6. MXene Türevleri.....	33
2.1.7. MXene Üretilmesi	36
2.2. BAKTERİYEL SELÜLOZ	39
2.2.1. BS Yapısı.....	40
2.2.2. BS Özellikleri	41
2.2.2.1. Kimyasal Özellikleri	42
2.2.2.2. Fiziksel Özellikleri	42
2.2.2.3. BS'un Saflığı.....	43
2.2.2.4. Mekanik Yapısı	44
2.2.2.5. BS Biyoyumluluk	45
2.2.2.6. Biodegrasyon	45
2.2.2.7. Biyoaktif Özellikleri.....	46
2.2.2.8. Kristal Yapı	47
2.2.3. BS Üretim Yöntemleri	48
2.2.3.1. Yüzey Kültürü Yöntemi	48
2.2.3.2. Sıvı Kültürü Yöntemi	49
2.2.3.3. Statik Kültür Yöntemi.....	50
2.2.3.4. Yarı-Sıvı Kültür Yöntemi	51
2.2.3.5. Fermantasyon Süreci.....	52
2.2.4. BS Kullanım Alanları	53
2.2.4.1. Doku Mühendisliği Alanında Uygulamaları	54
2.2.4.1.1. Kemik Doku Mühendisliği Uygulama	55
2.2.4.1.2. Damar Doku Mühendisliğinde Uygulama	57
2.2.4.2. Gıda Endüstrisinde Uygulamaları	58
2.2.4.2.1. Geleneksel Tatlılar	59
2.2.4.2.2. Gıda Katkı Maddesi	60
2.2.4.3. Tıbbi Alanda Uygulamaları	61
2.2.4.3.1. Yara İyileşmesi.....	61
2.2.4.3.2. Yanık Tedavisi	62
2.2.4.3.3. İmplant Malzemeleri	63
2.2.4.3.4. İlaç Salınımı.....	64
2.2.4.3.5. Tıbbi Görüntüleme	65

2.2.4.4. Kağıt Endüstrisinde Uygulamalar	68
2.2.4.5. Tekstil Endüstrisinde Uygulamalar	68
2.3. BS VE MXEN BAZLI NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMALARI	70
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	73
3. MATERYAL VE METOT	73
3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE CİHAZLAR	73
3.2. MXENE (Ti ₃ C ₂ T _x) SENTEZİ	75
3.3. BS PELİKÜLLERİNİN BİYOSENTEZİ VE SAFLAŞTIRILMASI	75
3.4. rBS HIDROJELİ VE RBS/MXENE (Ti ₃ C ₂ T _x) KOMPOZİT HIDROJELLERİN SENTEZİ	76
3.5. XRD ANALİZİ	77
3.6. X-IŞINI FOTOELEKTRON SPEKTROSKOPİ (XPS) ANALİZİ.....	78
3.7. MORFOLOJİ ANALİZİ	79
3.8. FTIR ANALİZİ	80
3.9. MEKANİK ÖZELLİK TESTİ	81
3.10. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇÜMÜ	82
3.11. TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ	83
3.12. <i>IN VITRO</i> BİYOUYUMLULUK TESTİ	84
3.12.1. Toplam Şeker Miktarının Belirlenmesi	85
3.12.2. Enzimoliz Çözeltilisindeki İndirgenmiş Şeker Miktarının Tespiti.....	86
3.12.3. Hidrofiliklik Analizi.....	87
3.12.4. Su Emme Kapasitesi Testi.....	88
3.13. HÜCRE KÜLTÜRÜ	88
3.13.1. Sitotoksosite Değerlendirmesi	89
3.14. HÜCRE CANLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ.....	90
3.14.1. Hemoliz Oranı Testi	91
3.14.2. Hücre Yapışma ve Yayılma Davranışı Çalışmaları.....	92
3.14.3. Canlı/Ölü Boyama Testi	93
3.14.4. Metiltiyazoltetrazolyum Testi.....	93
3.14.5. Kantitatif Gerçek Zamanlı Polimeraz Zincir Reaksiyonu (qRT- PCR).....	94
SONUÇ.....	96
KAYNAKÇA	120

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 MXene Özellikleri.....	8
Şekil 2 MXene Uygulamaları	18
Şekil 3 BS özellikleri	41
Şekil 4 BS Uygulamaları.....	54
Şekil 5 Tekstil lifleri ile BS arasındaki ayrışmanın karşılaştırılması.....	70
Şekil 6 Saf rBS hidrojel ve rBS/MXene kompozit hidrojel için sentetik sürecin şematik diyagramları.....	96
Şekil 7 A.rBS nanofibril hidrojellerin optik mikroskopi görüntüsü, B. rBS/MXene-0.5% hidrojel ve C. rBS/MXene-1% hidrojel için SEM morfolojik görüntüleri. D. fBS'ye yüklenen MXene yapıların TEM morfolojik görüntüleri.....	99
Şekil 8 Ti_3AlC_2 ve $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin XRD deseni.....	101
Şekil 9 $Ti_3C_2T_x$ -MXene, saf rBS hidrojel ve rBS/MXene-2% hidrojinin XPS tarama spektrumları.....	103
Şekil 10 Saf BS hidrojel ile çeşitli MXene içeriklerine sahip BS/MXene hidrojellerinin FTIR spektrumları.....	105
Şekil 12 Değişen maksimum sıkıştırmaya sahip BS/MXene (%2 ağırlıkça) hidrojinin basınç-gerilme eğrileri.....	107
Şekil 13 Farklı MXene içeriğine sahip BS tabanlı hidrojellerin TGA-DTA analizi.....	109
Şekil 14(a) Islanma davranışı, (b) farklı zaman aralıklarında su emme oranı ve (c) PBS içinde 24 saat boyunca ıslanmış rBS tabanlı hidrojellerin su emme oranları. Veriler, ortalama \pm SD (n = 5) olarak gösterilmiş olup, anlamlı farkın analizi için tek yönlü ANOVA ve Tukey'nin çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.....	113
Şekil 15 NIH3T3 hücrelerinin BS tabanlı hidrojel ekstresindeki canlılığı. Veriler, ortalama \pm SD (n = 7) olarak gösterilmiş olup, anlamlı farkın analizi için tek yönlü ANOVA ve Tukey'nin çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.....	115
Şekil 16 NIH3T3 hücrelerinin rBS tabanlı hidrojel üzerinde 24 saat kültür sonrası LSCM görüntüleri. (a-f) şekillerinde altı farklı grup gösterilmektedir: sırasıyla, Rbs hidrojel ve MXene içeriği %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 olan rBS/MXene hidrojelleri. Ölçek çubukları tüm görüntüler için 100 μ m'dir.....	117

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 MXene türevleri ve özellikleri.....	34
Tablo 2 Malzemeler ve Cihazlar	73
Tablo 3 qTR-PCR için kullanılan primer dizileri.....	95
Tablo 4 Glukoz (Glc) ve D-Sakkarik Asit Potasyum Tuzunun (SA) Farklı Oranlarının <i>Komagataeibacter xylinus</i> 'un Büyümesi, Selüloz Üretimi ve Filmin Termal İndirgenmesi ile MXene Oluşumu Üzerindeki Etkisi.....	98
Tablo 5 Oda sıcaklığında çeşitli MXene içeriğine sahip BS ve BS/MXene hidrojellerinin kuvvet ve gerilme özellikleri (n=4).....	108

SEMBOLLER

%	: Yüzde
ρ	: Yoğunluk
°C	: Santigrat Derece
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
Å	: Angström
C	: Karbon
cm	: Santimetre
DMSO	: Dimetil Sülfoksit
DNS	: Dinitrosalisilik Asit
ECH	: Epiklorohidrin
eV	: Elektronvolt
F	: Flor
g	: Gram
HF	: Hidroflorik Asit
KF	: Potasyum Florür
kV	: Kilovolt
LDH	: Laktat Dehidrogenaz
LiF	: Lityum Florür
mA	: Milamper
mg	: Miligram

mL	: Mililitre
mm	: Milimetre
Mo	: Molibden
Mo₂C	: Molibden Karbür
MPa	: Megapascal
N	: Azot
NaCl	: Sodyum Klorür
NaF	: Sodyum Florür
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Nb	: Niyobyum
O	: Oksijen
OH	: Hidroksit
PBS	: Fosfat Tamponlu Salin
pH	: Potansiyel Hidrojen
TBAOH	: Tetra Bütil Amonyum Hidroksit
Ti	: Titanyum
TMAH	: Tetra Metil Amonyum Hidroksit
TPAOH	: Tetra Propil Amonyum Hidroksit
V	: Vanadyum
wt	: Ağırlık
ε	: Epsilon
Θ	: Teta
λ	: Lambda
μL	: Mikrolitre
σ	: Sigma

KISALTMALAR

BS	: Bakteriyel Selüloz
rBS	: Rekombinant (yenilenmiş) Bakteriyel Selüloz
AAB	: Asetik Asit Bakterileri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
XRD	: X-ışını Kırınımı
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
EMI	: Elektromanyetik Girişim
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
TEM	: İletim Elektron Mikroskobu
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
IR	: Kızılötesi
UV	: Ultraviyole
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk
TEP	: Transepitel Potansiyelinde
DCEF	: Doğru Akım Elektrik Alanı
DMEM	: Dulbecco'nun Değiştirilmiş Kartal Ortamı
NIH3T3	: Ulusal Sağlık Enstitüleri 3T3
ODS	: Ortogonal Çift Küre
ODB	: Ortogonal Çift Işın
ODN	: Ortogonal Çift Oluk

LSCM	: Lazer Taramalı Konfokal Mikroskopi
MTT	: Metiltiyazoltetrazolyum Testi
VEGF	: Vasküler Endotelyal Büyüme Faktörü
RNA	: Ribonükleik Asit
EGF	: Epidermal Büyüme Faktörü
qRT-PCR	: Kantitatif Gerçek Zamanlı Polimeraz Zincir Reaksiyonu
TGA	: Termogravimetrik Analizi
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
RF	: Radyo Frekansı
DNA	: Deoksiribonükleik asit
MILD	: Mineral Yoğunlukta Katman Eksfoliasyonu
KKD	: Kişisel Koruyucu Donanımlar
UDP	: Üridin Difosfat
UTP	: Üridiltransferaz
HA	: Hidroksiapatit
MAP	: Mitogen Aktive Protein
FDA	: Gıda ve İlaç Dairesi
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
TEP	: Transepitel Potansiyel
EDX	: Enerji Dispersif X-ışını Spektroskopisi
OES	: Optik Emisyon Spektroskopisi
MS	: Kütle Spektrometrisi
DNS	: Dinitrosalisilik Asit

GİRİŞ

Bakteriyel selüloz (BS), yüksek su tutma kapasitesi, biyoyumlu olması ve mekanik dayanıklılığı gibi benzersiz özellikleri nedeniyle umut vadeden bir biyomalzeme olarak ortaya çıkmıştır.

Bu tezde, modifiye BS/MXene kompozit hidrojenlerin sentezini ve karakterizasyonunu gerçekleştirmeyi amaçlanmıştır. Özellikle, üstün iletkenlik ve biyoyumluluğa sahip olan $Ti_3C_2T_x$ adlı MXene malzemesi tercih edilmiştir. Sentez süreci, çok katmanlı $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin hazırlanmasını ve ardından kimyasal ve fiziksel çapraz bağlama yöntemlerinin bir kombinasyonu ile BS/MXene kompozit hidrojenlerin üretilmesini içermiştir.

Çok katmanlı $Ti_3C_2T_x$ -MXene, Ti_3AlC_2 'nin hidroflorik asit (HF) ile aşındırılması, ardından santrifüjleme, yıkama ve liyofilizasyon ile elde edilmiştir. Elde edilen $Ti_3C_2T_x$ tozu, X-ışını kırınımı (XRD), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) gibi çeşitli teknikler kullanılarak karakterize edilmiştir. XRD analizi, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin başarılı bir şekilde sentezlendiğini doğrularken, XPS, yüzeyde Ti, C, O ve F elementlerinin varlığını göstermiş ve $Ti_3C_2T_x$ 'nin -OH ve -F gibi fonksiyonel gruplarla birlikte olduğunu belirtmiştir.

BS pelikülleri, *Gluconacetobacter xylinum* bakterisi kullanılarak biyosentezlenmiş, ardından arıtılmış ve liyofilizasyonla BS çamuru elde edilmiştir. rBS hidrojenleri, epiklorohidrin ile kimyasal çapraz bağlama ile sentezlenmiş, ardından etanol işleme ve sülfürik asit ile nötralizasyonla fiziksel çapraz bağlama yapılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda $Ti_3C_2T_x$ -MXene, kompozit hidrojenlerin farklı MXene içeriğine sahip olması için rBS çözeltisine dahil edilmiştir.

Elde edilen rBS/MXene hidrojenler, morfoloji, yapısal özellikler, mekanik dayanıklılık, elektriksel iletkenlik, termal stabilite, biyodegradabilite, hidrofilisite ve su emme kapasitesi açısından karakterize edilmiştir. SEM görüntüleri, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin rBS matrisi içinde homojen bir şekilde dağıldığını ve kompozit

hidrojellerin başarılı bir şekilde üretildiğini doğrulamıştır. Mekanik testler, $Ti_3C_2T_x$ - MXene'nin hidrojellerin basınç dayanımını ve modülünü artırdığını gösterirken, elektriksel iletkenlik ölçümleri artan MXene içeriği ile artan bir iletkenlik göstermiştir. Ayrıca, termal analiz, kompozit hidrojellerin termal stabilitesinin arttığını ve in vitro biyodegradasyon testleri, kontrollü bir bozunma için potansiyellerini ortaya koymuştur.

rBS/MXene hidrojellerin biyouyumluluğu, sitotoksisite değerlendirmeleri, hücre canlılığı testleri ve NIH3T3 fibroblast hücreleri kullanılarak hücre tutunma çalışmaları ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kompozit hidrojellerde mükemmel hücre canlılığı ve çoğalma göstermiş ve bu da onların hücre büyümesi ve doku rejenerasyonu uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca, SEM ve konfokal mikroskop görüntüleri, hücrelerin hidrojel yüzeylerine tutunma ve yayılma işlemini doğrulamış ve bu da onların biyouyumluluğunu ve doku mühendisliği uygulamaları için potansiyelini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma, geliştirilmiş elektro aktif özelliklere ve biyouyumluluğa sahip rBS/MXene kompozit hidrojellerin sentezini ve karakterizasyonunu başarıyla gerçekleştirmiştir. Bu kompozit hidrojeller, doku mühendisliği, ilaç taşıma ve biyosensörler gibi geniş bir biyomedikal uygulama alanında umut vaat etmektedir. Gelecek çalışmalar, bu hidrojellerin bileşimi ve özelliklerini belirli uygulama gereksinimlerini karşılayacak şekilde daha da optimize etmeye odaklanacaktır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. ARAŞTIRMANIN GEREKÇESİ

rBS ve MXene ($Ti_3C_2T_x$) gibi malzemelerin sentezi ve karakterizasyonu, çeşitli uygulamalarda kullanılacak potansiyel hidrojel materyallerinin geliştirilmesi açısından önemli bir araştırma alanını temsil etmektedir. Bu çalışma, bu iki bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan rBS/MXene kompozit hidrojellerin sentezini ve karakterizasyonunu detaylı olarak ele almaktadır.

Öncelikle, çalışma MXene'nin sentezi ve karakterizasyonuyla başlamaktadır. Ti_3AlC_2 'nin HF ile aşındırılması ve ardından elde edilen $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin yapısal ve morfolojik özelliklerinin belirlenmesi bu adımı takip etmektedir. Bu aşamada, XRD, XPS ve SEM gibi teknikler kullanılarak MXene'nin kristalografisi, yüzey kimyası ve morfolojisi detaylı bir şekilde incelenmektedir.

İkinci olarak, rBS'nin üretimi ve saflaştırılması süreci açıklanmaktadır. Bu süreçte, *Gluconacetobacter xylium* bakterisinin kültüre edilmesi ve elde edilen BS'un saflaştırılması adımları yer almaktadır. Bu saf rBS materyali daha sonra hidrojel formuna dönüştürülmek üzere kullanılacaktır.

Üçüncü adımda, rBS ve MXene'nin bir araya getirilerek kompozit hidrojellerin sentezi açıklanmaktadır. Bu süreçte, belirli oranlarda $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin rBS çözeltisine eklenmesi ve kimyasal bağlilik yöntemleri kullanılarak hidrojellerin sentezlenmesi gerçekleştirilmektedir. Sentezlenen hidrojellerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak ayrıntılı bir şekilde analiz edilmektedir.

Dördüncü olarak, sentezlenen rBS/MXene kompozit hidrojellerin çeşitli özellikleri değerlendirilmektedir. Bu özellikler arasında mekanik dayanıklılık, elektriksel iletkenlik, termal kararlılık, su emilme kapasitesi ve biyobozunurluk gibi faktörler bulunmaktadır. Bu özelliklerin tespiti, hidrojellerin çeşitli uygulamalarda kullanım potansiyelini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.

Son olarak, rBS/MXene kompozit hidrojenlerin potansiyel uygulamaları ve biyomedikal alanında kullanımı ele alınmaktadır. Bu hidrojenlerin biyolojik uyumluluğu, hücre içi etkileşimleri ve doku mühendisliği gibi alanlarda potansiyel uygulamaları incelenmektedir. Ayrıca, bu çalışmanın gelecekteki araştırmalara ve endüstriyel uygulamalara nasıl katkı sağlayabileceği de tartışılmaktadır.

Bu tez, rBS ve MXene gibi malzemelerin sentezi ve karakterizasyonu üzerine yapılan araştırmalara önemli bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen veriler, bu kompozit hidrojenlerin çeşitli uygulamalarda kullanılabilme potansiyelini göstermektedir ve gelecekteki çalışmalara ilham verebilecek yeni araştırma alanlarını ortaya koymaktadır. rBC/MXene hidrojenlerinin sentezi ve karakterizasyonu için daha gelişmiş bir *in vitro* modelin tasarlanması ve uygulanması amacını taşımaktadır.

1.1. TEZİN AMAÇLARI VE KAPSAMI

Tezin temel amacı, rBC/MXene hidrojenlerinin sentezi ve karakterizasyonunu incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, hidrojenlerin sentezi için uygun yöntemler geliştirilecek ve elde edilen ürünlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri detaylı bir şekilde karakterize edilecektir. Bu karakterizasyon süreci, hidrojenlerin yapısal özellikleri, yüzey morfolojisi, elektriksel ve mekanik özellikleri gibi önemli parametrelerin belirlenmesini içerecektir. Buna ek olarak, rBC/MXene hidrojenlerinin potansiyel uygulamalarını anlamak ve bu materyallerin biyomedikal, elektrokimyasal veya diğer alanlardaki kullanımını keşfetmektir. Bu çalışmanın sonuçları, bu hidrojenlerin sentezi ve karakterizasyonu üzerine yeni bilgiler sağlayarak, ilgili araştırma alanlarına değerli katkılar sunmayı amaçlamaktadır. Bu genel amacın altında şu spesifik hedefler bulunmaktadır:

Literatür Derlemesi ve Temel Bilgiler: rBC ve MXene materyallerinin literatürdeki durumunun derlenmesi ve temel bilgilerin sunulması. Bu bölümde, bu materyallerin özellikleri, sentez yöntemleri, karakterizasyon teknikleri ve mevcut uygulama alanlarına ilişkin bilgilere odaklanılacaktır.

Sentez Yöntemlerinin Geliştirilmesi: rBC/MXene hidrojenlerinin etkili bir şekilde sentezlenmesi için uygun yöntemlerin geliştirilmesi. Bu süreç, hidrojenlerin

bileşimi, yapısal özellikleri ve elektriksel davranışları üzerine etkili sentez parametrelerinin belirlenmesini içerecektir.

Karakterizasyonun Detaylı Gerçekleştirilmesi: Elde edilen hidrojellerin kapsamlı bir karakterizasyonunun yapılması. Bu karakterizasyon, hidrojellerin morfolojisi, kristal yapısı, yüzey özellikleri, mekanik dayanıklılığı, elektriksel iletkenliği ve kimyasal yapısı gibi birçok önemli özelliğin belirlenmesini içerecektir.

Uygulama Alanlarının İncelenmesi: rBC/MXene hidrojellerinin potansiyel uygulama alanlarının değerlendirilmesi. Deneysel çalışmalar gerçekleştirilecek ve hidrojellerin performansı ve işlevselliği değerlendirilecektir.

Yeni Bilgi ve İnovasyon Katkısı: Tezin sonuçları, rBC/MXene hidrojellerinin sentezi ve karakterizasyonu üzerine yeni bilgiler sağlayacak ve bu materyallerin potansiyel uygulama alanlarına yönelik yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Bu bölümde, yapılan çalışmanın önemi, bulguların anlamı ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulacaktır.

Bu hedefler doğrultusunda, rBC/MXene hidrojellerinin sentezi ve karakterizasyonu üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilerek, bu materyallerin çeşitli teknolojik ve bilimsel alanlardaki potansiyeli ortaya konulacaktır.

İKİNCİ BÖLÜM

2. MALZEMELER

2.1. MXENE

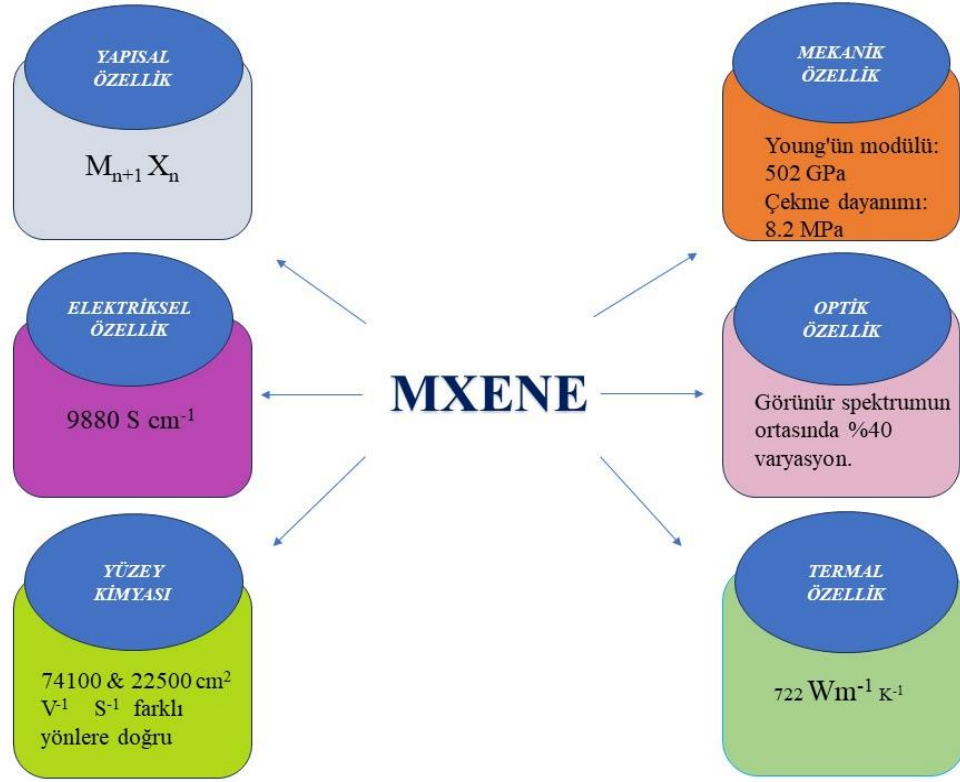
2.1.1. MXene Tanımı

2011 yılında Ti_3C_2 'nin sentezi rapor edildi ve bu olayın ardından MXene'ler adı verilen iki boyutlu karbürler ve nitratların sentezi, karakterizasyonu ve uygulamaları üzerine araştırmalarda büyük bir artış yaşandı (Carey ve Barsoum, 2021). 2012'de ACS Nano dergisinde yayımlanan bir makalede M_2X , M_3X_2 ve M_4X_3 'ün sentezleri kaydedildi ve tamamen yeni bir 2B malzemeler ailesinin doğuşu ilan edildi (Naguib vd., 2012). 2020'de ise ACS Nano'da M_5C_4 'ün rapor edilmesi, 2B karbürler ve karbonitridlerin yapısal çeşitliliğini daha da artırdı. MXene'lerin genel formülü $M_{n+1}X_nT_x$ şeklindedir; burada M geçiş metalini, X karbon veya azotu, n ise 1 ile 4 arasında değişen bir sayıyı, T_x ise en dış katmanlardaki yüzey terminasyonlarını ifade etmektedir. Metal atomlarının düzlem içi ve dışı düzenlenme olasılığı, mümkün olan yapıların sayısını 100'ün üzerine çıkarırken, yüzey terminasyonları ve M ile X sitelerindeki katı çözümler ve karışık terminasyonlar, eşsiz özelliklere sahip potansiyel olarak sınırsız sayıda 2B malzeme oluşturmaktadır. Kimyasal formülünde titanyum (Ti) ve karbon (C) elementlerinin yanı sıra su (H_2O) ve/veya oksijen (O) içeren süreçlerle yapılan bir çözümden kaynaklanan "M" ve "X" harflerinin yan yana gelmesinden alır. Örneğin, $Ti_3C_2T_z$ formülünde, "M" titanyum, "X" ise karbonu temsil ederken " T_z " ise su ve oksijeni simgeler. MXene, grafen gibi tek bir atom kalınlığında değil, birkaç atom kalınlığında olabilir. Ancak, MXene'nin grafene kıyasla belirgin bir farkı, aralarında katı elektrolit tabakası bulunan 2B katmanların bir araya gelmesidir. Bu, MXene'yi elektriksel olarak iletken olmasını sağlamaktadır. MXene'ler, malzemeler dünyasında önemli bir yere sahiptir. İlk olarak, tek ve birkaç katman grafenlerde keşfedilen etkileyici özellikler, diğer 2B malzemelere olan ilgiyi arttırmaktadır. Geçiş metal dihalürleri gibi diğer Van der

Waals bağı katıların ekzfoliasyonuna odaklanan ilk çalışmaların ardından, Van der Waals bağı katmanlı öncülere sahip olmayan 2B silikon ve germanyum yapılarının varlığını göstermektedir. MXene'ler, geçiş metallerinin güçlü bağı katmanlı katıların seçici aşındırılmasıyla üretilen 2B karbürler ve nitridlerdir. MXene'ler, diğer birçok 2B malzemedan farklı olarak, metalik elektriksel iletkenlik sağlarlar. Ayrıca, MXene'ler yüksek mukavemet ve rijitlik gösterir, çözüm sentezlerinde ölçeklenebilirlik sağlar, çeşitli uygulamalarda yeterli çevresel stabilite sunar, biyolojik uyumluluk gösterir ve yüzey aktif madde olmadan sulu çözeltilerde işlenebilmektedir. Bu özellikleriyle, MXene'ler hidrofilik, suya dağılıbilir 2B metaller veya elektriksel iletken kil gibi düşünülebilir. MXene'lerin özelliklerinin çeşitli kombinasyonları, birçok uygulamada kullanılmaktadır. İletkenlik ve redoks yeteneğinin bir araya gelmesi, enerji depolama için önemlidir. İletkenlik ve katalitik yetenek, elektrokataliz için gereklidir. İletkenlik ve şeffaflık, şeffaf iletkenler ve ısıtıcılar için gereklidir. İletkenlik ve renk kombinasyonu, fotonüğü ve optoelektronik cihazları mümkün kılmaktadır. Ayarlanabilir plazmon rezonansı ise fototermal terapi, fotokataliz ve yüzey geliştirilmiş Raman spektroskopisi gibi uygulamalarda kullanılabilir. Bu özellikler, MXene'lerin geniş bir yelpazede kullanılmasını sağlar ve gelecekte daha fazla uygulama alanı keşfedilebilir.

2.1.2. MXene Özellikleri

MXene malzemeleri, MAX fazının kimyasal ve termal işlemlerle ayrışması sonucu elde edilen iki boyutlu yapılar olup, yüzeylerinde F, OH ve O gibi gruplarla sonlanarak kimyasal reaktivite ve yüzey özelliklerini belirler. Bu malzemeler, elektronik, manyetik, dielektrik ve optik özellikleri açısından geniş bir yelpazede değişkenlik gösterir ve bu özellikler, MXene'lerin kimyasal bileşimi ve yapısal düzenlemesine bağılı olarak şekillenir. MXene'ler, enerji depolama, sensörler, fotokataliz, şeffaf iletkenler, manyetik depolama cihazları ve elektromanyetik girişim kalkanları gibi çeşitli uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir.



Şekil 1 MXene Özellikleri

2.1.2.1. Yapısal Özellikler

MXene'nin yapısal özellikleri, MAX fazının kimyasal ve termal işlemlerle ayrışması sonucu ortaya çıkar. Genellikle, MXene yüzeyi F, OH ve O gibi gruplarla sonlanır. Bu yüzey grupları, MXene'nin kimyasal reaktivitesini ve yüzey özelliklerini belirler. Özellikle, F sonlandırmaları sıklıkla kullanılır, ancak saklama koşullarına bağlı olarak OH ve O sonlandırmalarına dönüşebilir. Yüksek sıcaklık işlemleri ve metal adsorpsiyonu ile OH gruplarının O sonlandırmalarına dönüşebileceğini göstermiştir. MXene'nin yüzey gruplarının kararlılığı, metal iyonlarıyla temas etme kapasitesine bağlı olarak değişebilir. Örneğin, O sonlandırılmış MXene türleri, Mg, Ca, Al gibi metallerle etkileşime girerek ayrışabilir. Bu tür etkileşimler, MXene'nin uygulama alanını ve kullanım koşullarını belirler (Khazaei vd., 2013). Yüzey gruplarının MXene'nin yüzeyindeki spesifik konumları ve yönelimleri üzerine yapılan erken çalışmalar, grupların üç komşu C

atomu arasındaki boş bölgelerde yer alabileceğini öne sürmüştür. Ancak, daha sonraki çalışmalar, yüzey gruplarının konumlarının ve yönelimlerinin beklendiği gibi basit olmadığını göstermiştir. MXene'nin karmaşık yapısını daha iyi anlamak için, farklı yüzey gruplarının bir arada bulunmasını ve rastgele adsorpsiyonunu içeren gelecekteki modelleme çalışmaları gereklidir. Katmanlar arası etkileşimler, özellikle Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağları, çok katmanlı MXene yapılarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu etkileşimler, MXene tabakalarının istiflenmesi ve yapısal kararlılığı için kritiktir (Xiang vd., 2022; Zhou vd., 2022).

2.1.2.2. Elektronik Özellikler

MXene'nin elektronik özellikleri, malzemenin kimyasal bileşimine ve yapısal düzenlemesine bağlı olarak değişiklik gösterir. Genellikle, $Ti_{n+1}X_n$ tipi MXene türleri metalik davranış sergilemektedir. Ancak, n değeri arttıkça ek Ti-X bağlarının oluşması nedeniyle metalik özellikler zayıflar. Özellikle, titanyum nitürler, titanyum karbürlerden daha fazla metalik özellik gösterir çünkü N atomu C atomundan bir fazla elektrona sahiptir. Sonlandırılmış MXene levhaları, yüzeylerindeki gruplara ve bu grupların yönelimine bağlı olarak dar bant aralıklı yarı iletkenler veya metaller olarak davranabilmektedir (P. Zhang vd., 2023). Yüzey grupları, MXene'nin elektriksel, optik ve kimyasal özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Örneğin, OH veya O sonlandırmaları, MXene'nin yüzey elektronik yapılarını ve reaktivitesini değiştirebilmektedir. MXene'lerin elektriksel iletkenliği, enerji depolama kapasitesi, şeffaf iletken filmler, elektromanyetik girişim kalkanları, gaz sensörleri ve gerinim sensörleri gibi birçok uygulama için kritik bir parametredir (Lipatov vd., 2023). Yapılan çalışmalar, $Ti_3C_2T_x$ malzemesinin özdirenç değerini $15.8 \pm 1.3 \mu\Omega m$ olarak belirlemiştir. Tek katmanlı MXene pullarının iletkenlikleri oldukça yüksektir ve tipik olarak $4600 \pm 1100 S cm^{-1}$ değerindedir. Ayrıca, $Ti_3C_2T_x$ pullarının iletkenliği ve mekanik özellikleri arasında anizotropik bir ilişki bulunmaktadır (Ma vd., 2021). Bu özellikler, MXene'nin yüzey fonksiyonel grupları boyunca iyi bir pullar arası iletkenliğe sahip olduğunu gösterir. Bununla birlikte, MXene'nin elektronik özelliklerini daha ayrıntılı bir şekilde anlamak için yapısal özellikler, yüzey gruplarının konumu ve yönelimi gibi faktörlerin detaylı analizine ihtiyaç vardır (Hu

vd., 2014) . Bu, MXene'nin potansiyel uygulamalarını genişletmek ve yeni uygulama alanları keşfetmek için önemlidir.

2.1.2.3. Manyetik Özellikler

MXene malzemeleri, genellikle manyetik olmayan bir yapıya sahip olsa da bazı özel durumlarda paramanyetik veya ferromanyetik özellikler gösterebilmektedir. Bu manyetik özellikler, malzemenin içerisinde bulunan metal atomları ile yüzey fonksiyonel grupları arasındaki etkileşimlere bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Paramanyetik MXene türleri, dış manyetik alanlara karşı zayıf bir manyetik moment oluşturabilirler. Bu, manyetik alanda geçici bir mıknatıslanma sağlar; ancak manyetik alanın etkisi ortadan kalktığında bu mıknatıslanma kaybolur. Bu paramanyetik özellikler, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi uygulamalarda, malzemenin manyetik alandaki davranışını anlamak ve izlemek için kullanılabilir. Ferromanyetik MXene türleri ise, belirli yüksek sıcaklık ve özel koşullarda manyetik bir moment gösterebilmektedir. Bu özellik, manyetik bellek, manyetik sensörler ve manyetik depolama cihazları gibi uygulamalarda potansiyel olarak kullanılabilir. Ferromanyetik MXene'ler, manyetik alanları tutma ve yönlendirme yeteneği ile manyetik sensörler ve manyetik rezonans teknolojileri için de kritik öneme sahiptir. Bu manyetik özellikler, MXene malzemelerinin geniş bir uygulama yelpazesi için potansiyelini artırmaktadır. Ancak, bu özelliklerin tam olarak anlaşılması ve kontrol edilmesi, MXene'nin manyetik uygulamalarda ne kadar etkili olabileceğini belirlemek için hayati öneme sahiptir. Bu bağlamda, manyetik özelliklere sahip MXene türlerinin sentezi, karakterizasyonu ve potansiyel uygulamalarının derinlemesine araştırılması, malzemenin manyetik özelliklerinin optimize edilmesi ve geliştirilmesi için kritik bir adımdır.

2.1.2.4. Dielektrik Özellikler

MXene malzemelerinin dielektrik özellikleri, çeşitli elektronik ve elektromanyetik uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Dielektrik sabit, bir malzemenin elektriksel yalıtkanlık kapasitesini belirtir ve MXene'lerin bu özelliği, kapasitörler, sensörler ve elektromanyetik cihazlar gibi birçok farklı uygulama için potansiyel taşır. Bazı MXene türleri, yüksek dielektrik sabitlere sahip olabilmektedir.

Bu yüksek dielektrik sabit, malzemenin elektrik alan altında depolayabileceği enerji miktarını artırır, bu da onları yüksek kapasiteli enerji depolama cihazları için ideal hale getirmektedir. Özellikle, MXene kapasitörler, yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj yetenekleri nedeniyle elektrik enerjisi depolama uygulamalarında büyük potansiyele sahiptir. MXene'lerin dielektrik özellikleri, aynı zamanda elektromanyetik uyumluluk (EMI) kalkanı gibi elektromanyetik girişim azaltma uygulamaları için de önemlidir. Yüksek dielektrik sabitli MXene malzemeleri, elektromanyetik dalgaları emme kapasitesine sahip olabilir, bu da elektromanyetik girişimi etkili bir şekilde sönmüleyebilir ve elektromanyetik girişim kalkanı olarak kullanılabilir. MXene'lerin dielektrik özelliklerinin anlaşılması ve optimize edilmesi, bu malzemelerin elektronik ve elektromanyetik uygulamadaki performansını artırmak için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, MXene'lerin dielektrik sabitlerinin, farklı yapısal ve kimyasal modifikasyonlara bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak için derinlemesine araştırmalar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar, MXene malzemelerinin elektriksel özelliklerini optimize etmek ve farklı uygulama alanlarında potansiyelini tam olarak realize etmek için önemli olacaktır.

2.1.2.5. Optik Özellikler

MXene'lerin optik özellikleri, malzemenin fotonik ve optoelektronik uygulamalar için uygunluğunu belirleyen önemli faktörlerden biridir. Optik özellikler, malzemenin belirli dalga boylarında ışığı ne kadar iyi emebileceği, yansıtılabileceği veya iletebileceği üzerine odaklanır. Bu özellikler, güneş hücreleri, sensörler, optoelektronik cihazlar ve görüntüleme teknolojileri gibi bir dizi uygulama için kritik öneme sahiptir. Bazı MXene tipleri, özellikle kızılötesi (IR) ve ultraviyole (UV) bölgelerinde yüksek optik transparans göstermektedir. Bu yüksek transparans, MXene'leri güneş hücreleri ve optoelektronik cihazlarda bir substrat olarak kullanma potansiyeline sahip kılar. Yüksek transparans, güneş ışığını etkili bir şekilde emmeden veya saçmadan geçirebilir, bu da güneş enerjisi dönüşüm verimliliğini artırabilmektedir. Ayrıca, MXene'lerin optik özellikleri, sensör uygulamaları için de önemlidir. Optik sensörler, belirli dalga boylarında ışığın emilim veya yansıma özelliklerine duyarlıdır. Yüksek optik transparans ve belirli dalga boylarında emilim yetenekleri, MXene'leri optik sensörlerde duyarlı algılayıcılar olarak kullanma

potansiyeline sahip kılar. Optik özelliklerin anlaşılması ve kontrol edilmesi, MXene'lerin optoelektronik cihazlarda ve sensörlerde kullanılabilirliğini optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, MXene malzemelerinin optik özelliklerinin, farklı yapısal ve kimyasal modifikasyonlara bağlı olarak nasıl değiştiğini inceleyen kapsamlı araştırmalar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar, MXene malzemelerinin optik performansını geliştirmek ve farklı optik uygulamalarda potansiyelini tam olarak realize etmek için önemli olacaktır.

2.1.2.6. Metalik İletkenlik

MXene'ler, metalik elektrik iletkenliği özelliğine sahiptirler. Bu özellik, birçok diğer 2B malzemedede genellikle bulunmayan bir özelliktir; çünkü bu malzemeler genellikle yarı iletkenler, yarı metaller veya yalıtkanlardır. Metalik iletkenlik, elektronların malzeme içinde serbestçe hareket edebildiği ve elektrik akımının düşük dirençle iletebildiği anlamına gelmektedir. MXene'lerin bu metalik iletkenlik özelliği, onları yüksek elektrik iletkenliği gerektiren birçok uygulama için tercih edilmektedir. Örneğin, elektrik devreleri, elektronik cihazlar ve enerji depolama sistemleri gibi alanlarda, düşük dirençli iletkenlerin kullanımı önemlidir (An vd., 2018; Safarkhani vd., 2023; Zhou vd., 2022). MXene'lerin metalik iletkenliği, bu tür uygulamalarda verimliliği artırabilir ve daha etkili cihazlar ve sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

2.1.2.7. Yüksek Mukavament ve Sertlik

MXene'ler, birçok diğer çözüm işlemeli 2B malzemeye kıyasla daha yüksek mekanik dayanıklılık ve rijitlik gösterirler. Bu özellik, onların dayanıklılığına ve çeşitli yapısal uygulamalar için uygunluğuna katkıda bulunur. Yüksek mukavemet ve rijitlik, MXene'lerin dış etkilere karşı dayanıklılığını artırır. Bu, malzemelerin çatlamaya, bükülmeye veya diğer mekanik streslere karşı daha dirençli olmasını sağlamaktadır. Özellikle yapısal uygulamalarda, malzemenin dayanıklılığı kritik öneme sahiptir ve MXene'ler bu alanda üstün performans göstermektedir. Yüksek mekanik dayanıklılık, malzemenin uzun süreli kullanımı boyunca şeklini korumasına fayda sağlamaktadır. Bu özellik, MXene'lerin uzun ömürlü yapısal bileşenler veya yüksek yük taşıma kapasitesine sahip cihazlar için ideal bir seçim yapılmasına destek

olmaktadır. Sonuç olarak, MXene'lerin yüksek mukavemeti ve rijitliği, malzemenin dayanıklılığını artırır ve çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılma oranını arttırmaktadır. Bu özellik, inşaat malzemelerinden elektronik cihazlara kadar geniş bir uygulama yelpazesine olanak sağlamaktadır.

2.1.2.8. Ölçeklenebilir Sentez

MXene'ler, ölçeklenebilir çözüm süreçlerinde sentezlenebilirler, bu da büyük miktarlarda üretimin nispeten kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu ölçeklenebilirlik, büyük ölçekli üretimin gerektiği endüstriyel uygulamalar için avantajlıdır. MXene'lerin ölçeklenebilir sentezi, büyük miktarda malzeme gerektiren uygulamalarda öneme sahiptir. Örneğin, enerji depolama sistemleri, kaplama malzemeleri, elektronik cihazlar ve yapısal bileşenler gibi endüstriyel uygulamalar, genellikle büyük miktarlarda malzeme talep ederler. MXene'lerin ölçeklenebilir sentezi, bu talepleri karşılamak için ideal bir çözümdür. Ayrıca, ölçeklenebilir sentez, malzemenin maliyetini düşürme potansiyeline sahiptir. Büyük miktarlarda malzeme üretmek, birim maliyeti genellikle azaltır ve endüstriyel uygulamalarda rekabetçi fiyatlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. MXene'lerin ölçeklenebilir sentezi, farklı endüstriyel süreçlere entegre edilebilir. Örneğin, kimyasal çözelti işleme veya kimyasal buhar biriktirme gibi farklı yöntemler kullanılabilir ve üretim süreci, belirli uygulama gereksinimlerine uyacak şekilde optimize edilmektedir. MXene'lerin ölçeklenebilir sentezi, büyük miktarda malzeme üretimine imkan tanıyarak endüstriyel ve ticari uygulamalarda geniş bir kullanım alanı sağlamaktadır.

2.1.2.9. Çevresel Kararlılık

MXene'ler, yeterli çevresel stabiliteye sahiptirler. Çeşitli çevresel koşullara karşı dayanıklıdırlar ve önemli bir bozulma olmadan farklı ortamlarda kullanılabilirler, bu da onların çok yönlülüğünü arttırmaktadır. MXene'lerin çevresel stabilitesi, farklı sıcaklık, nem, pH ve kimyasal ortamlara karşı direnç göstermeleri sayesinde sağlanmaktadır. Bu özellikler, MXene'lerin dış etkilere karşı dayanıklı olmalarını ve uzun süreli kullanıma uygun olmalarını temin etmektedir. Örneğin, MXene'lerin sıcaklık değişimlerine ve nemli ortamlara maruz kalmaları, genellikle

yapısal veya işlevsel bozulmalara neden olmaz. MXene'lerin çevresel stabilitesi, farklı uygulama alanları için uygun olmalarını sağlamaktadır. Örneğin, elektronik cihazlar, kaplama malzemeleri, yapısal bileşenler ve biyomedikal uygulamalar gibi çeşitli endüstriyel ve bilimsel alanlarda kullanılabilirler. Bu çeşitli uygulamalar için gerekli olan çevresel koşullara dayanıklılıkları, MXene'lerin tercih edilmesini mümkün kılar. Buna ek olarak, MXene'lerin çevresel stabilitesi, malzemenin depolama, taşıma ve işleme süreçlerinde de avantajlıdır. Bu özellik, malzemenin uzun süreli depolanmasını veya nakliyesini kolaylaştırır ve işleme sırasında bozulma riskini azaltır. Sonuç olarak, MXene'lerin çevresel stabilitesi, geniş bir uygulama alanına etkilidir ve farklı endüstriyel ve bilimsel alanlarda kullanılmalarını desteklemektedir. Bu özellik, MXene'lerin çok yönlülüğünü ve kullanım kolaylığını arttırmaktadır.

2.1.2.10. Biyouyumluluk

MXene'lerin biyolojik uyumluluk göstermesi, biyolojik sistemlerle uyumlu oldukları ve olumsuz etkiler olmadan biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir oldukları anlamına gelmektedir. Bu özellik, MXene'lerin ilaç taşıma ve biyogörüntüleme gibi alanlardaki potansiyel uygulamalarını genişletir. MXene'lerin biyolojik uyumluluğu, bir dizi farklı faktöre bağlıdır. Öncelikle, MXene'lerin kimyasal yapısı ve yüzey özellikleri, biyolojik sistemlerle etkileşime girmelerine ve biyolojik ortamlarda stabil kalmalarına olanak tanımaktadır. Ayrıca, MXene'lerin parçacık boyutu ve morfolojisi, biyolojik sistemlerde etkin bir şekilde dağılmalarına ve hücrelere veya dokulara kolayca nüfuz etmelerine imkân sağlamaktadır. MXene'lerin biyolojik uyumluluğu, biyomedikal uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, ilaç taşıma sistemlerinde MXene'lerin kullanılması, ilaçların hedeflenen hücrelere veya dokulara daha etkili bir şekilde teslim edilmesine yardımcı olabilir. Bu, tedavi sürecinin etkinliğini artırabilir ve yan etkileri azaltabilir. MXene'lerin biyolojik dokularla etkileşim özellikleri, görüntüleme tekniklerinde kullanılmalarını ve biyolojik süreçlerin görselleştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Sonuç olarak, MXene'lerin biyolojik uyumluluğu, biyomedikal alanda kullanımlarını genişletir ve çeşitli uygulamalarda potansiyel faydalar sağlamaktadır. Bu özellik, MXene'lerin

ilaç teslimatı, biyogörüntüleme, biyoaktif kaplamalar ve biyosensörler gibi alanlarda kullanılmasını desteklemektedir.

2.1.2.11. Hidrofilik ve Suda Dağılılabirlik

MXene'ler, hidrofilik yapıları sayesinde su içinde kolayca dağılılabirler; bu da işlenmelerini ve sulu bazlı sistemlere entegrasyonlarını kolaylaştırmaktadır. Bu özellik, üretim süreçlerini basitleştirir ve sulu ortamlarda kullanımlarının kapsamını genişletmektedir. Hidrofilik olmaları, MXene'lerin su molekülleriyle güçlü bir etkileşime girmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, MXene'lerin su içinde homojen bir şekilde dağılmasını ve stabil bir süspansiyon oluşturmasını sağlamaktadır. Bu özellik, MXene'lerin sıvı formülasyonlar içinde kolayca karıştırılmasını ve işlenmesini mümkün kılmaktadır. Su içinde dağılılabirlikleri, MXene'lerin birçok uygulamada kullanımını kolaylaştırmaktadır. Örneğin, ilaç teslimatı, biyomedikal görüntüleme, kataliz, kaplama malzemeleri ve sensörler gibi çeşitli alanlarda MXene'lerin su bazlı sistemlere entegre edilmesi yaygındır. MXene'lerin hidrofilik ve su içinde dağılılabir özellikleri, biyolojik sistemlerle uyumlu oldukları anlamına gelmektedir. Bu durum, MXene'lerin biyomedikal uygulamalarda kullanımını da desteklemektedir. Örneğin, biyomalzemelerin geliştirilmesinde, MXene'lerin su içinde çözülebilir formülasyonlara entegre edilmesi ve biyolojik sistemlerle etkileşime girmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır. MXene'lerin hidrofilik ve su içinde dağılılabir özellikleri, çeşitli uygulama alanlarında kullanımlarını genişletir ve üretim süreçlerini basitleştirmektedir. Bu özellikler, MXene'lerin endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

2.1.2.12. Ayarlanabilir Özellik

MXene'lerin özellikleri, tersine kimyasal veya elektrokimyasal interkalsasyon, uygulanan potansiyel veya aydınlatma gibi yöntemlerle daha da özelleştirilebilir ve kontrol edilebilmektedir. Bu ayarlanabilirlik, MXene'lerin belirli uygulama gereksinimlerini karşılamak için özelleştirilmesine olanak tanımaktadır.

2.1.2.13. Elektrokimyasal İnterkalsasyon

MXene tabakaları arasına moleküllerin veya iyonların yerleştirilmesi, MXene'lerin elektriksel, manyetik, optik veya kimyasal özelliklerini değiştirebilmektedir. Farklı iyonlar veya moleküllerin interkale edilmesi, MXene'lerin iletkenliğini, optik özelliklerini veya kimyasal reaktivitesini etkileyebilir. Uygulanan potansiyel veya aydınlatma, MXene'lerin yüzey özelliklerini ve kimyasal bileşimini modifiye edebilmektedir. Bu yöntemler, MXene yüzeyindeki fonksiyonel grupların veya kimyasal bağların modifikasyonunu mümkün kılarak malzemenin özelliklerini ayarlamaya olanak tanımaktadır. Örneğin, uygulanan potansiyel, MXene yüzeyindeki redoks tepkimelerini tetikleyebilmekte ve bu da malzemenin elektriksel iletkenliği veya reaktivitesini değiştirebilmektedir. Bu ayarlanabilirlik, MXene'lerin çeşitli uygulama alanları için optimize edilmesine ve özelleştirilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, enerji depolama sistemleri, kataliz, sensörler ve elektrokimyasal cihazlar gibi birçok alanda MXene'lerin özellikleri belirli gereksinimlere göre ayarlanabilir ve optimize edilebilmektedir. Bu özelliğin kullanılması, MXene'lerin çok yönlü ve etkili bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

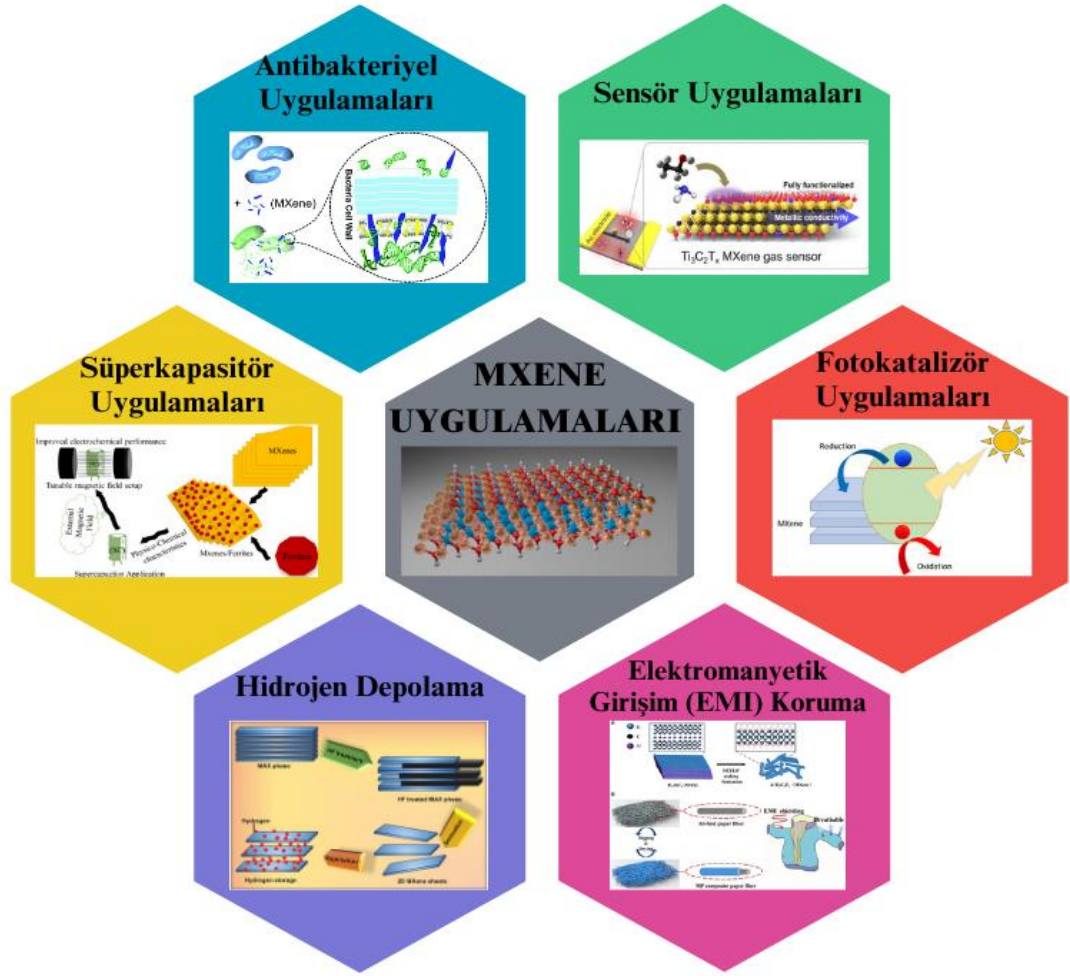
2.1.2.14. Geniş Kompozisyon Malzemesi

MXene'ler, geniş bir kompozisyon yelpazesine sahiptir ve şu anda düzinelerce MXene çeşidi sentezlenmiş olup, potansiyel olarak sonsuz sayıda kompozisyon mümkün kılınmaktadır. Bu çeşitlilik, çeşitli uygulamalar için özelleştirilmiş özelliklere sahip malzemelerin tasarlanmasında esneklik sağlamaktadır. MXene'lerin geniş kompozisyon yelpazesi, farklı geçiş metalleri ve karbon/nitrojen oranlarını içermektedir. Örneğin, Ti, Nb, V, Mo gibi çeşitli geçiş metalleri ile C ve N gibi farklı elementlerin kombinasyonları kullanılarak farklı MXene varyasyonları elde edilebilmektedir. Bu, malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin büyük ölçüde değişmesine olanak tanımaktadır. Bu çeşitlilik, MXene'lerin farklı uygulamalara uyum sağlamasına imkân vermektedir. Bir uygulama için belirli bir iletkenlik seviyesi veya mekanik dayanıklılık

gerekebilirken, başka bir uygulama için yüksek yüzey alanı veya kimyasal reaktivite ön planda olabilmektedir. Bu durumda, farklı MXene kompozisyonları seçilerek belirli uygulama gereksinimlerine en uygun malzeme tasarlanabilmektedir. Belirli bir uygulamaya uygun özelliklere sahip malzemelerin tasarımında büyük bir avantaj sunmaktadır. Bu, MXene'lerin endüstriyel, bilimsel ve teknolojik alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasını mümkün kılmaktadır.

2.1.3. MXene Uygulamaları

MXene'ler, sahip olduğu çeşitli özellikler nedeniyle birçok farklı uygulama alanında önemli bir potansiyele sahiptir. Bu malzemelerin yüksek Young Modülü, mükemmel elektrik iletkenliği ve özgün morfolojisi, kompozit malzemelerin üretiminde etkin bir şekilde kullanılmalarını sağlamaktadır (J. Zhang vd., 2019). Bunun yanı sıra, MXene'lerin iyi elektronik iletkenliği, kimyasal kararlılığı, iyon interkalasyon kapasitesi ve ayarlanabilir bant boşlukları, katalizörlerden sensörlere ve enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir yelpazede uygulama olanağı sunmaktadır. MXene'lerin özellikleri, üretim sürecinde kullanılan aşındırıcı malzemenin türü, aşındırma prosedürü, iyon interkalasyon tekniği ve sonikasyon frekansı gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Naguib vd., 2014). Bu parametrelerin optimal bir şekilde seçilmesi, MXene'lerin mekanik dayanıklılığı, yapısal bütünlüğü, yüzey morfolojisi, elektronik iletkenliği, optik özellikleri, yük taşıma kapasitesi ve manyetik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir (Mao vd., 2020). Bu nedenle, MXene'lerin farklı uygulama alanlarında kullanılabilmesi için, bu malzemelerin üretim süreçlerinin ve özelliklerinin detaylı bir şekilde anlaşılması ve optimize edilmesi gerekmektedir. Bu, MXene tabanlı malzemelerin endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 2 MXene Uygulamaları

2.1.3.1. MXene Bazlı Kompozitler

MXene bazlı kompozitler, bileşenler arasında meydana gelen sinerjistik etkileşimler sayesinde tekli bileşenlere göre daha üstün ve kararlı özellikler sergilemektedir. MXene'ler, 2B yapıları nedeniyle yeniden istiflenme sorunlarıyla karşılaşabilirler. Ancak, bu sorunu aşmak için MXene tabanlı kompozitler geliştirilmiştir. Bu kompozitlerde, MXene katmanları arasında ayırıcı bir rol oynayan katkı maddeleri entegre edilerek yeniden istiflenme engellenmiştir. Polimerler, karbon bazlı malzemeler, geçiş metali bazlı bileşikler, kuantum noktaları, metal alaşımları ve metal-organik yapılar gibi çeşitli inorganik ve organik bileşikler, MXene katmanlarına başarılı bir şekilde entegre edilmiştir. MXene bazlı kompozitler, bileşenler arasında meydana gelen sinerjistik etkileşimler sayesinde

tekli bileşenlere göre daha üstün ve kararlı özellikler sergilemektedir. Özellikle, 2B MXene'lerin 3B yapılarla entegrasyonu, yeniden istiflenmeyi büyük ölçüde engelleyerek malzemenin mekanik ve yapısal özelliklerini iyileştirebilmektedir. Bu kompozitlerin yüzey alanındaki artış, kataliz ve elektrokimyasal uygulamalarda adsorpsiyon etkinliğini artırarak yüzey özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca, 3B MXene'ler, sensör uygulamalarında faydalı olabilecek tabakalı yapılarıyla iyi mekanik özelliklere sahiptir. MXene kompozitlerinin geleneksel malzemelerle rekabet edebilen özelliklere sahip olması, ölçeklenebilir üretim süreçleri ve maliyet etkinliği, bu malzemelerin çeşitli endüstriyel uygulamalar için ideal bir seçenek olmasını sağlamaktadır (Jaya Prakash ve Kandasubramanian, 2021). Bu avantajlar, MXene bazlı kompozitlerin enerji depolama, kataliz, sensör teknolojileri ve diğer birçok alanda kullanılmasını teşvik etmektedir. MXene'ler, kompozit malzemelerin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. MXene bazlı kompozitler, MXene'lerin diğer malzemelerle birleştirilmesi sonucu elde edilen, geliştirilmiş fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Elektriksel ve termal iletkenliğin artırılması amacıyla MXene'lerin polimerler, metaller veya seramiklerle birleştirilmesi sıkça kullanılan bir yöntemdir. Örneğin, $Ti_3C_2T_x$ MXene'nin polimer matrisiyle birleştirilmesi, yüksek iletkenlikte kompozit malzemeler oluşturarak elektronik devrelerde ve ısı yönetim sistemlerinde kullanılabilmesini sağlamaktadır. Elektromanyetik dalgaların engellenmesi veya sönmümlendirilmesi için ise Ti_3C_2 MXene, polimer veya tekstil malzemeleri ile birleştirilerek elektromanyetik girişimden koruma sağlayan kompozitler oluşturulabilmektedir. Bu tür malzemeler, elektronik cihazların elektromanyetik girişimden korunmasında kullanılabilir. Mekanik dayanıklılığı artırmak amacıyla $Ti_3C_2T_x$ MXene'nin epoksi reçinelerle birleştirilmesi, yüksek mukavemetli ve dayanıklı kompozit malzemeler elde edilmesini sağlayarak havacılık ve otomotiv sektörlerinde yapısal malzemeler olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır. Enerji depolama cihazlarının performansını artırmak için MXene'lerin aktif malzemelerle birleştirilmesi de önemli bir uygulama alanıdır; örneğin, $Ti_3C_2T_x$ MXene, lityum iyon pillerde kullanılan aktif malzemelerle birleştirilerek pil performansını artırabilmekte ve bu tür kompozitler, pillerin enerji yoğunluğunu ve döngü ömrünü iyileştirebilmektedir. Çevresel uygulamalarda, su arıtma ve gaz filtreleme gibi

alanlarda MXene bazlı kompozitler önemli rol oynamaktadır. Ti_3C_2 -MXene, karbon nanotüpler veya grafen oksit ile birleştirilerek su arıtma membranları oluşturulabilir ve bu tür kompozit membranlar, ağır metallerin ve organik kirleticilerin sudan uzaklaştırılmasında etkili olabilmektedir. Son olarak, esnek ve giyilebilir elektronik cihazlar için iletken ve esnek kompozit malzemelerin geliştirilmesinde MXene'ler kullanılmaktadır. $Ti_3C_2T_x$ -MXene, esnek polimerlerle birleştirilerek esnek elektronik devreler ve sensörler oluşturulabilir ve bu tür kompozitler, giyilebilir sağlık izleme cihazlarında ve esnek ekranlarda kullanılabilir. Bu bağlamda, MXene bazlı kompozitler, çeşitli sektörlerde yenilikçi çözümler sunarak malzeme bilimi ve mühendisliğinde önemli ilerlemeler sağlamaktadır.

2.1.3.2. Antibakteriyel Uygulamalar

MXene'ler, yarı iletken özelliklere sahip olmaları nedeniyle antibakteriyel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle Ti_3C_2 -MXene gibi türler, ışık altında bakterisidal (bakteri öldürücü) özellikler sergileyerek antibakteriyel uygulamalarda kullanılabilir. Bu özellik, MXene'nin yüzeyindeki kimyasal etkileşimler ve yüzey morfolojisi sayesinde sağlanmaktadır. Antibakteriyel MXene uygulamaları, medikal cihazlardan gıda ambalajlarına kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir. Örneğin, antibakteriyel özelliklere sahip MXene kaplamaları, hastane ekipmanları ve yüzeylerinin dezenfekte edilmesinde etkili olabilir. Ayrıca, gıda endüstrisinde paketleme malzemelerinde kullanılarak gıda ürünlerinin hijyenik koşullarda saklanmasına ve taşınmasına yardımcı olabilir. Bu şekilde, MXene'lerin antibakteriyel özellikleri, sağlık alanında hijyen standartlarını artırmak ve enfeksiyon riskini azaltmak için potansiyel sağlamaktadır. Işık ile uyarıldığında, MXene'ler negatif elektronlar ve pozitif boşluklar üreterek, tip I fotodinamik terapiye benzer bir mekanizma ile hücre öldürmeye neden olabilmektedir. Reaktif metal F çiftleri aracılığıyla, reaktif elektronları çevredeki hücre zarlarına transfer edebilirler. Bu, antibakteriyel etkiyi artırarak mikroorganizmaların inaktivasyonunu sağlamaktadır. Ayrıca, Ti_3C_2 -MXene'lerin yüksek hidrofiliği sayesinde, bakterilerin membran yüzeyine yapışması ve inaktivasyonu kolaylaşmaktadır. Hücre zarının lipopolisakkarit dizileri ile MXene arasındaki hidrojen bağları, besin alımını engelleyerek bakteri büyümesini inhibe edebilmektedir (Huang vd., 2021).

MXene'ler, grafen oksit nano yapraklara göre daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip oldukları için, antibakteriyel aktivite açısından daha yüksek verimlilik sağlayabilmektedir. Oksitlenmiş Ti_3C_2 -MXene'ler, taze Ti_3C_2 -MXene'lere kıyasla daha güçlü antibakteriyel aktivite göstermektedir. Oksitlenmiş Ti_3C_2 -MXene'lerin antibakteriyel özelliklerinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin Gram-pozitif *B. subtilis* ve Gram-negatif *E. coli* bakterilere karşı antibakteriyel etkinliğini değerlendirmiştir. Artan $Ti_3C_2T_x$ konsantrasyonu ile bakteri koloni sayısında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 200 $\mu\text{g/mL}$ $Ti_3C_2T_x$ konsantrasyonunda, bakteri azalmasının %99'un üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, MXene'lerin antibakteriyel uygulamalarda etkili bir malzeme olarak potansiyeline işaret etmektedir. Yüksek elektriksel iletkenlikleri, doğrudan temasla öldürme mekanizmaları ve yüzey özellikleri sayesinde MXene'ler, bakteriyel inaktivasyon ve kontrolde etkili bir stratejiye sahiptirler (Rasool vd., 2016).

2.1.3.3. Elektromanyetik Girişim (EMI) Koruma

Elektrik enerjisinin üretimi, dağıtımı ve kullanımı sırasında oluşan EMI, elektronik cihazların performansını olumsuz etkileyebilmektedir. EMI koruma, cihazların istenmeyen elektromanyetik etkilerden korunması ve bu etkilerin insan sağlığına ve çevreye olan potansiyel zararını azaltmak için kritik öneme sahiptir. Etkili bir EMI koruma sistemi, elektromanyetik radyasyonu yansıtarak veya emerek cihazları istenmeyen sinyallerden korumaktadır. MXene gibi iki boyutlu malzemeler, EMI koruma uygulamaları için ideal özelliklere sahip olabilirler. Grafen gibi diğer iki boyutlu malzemelerin yüksek sentez maliyeti ve düşük elektriksel iletkenliği, potansiyel EMI koruma uygulamalarını kısıtlayabilirken, MXene'lerin yüksek elektriksel iletkenliği bu alanda öne çıkmalarını sağlamaktadır. 2B MXene'ler, geniş bir elektriksel iletkenlik aralığına sahiptir, bu da onları elektromanyetik girişim ekranlama malzemeleri için ideal bir seçenek haline getirmektedir. MXene'lerin üstün elektriksel iletkenliği, mükemmel mekanik esneklik, ayarlanabilir yüzey kimyası ve hidrofiliklik özellikleri, diğer koruyucu malzemelerden daha üstün performans sağlamaktadır. Bu özellikler, MXene'lerin kararlı sulu dispersiyonlar oluşturmasını ve yüksek iletkenlikte polimerik kompozitlerin geliştirilmesini

kolaylaştırmaktadır. Yapısal tasarım parametreleri de EMI koruma performansını etkileyebilmektedir. MXene'nin elektromanyetik dalgaları yansıtma ve emme yeteneği, malzemenin yüksek elektron yoğunluğu sayesinde gerçekleşmektedir. Elektromanyetik dalgalar MXene tabakasına çarptığında, serbest elektronlar sayesinde bir kısmı yansıtılır, geri kalan enerji ise MXene tabakasında emilir. Bu süreç, elektromanyetik dalgaların enerjisini azaltarak etkili bir EMI koruma sağlar. MXene'nin EMI koruma mekanizması, elektromanyetik dalgaların MXene tabakaları arasında yansıtılma ve emilme sürecini içermektedir. Bu süreç, elektromanyetik enerjinin MXene tabakalarında tamamen emilene kadar devam eder, bu da etkili bir koruma sağlamaktadır (Shahzad vd., 2022).

MXene'nin EMI koruma uygulamaları, modern elektronik cihazların güvenilirliği ve performansı açısından son derece önemlidir. Öncelikle, Ti_3C_2 -MXene gibi MXene türleri, polimer matrisi ile birleştirilerek elektromanyetik girişimden koruma sağlayan kompozit malzemelerin oluşturulmasında etkilidir. Bu kompozit malzemeler, akıllı telefonlar, tabletler veya dizüstü bilgisayarlar gibi elektronik cihazların gövdelerinde veya kalkanlarında kullanılarak, elektromanyetik girişimden kaynaklanan sinyal bozulmasını en aza indirir ve cihazların performansını arttırmaktadır (Iqbal vd., 2021). Ayrıca, Ti_3C_2 -MXene metalik yüzeylere kaplanarak elektromanyetik kalkanlar oluşturabilir. Bu kalkanlar, elektronik devrelerin veya hassas ekipmanların elektromanyetik girişimden etkilenmesini önler ve özellikle askeri uygulamalarda radar sistemlerinin veya haberleşme ekipmanlarının elektromanyetik girişimden korunmasına yardımcı olmaktadır. Elektronik ekipmanların yüzeylerine uygulanan Ti_3C_2 -MXene kaplamaları, ince bir kaplama olarak elektromanyetik girişimi absorbe edebilir veya yansıtabilir. Bu kaplamalar, radyo frekansı (RF) cihazları veya mikrodalga cihazları gibi elektronik cihazların EMC (Elektromanyetik Uyumluluk) gereksinimlerini karşılamalarına yardımcı olur ve istenmeyen elektromanyetik girişimi azaltarak cihazların performansını iyileştirmektedir. Son olarak, uzay araçları veya uçakların dış yüzeylerine uygulanan Ti_3C_2 -MXene, elektromanyetik girişimi absorbe edebilir veya yansıtabilir. Bu, elektronik sistemlerin uzay ortamındaki veya yüksek irtifalardaki elektromanyetik interferansa karşı korunmasına yardımcı olur. Özellikle uzay araçları için MXene

bazlı elektromanyetik kalkanlar, uzayda hassas elektronik ekipmanların güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Bu örnekler, MXene'nin elektromanyetik girişim koruma uygulamalarında geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu ve elektronik sistemlerin güvenliğini ve performansını artırmak için önemli bir fırsat sunduğunu göstermektedir.

2.1.3.4. Hidrojen Depolama

Hidrojen depolama, geleceğin enerji taşıyıcısı olarak kabul edilen hidrojen ekonomisinin ve yakıt hücreli araçların geliştirilmesi için kritik bir konudur. Mevcut depolama yöntemleri, hidrojenin güvenli ve etkin bir şekilde saklanmasında sınırlamalarla karşılaşmaktadır. Yüksek özgül yüzey alanına sahip nanoporöz malzemeler, hidrojen depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir. Bu malzemeler, fiziksel adsorpsiyon yoluyla hidrojen moleküllerini yakalayıp mükemmel kinetik özellikler ve yüksek depolama kapasiteleri sunabilmektedir. $Ti_3C_2T_x$ gibi MXene malzemeleri, hidrojen depolama kapasitesini artırmada önemli bir rol oynayabilir. HF aşındırmasıyla hazırlanan $Ti_3C_2T_x$ yığınları, yüksek flor içeriğine sahip olup, hidrojen depolama kapasitesini artıran nanopompa etkili zayıf kimyasal adsorpsiyon mekanizması ile karakterizedir. Bu malzemeler, 60 bar basınçta ağırlıkça %8,8'den fazla hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. Bu, oda sıcaklığında hidrojen depolama kapasitesi açısından önceki literatürde rapor edilen değerlerin neredeyse iki katıdır. $Ti_3C_2T_x$ 'nin hidrojen depolama kapasitesi, düşük sıcaklık ve vakum koşullarında hızlı ve kontrollü bir dehidrojenasyon süreci ile desteklenmektedir. Bu, hidrojenin güvenli ve etkili bir şekilde depolanmasını sağlar ve malzemenin ortam koşullarında bile önemli miktarda hidrojen depolama kapasitesine sahip olmasını mümkün kılmaktadır. Bu özellikler, MXene malzemelerinin hidrojen depolama teknolojilerinde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Yüksek hidrojen depolama kapasitesi, güvenli depolama koşulları ve etkili hidrojen salınımı sağlayan $Ti_3C_2T_x$ gibi MXene malzemeleri, hidrojen ekonomisinin ve yakıt hücreli teknolojilerin geliştirilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir (Li vd., 2022).

2.1.3.5. Sensör Uygulamaları

MXene'ler, sensör teknolojileri için önemli bir potansiyele sahip olan özelliklere sahiptir. Grafen gibi diğer iki boyutlu malzemelerin entegrasyon zorlukları, katlanma veya yeniden istiflenme gibi sorunlarla karşılaşabilirken, MXene'ler bu konularda avantaj sağlamaktadır. MXene'ler, yüksek hidrofilitiklikleri ve bol miktarda yüzey fonksiyonel grupları (OH, O, F) sayesinde yüzey işlevselleştirme kolaylığı sunar, bu da onları sensör uygulamaları için uygun bir seçenek haline getirir. MXene'lerin yüksek elektriksel iletkenliği (850-2410 S/cm), elektrokimyasal sensörlerin tasarımında önemli bir etkidir. Ayrıca, MXene'lerin sağlam mekanik özellikleri, gerinim ve basınç sensörleri gibi uygulamalar için uygun bir iletken dolgu maddesi olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. MXene'lerin mükemmel yüzey özellikleri, metal benzeri iletkenlik, doğru sertlik büyüklüğü ve esnekliği, elektrokimyasal, biyo-elektrokimyasal, gerinim, basınç, kemilüminesans ve fotokimyasal sensörler gibi birçok sensör türü için ideal bir dönüştürücü malzeme olarak kabul edilmelerini sağlamaktadır (He vd., 2020). Bu özellikler, MXene'lerin sensör teknolojilerinde geniş bir uygulama yelpazesine sahip olabileceğini göstermektedir. Yüksek iletkenlikleri, yüzey özellikleri ve işlevselleştirme kolaylığı sayesinde MXene'ler, gelecekteki sensör uygulamaları için kullanılabilirlerdir.

MXene'ler, metal karbürler, nitrürler veya karbonitrürlerden oluşmaktadır. Bu malzemeler, yüksek elektrik iletkenliği, geniş yüzey alanı, kimyasal stabilite ve mekanik esneklik gibi üstün özellikleri nedeniyle sensör teknolojilerinde büyük etkiye sahiptir. Gaz sensörlerinden biyosensörlere kadar geniş bir uygulama yelpazesi, MXene'lerin çok yönlülüğünü ve etkinliğini ortaya koymaktadır. Gaz sensörleri, ortamda bulunan gazların tespiti ve ölçümü için kullanılan cihazlardır. Örneğin, $Ti_3C_2T_x$ -MXene, amonyak (NH_3) gibi gazların tespitinde yüksek duyarlılık göstermektedir. Bu sensörler, gaz molekülleri ile MXene yüzeyindeki etkileşimler sonucunda elektriksel özelliklerde meydana gelen değişikliklerle gaz tespitini sağlar. Biyosensörler ise biyolojik moleküllerin (enzimler, antikorlar, DNA vb.) tespitini gerçekleştiren cihazlardır. MXene tabanlı biyosensörler, glikoz, kolesterol gibi biyomoleküllerin tespitinde kullanılabilirlerdir. Örneğin, $Ti_3C_2T_x$ -MXene, glikoz oksidaz enzimi ile modifiye edilerek kan şekerinin ölçülmesinde etkili bir biyosensör

olarak kullanılabilir. Elektrokimyasal sensörler, kimyasal reaksiyonları elektriksel sinyale çeviren cihazlardır ve MXene bazlı elektrokimyasal sensörler, ağır metal iyonlarının (Pb^{2+} , Hg^{2+} gibi) tespitinde fayda sağlamaktadır. MXene'lerin yüksek iletkenliği ve geniş yüzey alanı, bu tür iyonların duyarlı ve seçici olarak tespit edilmesine olanak tanımaktadır (P. Zhang vd., 2023). Basınç ve gerinim sensörleri, basınç veya mekanik gerilme değişimlerini algılamak için kullanılmaktadır. $Ti_3C_2T_x$ -MXene, elastomerik bir malzeme ile kombine edilerek esnek basınç sensörleri oluşturabilir ve bu sensörler, insan hareketlerini veya dokunma basıncını ölçmek için kullanılabilir. Termal sensörler ise sıcaklık değişimlerini tespit eden cihazlardır ve MXene tabanlı termal sensörler, ortam sıcaklığındaki değişimlere hızlı tepki verebilmektedir. Bu özellikleri, MXene'leri yangın alarm sistemleri veya giyilebilir termal sensörler gibi uygulamalarda ideal hale getirir. Sonuç olarak, MXene'ler, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde sensör teknolojilerinde geniş bir uygulama yelpazesi sunarak çevresel izleme, sağlık takibi ve endüstriyel kontrol gibi çeşitli alanlarda etkilidir. Bu potansiyel, MXene'lerin sensör teknolojilerinde devrim yaratma kapasitesini ortaya koymaktadır.

2.1.3.6. Fotokatalizör Uygulamaları

MXene'ler, fotokatalizör uygulamalarında çeşitli avantajlar sunabilen özel özelliklere sahiptir. Fotokataliz, ışık enerjisi ile uyarılan kimyasal reaksiyonları içeren bir süreçtir. Bu süreçte, fotokatalizör yüzeyinde ışığın etkisiyle elektronlar ve boşluklar oluşur. Oluşan bu elektronlar ve boşluklar, yüzey reaksiyonlarına katılarak indirgeme ve yükseltgenme reaksiyonlarını başlatır, bu da reaktif radikallerin oluşumuna yol açmaktadır. MXene'ler, fotokatalitik süreçlerde elektronlar ve boşluklar arasında etkili bir şekilde ayırıcı olarak görev alabilir. Ayrıca, MXene'lerin yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar (OH, O, F gibi), reaktanların adsorpsiyonu için aktif bölgeler oluşturarak fotokatalitik reaksiyonların verimliliğini arttırmaktadır. Özellikle, MXene'ler metal-organik yapıların fotokatalitik performansını iyileştirmek için kullanılabilir. Fonksiyonel grupların varlığı, MXene'leri fotokatalitik reaksiyonlarda aktif katılımcılar haline getirir. Bu durum, MXene'lerin fotokatalizör olarak kullanıldığında reaktanların yüzeyde daha iyi adsorpsiyonunu ve daha etkili reaksiyon mekanizmalarını destekleyebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda,

MXene'lerin fotokataliz uygulamaları için potansiyeli oldukça yüksektir. Bu malzemeler, enerji dönüşümü, su arıtma, hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi birçok alanda etkili ve verimli fotokatalizörler olarak kullanılabilir oynamaktadır (Mallakpour vd., 2021). MXene'ler, yüksek yüzey alanı, iyi elektrik iletkenliği, kimyasal stabilite ve geniş bant aralığı gibi özelliklerle çeşitli fotokatalitik uygulamalarda kullanışlı kılmaktadır. Fotokataliz, ışık enerjisi kullanarak kimyasal reaksiyonları hızlandırma sürecidir ve çevresel temizleme, enerji üretimi ve organik sentez gibi birçok alanda kullanılabilir. Örneğin, Ti_3C_2 -MXene, su ayrıştırma süreçlerinde etkin bir fotokatalizör olarak kullanılabilir ve görünür ışık altında yüksek fotokatalitik aktivite göstererek su moleküllerinin hidrojen ve oksijene ayrılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, $Ti_3C_2T_x$ -MXene, metilen mavisi ve fenol gibi organik kirleticilerin UV veya görünür ışık altında parçalanmasında etkilidir ve kirleticileri zararsız bileşiklere dönüştürmektedir. CO_2 dönüşümünde ise Nb_2C MXene, karbondioksiti metan, metanol veya diğer değerli hidrokarbonlara dönüştürerek CO_2 emisyonlarını azaltmaya yardımcı olur ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Antibakteriyel uygulamalarda, Ti_3C_2 -MXene ışık altında bakterisidal özellikler sergileyerek su arıtma sistemlerinde veya yüzey dezenfeksiyonunda kullanılabilir. Güneş enerjisi dönüşümünde ise Mo_2C MXene, güneş ışığı altında yüksek fotokatalitik aktivite gösterir ve güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürmek için fayda sağlamaktadır. Sonuç olarak, MXene'ler, fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde fotokatalitik uygulamalarda büyük bir potansiyele sahiptir ve su ayrıştırma, organik kirleticilerin parçalanması, CO_2 dönüşümü, antibakteriyel uygulamalar ve güneş enerjisi dönüşümü gibi alanlarda etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu uygulamalar, çevresel temizleme ve sürdürülebilir enerji üretimi gibi alanlarda önemli katkılar sağlayarak MXene'lerin fotokatalizör olarak anlamını ortaya koymaktadır.

2.1.3.7. Süperkapasitör Uygulamaları

Süperkapasitörler, hızlı enerji depolama ve salınımı gerektiren uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu uygulamalarda, malzemenin elektrokimyasal performansı, ölçeklenebilirliği ve kimyasal kararlılığı gibi özellikler kritik öneme sahiptir. MXene'ler, bu gereksinimleri karşılayabilecek potansiyele sahip

malzemelerdir. MXene'lerin katmanlar arası boşlukları, yüzey sonlandırmaları, elektrot mimarileri ve kompozit yapıları gibi tasarım stratejileri, süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansını belirleyen önemli faktörlerdir. Özellikle, $Ti_3C_2T_x$ -MXene, metalik iletkenliği ve hızlı, geri dönüşümlü oksidasyon ve indirgeme reaksiyonları sayesinde süperkapasitör uygulamaları için rağbet gören bir seçenektir. Bağımsız $Ti_3C_2T_x$ kâğıt elektrotların, nötr ve bazik elektrolitlerdeki hacimsel kapasitansı $300-400 \text{ F/cm}^3$ aralığında olduğu gösterilmiştir. MXene'ler, giyilebilir ve esnek cihazlarda kullanım potansiyeline sahip oldukları için, son yıllarda mikro ve esnek süperkapasitörler elektrot malzemeleri olarak büyük ilgi görmektedir. Yüksek hacimsel kapasitansları, büyük paketleme yoğunlukları ve hızlı şarj/deşarj oranları sayesinde MXene'ler, yüksek özgül enerji ve güç, uzun döngü ömrü sunmaktadır (Baig vd., 2022). Yüksek yüzey alanı, iyi elektrik iletkenliği, kimyasal stabilite ve büyük özgül kapasitans gibi özelliklere sahip olan MXene'ler, enerji depolama sistemlerinde, özellikle de süperkapasitörlerde (elektrokimyasal kapasitörler) kullanım için son derece uygundur. Örneğin, $Ti_3C_2T_x$ -MXene, yüksek özgül kapasitansı sayesinde enerji yoğunluğu yüksek süperkapasitör elektrotları olarak kullanılabilir ve bu tür MXene tabanlı süperkapasitörler, geleneksel karbon bazlı süperkapasitörlere göre daha fazla enerji depolayabilir. Ayrıca, Mo_2C MXene, yüksek elektrik iletkenliği ve düşük iç direnci sayesinde hızlı şarj vedeşarj özelliklerine sahiptir ve bu özellik elektrikli araçlar ve yüksek performanslı elektronik cihazlar gibi uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır. Uzun döngü ömrü ve kararlılığı ile bilinen Nb_2C MXene, yüz binlerce döngü boyunca kapasitansını büyük ölçüde koruyarak uzun ömürlü süperkapasitörlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Nashim ve Parida, 2022). Giyilebilir elektronikler ve taşınabilir cihazlar için esnek ve hafif enerji depolama cihazları da önemlidir; $Ti_3C_2T_x$ -MXene, esnek polimerlerle birleştirilerek esnek süperkapasitör elektrotları oluşturulabilir ve bu tür süperkapasitörler, giyilebilir elektronik cihazlarda kullanılabilir. Bu nedenle, MXene'ler, süperkapasitör uygulamalarında sundukları yüksek enerji ve güç yoğunluğu, hızlı şarj-deşarj özellikleri, uzun döngü ömrü ve esneklik gibi avantajlar sayesinde dikkat çekmektedir. Bu özellikler, MXene tabanlı süperkapasitörlerin enerji depolama sistemlerinde, özellikle de taşınabilir ve

yüksek performanslı cihazlarda kullanımını mümkün kılarak enerji depolama teknolojilerinde önemli ilerlemeler sağlamaktadır (Forouzandeh ve Pillai, 2020).

2.1.4. MXene Sentez Yöntemleri

MXene'lerin keşfinden sonra, MAX fazlarının aşındırılması için kimyasal ve fiziksel yöntemle sentezi hızla geliştirilmiştir. Bu yöntemler, MXene'lerin çeşitli yapılarını ve özelliklerini elde etmek için optimize edilmiştir. MAX fazında bulunan M-X bağları genellikle yüksek bağlanma gücüne sahip kovalent ve iyonik bağlardır, M-A bağları daha zayıf metalik bağlardır. Bu farklı bağlanma güçleri sayesinde, uygun aşındırıcılar kullanılarak MAX fazındaki "A" katmanları seçici olarak aşındırılabilir. İlk araştırmalarda, Ti_3AlC_2 'den Al katmanlarını uzaklaştırmak için HF kullanılmıştır. Ancak, daha sonraki çalışmalarda HF tabanlı doğrudan ve dolaylı sentez yöntemlerinin yanı sıra alkali ve erimiş tuz aşındırma yöntemleri gibi alternatif prosesler de geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin her biri, istenen MXene bileşimini ve özelliklerini elde etmek için farklı avantajlar ve kısıtlamalar sunar. Örneğin, HF tabanlı yöntemler, spesifik katmanların seçici olarak aşındırılmasını sağlar, bu da farklı MXene yapılarının üretimine olanak tanır. Alkali ve erimiş tuz aşındırma yöntemleri ise, daha geniş bir MXene yelpazesi için potansiyel olabilir, çünkü bu yöntemlerin kullanımı genellikle daha güvenli ve daha kolaydır. Bu gelişmeler, MXene sentez yöntemlerinin sürekli olarak iyileştirildiğini ve çeşitlendiğini göstermektedir, bu da malzemenin potansiyel uygulamalarını genişletmek için önemlidir (C. Wang vd., 2021). MXene sentezindeki gelişmeler, malzemenin spesifik yapılarına ve özelliklerine odaklanarak daha karmaşık ve kontrollü sentez stratejilerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Örneğin, farklı metal katkılarının ve yüzey fonksiyonelleştirmelerinin MXene'lerin yapısal ve elektronik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu tür modifikasyonlar, MXene'lerin katalitik aktivite, elektronik iletim ve termal kararlılık gibi özelliklerini iyileştirebilir veya değiştirebilir (Zamhuri vd., 2021). Ayrıca, sentez sürecinde kullanılan çözücüler, pH değerleri ve aşındırıcıların konsantrasyonları gibi parametrelerin optimizasyonu, MXene üretiminde verimliliği ve ürün kalitesini artırabilmektedir. Bu detaylı yaklaşımlar, MXene'lerin spesifik uygulamalara uyum sağlamalarını ve geniş bir endüstriyel ve bilimsel yelpazede kullanılmalarını sağlamaktadır. Bu

nedenle, MXene sentez stratejilerinin sürekli olarak geliştirilmesi, malzemenin potansiyelini tam olarak ortaya koymak için kritik öneme sahiptir.

2.1.4.1. Hidroflorik Asit Aşındırma

HF aşındırma yöntemi, MXene sentezi için en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir, özellikle Al bazlı MAX fazlarından MXene elde etmek için kullanılmaktadır (Naguib vd., 2012). Bu yöntemde, MAX fazı tozu belirli bir HF sulu çözeltisi içerisine daldırılır. Bu işlem, belirli bir süre oda sıcaklığında karıştırılarak gerçekleştirilir. Elde edilen katılar, santrifüjleme veya süzme yöntemleriyle süpernatanttan ayrılır ve ardından pH değeri 4-6 arasında deiyonize su ile yıkanır. Bu yıkama işlemi, süspansiyonun zayıf asidik hale gelmesini sağlar. Son olarak, elde edilen katılar kurutulularak saf MXene tozu elde edilir. Bu temel HF aşındırma sürecinin yanı sıra, MXene yapılarının daha fazla ayrıştırılması ve optimize edilmesi için bazı kimyasal ve fiziksel işlemler uygulanabilir. Örneğin, izopropil amin, tetrapropil amonyum hidroksit (TPAOH) veya tetra bütül amonyum hidroksit (TBAOH) gibi kimyasalların eklenmesi ve ardından sonikasyon işlemi, MXene ara katman mesafesinin artırılmasını sağlamaktadır (Pouramini vd., 2023). Bu işlemler, MXene katmanlarının daha kolay ayrılmasını ve istenen yapısal özelliklerin elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. HF aşındırma yönteminin avantajları arasında Al tabakasının seçici aşındırılması ve MXene tabakalarının hızlı bir şekilde ayrılabilmesi yer almaktadır. Ancak, HF'nin güçlü aşındırıcı özellikleri, dağlama koşullarının dikkatlice kontrol edilmesini gerektirir. Yanlış koşullarda, MXene yapılarına zarar verebilir veya yüzeylerine zarar verebilmektedir. Ayrıca, HF zararlı bir kimyasal madde olduğu için, bu yöntemin kullanımını sınırlayan bir faktördür. Bu nedenle, HF aşındırma yönteminin etkili ve güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Zhou vd., 2022).

2.1.4.2. Florür Tuzları İle Aşındırma

Florür tuzları ile aşındırma yöntemi, MXene sentezinde HF'nin potansiyel risklerini azaltarak daha güvenli ve kontrollü bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu yöntemde, HF yerine LiF, NaF veya KF gibi florür tuzları ile HCl asit arasında bir reaksiyon (Denklem 2.1) gerçekleştirilmektedir (Ghidiu vd., 2015). Bu reaksiyon

sonucunda, HF asidi yerinde üretilir ve MAX fazı tozu bu çözeltiye eklenerek MXene elde edilir.



Bu yöntemin avantajlarından biri, florür tuzlarının MXene yapısına yerinde interkalasyon yapabilmesidir. Yerinde interkalasyon, MXene katmanlarının arasındaki mesafenin artmasını sağlamaktadır. Bu, iyonların daha hızlı interkalasyonunu ve daha geniş kapasitif aktif bölgelerin oluşumunu teşvik etmektedir. Ayrıca, bu yöntemde kullanılan florür tuzlarının seçimi, MXene yapısının özelliklerini ve performansını etkileyebilmektedir. Florür tuzları ile aşındırma yöntemi, ayrıca MXene yapısının homojenliğini ve kalitesini artırabilmektedir. Örneğin, LiF'in HCl ile kombinasyonu, saf ve yüksek kaliteli çok katmanlı MXene yapısının elde edilmesini destekleyebilir. Bu kombinasyon, katmanların daha iyi ayrılmasını ve istenilen yapısal özelliklerin elde edilmesini sağlayabilmektedir. Bu gelişmeler, MXene sentezinde güvenliği ve verimliliği artırarak malzemenin çeşitli uygulamalarda kullanılmasını daha da yaygınlaştırmaktadır. Bu nedenle, florür tuzları ile aşındırma yöntemi, MXene sentezinde önemli bir rol oynamaktadır ve bu alandaki araştırmalarda potansiyel olarak büyük bir etkiye sahiptir.

2.1.4.3. Kimyasal Buhar Biriktirme

Kimyasal buhar biriktirme (CVD), MXene sentezinde kullanılan florür içermeyen ve genellikle 2B nano tabakalarının üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem, doğrudan gaz fazındaki reaktiflerin yüzeyde birikmesiyle MXene katmanlarının oluşturulmasını sağlar. CVD kullanarak geniş alanlı ve yüksek kaliteli 2B ultra ince α , Mo₂C kristalleri üretebilmektedir. CVD büyüme koşullarının değiştirilmesi, α Mo₂C 'nin 2B yapısının ve morfolojisinin kontrol edilmesini sağlamaktadır. Örneğin, yüksek sıcaklık koşulları genellikle kalınlık büyümesini teşvik ederken, düşük sıcaklık koşulları yanal boyut büyümesine katkıda bulunabilir. Bu, CVD'nin MXene'nin yapısal özelliklerinin özel ihtiyaçlara göre

ayarlanabilmesinde etkilidir. CVD ile üretilen α Mo₂C kristalleri, mükemmel elektriksel, termal ve kimyasal kararlılık göstermektedir (Z. Liu vd., 2014). Bu, bu yöntemin MXene'nin çeşitli uygulamalarında kullanılmasını kolaylaştırır. CVD'nin çok yönlü olması, MXene'nin farklı boyutlarda ve şekillerde üretilmesine olanak tanır, bu da malzemenin potansiyel uygulama alanlarını genişletmektedir. Sonuç olarak, CVD büyütme yöntemi, MXene üretiminde kullanılan etkili ve esnek bir yaklaşımdır. Bu yöntem, MXene'nin gelecekteki araştırma ve geliştirmesine yönelik yeni olanaklar sunmaktadır ve malzemenin çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için daha geniş bir kullanım alanı potansiyeli taşımaktadır.

2.1.4.4. Alkali Aşındırma

Asidik çözelti kullanımı, MXene hazırlığında kritik bir adımdır çünkü protonlar ve florür iyonları, MAX fazından Al ve diğer katkı maddelerinin ayrılmasını kolaylaştırmaktadır. Ancak HF'nin toksik doğası ve MXene'nin performansı için olumsuz etkileri, alternatif yöntemlerin araştırılmasını teşvik etmiştir. Xuan ve arkadaşları, flor içermeyen bir yöntem olan alkali aşındırma kullanarak MAX fazından Al ayrılmasını gerçekleştirmiştir. Bu yöntemde, ağırlıkça %20-30 HF ve tetra metil amonyum hidroksit (TMAH) kullanılmıştır (Z. Wang, 2021; Xuan vd., 2016). Ancak, bu yaklaşımın MXene verimliliği düşük kalmıştır. Alkali aşındırma yönteminin, MXene'nin katmanları arasındaki boşluğu artırması ve tekli bağ F gruplarını azaltması gibi avantajları vardır. Bu, MXene tabakalarının daha kolay ve etkili bir şekilde ayrılmasını sağlamaktadır. Ancak, MXene'nin katmanlarının daha fazla tabakaya ayrılabilmesi için bu yöntemin daha da optimize edilmesi gerekmektedir. Bu tür flor içermeyen yaklaşımlar, MXene'nin endüstriyel uygulamaları için daha güvenli ve çevre dostu bir seçenek sunmaktadır.

2.1.4.5. Erimiş Tuz Aşındırma

Erimiş tuz aşındırma yöntemi, nitrür tabanlı MXene malzemelerinin sentezinde kullanılan yenilikçi bir yaklaşımdır. Karbürler ve karbonitrürlerin yanı sıra, nitrür MXene'ler de endüstride önemli potansiyele sahiptir, ancak nitrür MXene'lerin hazırlanması geleneksel yöntemlerle zordur. Bu zorluk, nitrür MXene'lerin oluşum enerjisinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle,

$Ti_{n+1}N_n$ 'nin $Ti_{n+1}C_n$ 'ye göre daha düşük bir polimerizasyon enerjisine ve daha yüksek bir oluşum enerjisine sahip olduğu belirlenmiştir. Erimiş tuz aşındırma yönteminde, $Ti_{n+1}N_n$ 'nin sentezi için KF, NaF ve LiF gibi florür tuzları kullanılır. $Ti_{n+1}N_n$ ve Al tabakaları, inert bir atmosfer altında yüksek sıcaklıkta eritilen florür tuzları ile işlenir. Bu süreçte, Al tabakası dağlanır ve sonuçta katmanlı metal nitrür ($Ti_nN_nT_x$) MXene elde edilir. Ürün, TBAOH ile kaplanarak faz tozu çıkarılır ve arzu edilen MXene ürünü elde edilir. Bu yöntemin etkinliği, kullanılan sıcaklık ve atmosfer korumasına bağlıdır. Uygun koruma olmadan veya yüksek sıcaklıkta havada ısıtıldığında, ürün kübik faz yapısında elde edilebilir. Bu nedenle, erimiş tuz aşındırma yöntemi, nitrür tabanlı MXene malzemelerinin sentezi için etkili ve özelleştirilebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sürekli geliştirilen yöntem, nitrür MXene'lerin daha geniş bir endüstriyel uygulamaya ulaşmasına olanak tanımaktadır (Mandia vd., 2022).

2.1.5. SMXene'lerin BS ile Sentezi

BS'un Hazırlanması: BS genellikle selüloz üreten bakterilerin, örneğin *Acetobacter xylinum* gibi bakteri türlerinin, uygun bir besin ortamında yetiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu ortam genellikle karbon ve azot kaynakları gibi besin maddeleri ile diğer gerekli mineralleri içerir. Bakteriler, besin ortamındaki şekerler veya diğer karbon kaynaklarını fermante eder ve selüloz nanofibrilleri salgılar. Bu fibriller, kültür ortamının yüzeyinde jel benzeri bir tabaka oluşturur. Belirli bir fermantasyon süresinden sonra, BS tabakası toplanır ve herhangi bir artı kalan ortam bileşenlerini ve bakteriyel hücreleri çıkarmak için iyice yıkanır.

MXene Öncüllerinin Hazırlanması: MXene'ler genellikle ternary karbürler, nitridler veya karbonitridler olarak adlandırılan katmanlı MAX fazlarından türetilir. MAX fazı öncü malzemesi öncelikle sentezlenir veya ticari olarak temin edilir. Genellikle, geçiş metal tozları (titan veya niyobyum gibi), bir grup A elementi (alüminyum veya silikon gibi) ve karbon veya azot kaynakları bir vakum veya inert gaz atmosferinde ısıtılır. Elde edilen MAX fazı tozu, eksfoliasyon veya seçici aşındırma yöntemleriyle 'A' grup elementi katmanlarını kaldırarak MXene nanotablolarını oluşturur.

MXene'nin BS ile Entegrasyonu: Sentezlenen veya ticari olarak temin edilen MXene nanotablolari, uygun bir çözücüde (genellikle su veya organik çözücü) stabilize bir süspansiyon oluşturmak için dağıtılmaktadır. İlk adımda elde edilen BS tabakası, MXene süspansiyonu ile kaplanır veya emdirilir. MXene nanotablolari yüzeye yapışabilir veya BS'un gözenekli yapısına nüfuz edebilir. Kompozit malzeme daha sonra fazla çözücüü uzaklaştırmak ve MXene ile BS arasında iyi bir yapışma sağlamak için kurutulur veya diğer işlemlere tabi tutulmaktadır.

Karakterizasyon ve Uygulama: Sentezlenen MXene-BS kompoziti, yapısal, morfolojik ve kimyasal özelliklerini değerlendirmek için SEM, XRD, FTIR ve termal analiz gibi çeşitli teknikler kullanılarak karakterize edilmektedir. Kompozit malzeme, belirli uygulamalar için gerektiğinde daha fazla işlenir veya fonksiyonelleştirilir. Esnek elektronikler, sensörler, biyomedikal cihazlar ve çevresel iyileştirme gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Genel olarak, MXene-BS kompozitlerinin sentezi, MXene nanotablolari BS matrislerine entegre etmeyi ve çeşitli uygulamalar için özellikleri geliştirilmiş malzemeler üretmeyi içermektedir.

2.1.6. MXene Türevleri

MXene türevleri, farklı yapısal özellikler ve avantajlarla geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. 0D MQDs veya MXene Kuantum Noktaları, MXene yapısının en küçük formunu oluşturur ve atomik veya moleküler seviyede tanımlanabilir. Bu nano boyutları ve iyi çözünürlükleri, fotokataliz ve sensör uygulamaları için idealdir. Fotokataliz, nanoteknoloji ve biyomedikal görüntüleme gibi alanlarda kullanılmaktadırlar. 1D MNRs veya MXene Nanorodları, lineer formda yapılar olup, bu yapılar kısa taşıma uzunlukları ve daha fazla aktif yüzey alanıyla elektrokataliz ve metal iyon pillerinde etkili olabilirler. Elektrokataliz, metal iyon pilleri ve sensörler gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar. 2D MNSs veya MXene Nano levhalı, düzlem şeklinde yapılar olup, büyük düzlem alanları ve iyi elektron iletkenliği sayesinde fotokataliz ve şarj edilebilir piller için mükemmel birer malzeme olarak kabul edilir. 3D MNFs veya MXene Nanoramaları, süngerimsi ve poröz yapıya sahip 3 boyutlu yapılar olup, geniş yüzey alanı ve yapısal stabilite ile fotokataliz ve şarj edilebilir piller gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

Süngerimsi yapısı sayesinde gaz depolama ve ayırma gibi uygulamalar için de uygun olabilirler. Bu türevlerin her biri, belirli uygulama alanları için optimize edilmiş özelliklere sahiptir. MXene malzemelerinin tasarımı ve sentezi, belirli uygulamalara yönelik spesifik gereksinimlere uygun olarak yapılmalıdır. Bu şekilde, MXene türevleri, çeşitli endüstriyel ve bilimsel alanlarda kullanılarak geniş bir potansiyele sahip olabilirler (Sui vd., 2021).

Tablo 1 MXene türevleri ve özellikleri

MXene Türevi	Yapısal Özellikler	Avantajlar	Beklenen Uygulamalar
0D MQDs	Atomik veya moleküler seviyede tanımlanabilir, küçük boyut	- Küçük boyutu - İyi çözünürlük	- Fotokataliz - Nanoteknoloji -Biyomedikal görüntüleme
1D MNRs	Lineer formda, kısa taşıma uzunluğu	- Daha fazla aktif yüzey alanı - Kısa taşıma uzunluğu	-Elektrokataliz - Metal iyon pilleri - Sensörler
2D MNSs	Düzlem şeklinde, büyük düzlem alanları	- Büyük düzlem alanları - İyi elektron iletkenliği	- Fotokataliz - Şarj edilebilir piller - Şeffaf iletkenler
3D MNFs	Süngerimsi, poröz yapı	- Geniş yüzey alanı - Yapısal stabilite	-Fotokataliz - Şarj edilebilir piller - Gaz depolama

MXene'ler, genellikle Ti_3C_2 , Ti_2C , V_2C gibi MAX fazlarından türetilmektedir. Ancak, MXene'lerin sadece bu temel formüllere sahip olmadığını, aynı zamanda bir dizi türevi ve modifikasyonu olduğunu belirtmek önemlidir. Bu türevler ve modifikasyonlar, MXene malzemesinin kimyasal, yapısal ve elektronik özelliklerini değiştirmek için kullanılmaktadır. MXene türevleri çeşitli kimyasal ve yapısal değişiklikleri içerebilmektedir. İşte bazı örnekler:

Kasyon Değişimi: MXene'lerdeki metal katyonu (M) değiştirilebilir. Örneğin, Ti_3C_2 'nin yerini MO_3C_2 , Nb_3C_2 veya diğer metal elementleri alabilir. Bu değişiklikler, malzemenin elektronik yapısını ve kimyasal reaktivitesini etkileyebilir.

Yüzey Fonksiyonizasyonu: MXene yüzeyi, farklı fonksiyonel gruplar (örneğin, -OH, -F, -O) ile modifiye edilebilir. Bu fonksiyonel gruplar, malzemenin kimyasal reaktivitesini, suya karşı davranışını ve elektronik özelliklerini etkileyebilir.

Katlama ve İnceleme: MXene malzemeleri, farklı kat sayılarına sahip olabilir. Tek katmanlı, çok katmanlı veya katlanmış yapılar olabilir. Bu yapısal değişiklikler, malzemenin mekanik dayanıklılığını ve elektronik özelliklerini etkileyebilir.

Ayrıştırma ve İnterlayer Aralığı: MXene katmanları arasındaki mesafe, katmanlar arasında bulunan moleküller veya iyonlar ile değiştirilebilir veya ayarlanabilir. Bu, malzemenin porozite, gaz depolama kapasitesi ve reaktivite gibi özelliklerini etkileyebilir.

Alaşım ve Kompozit Formülasyonları: MXene'ler, diğer malzemelerle alaşım veya kompozit formülasyonları oluşturmak için kullanılabilir. Bu, MXene'nin mekanik dayanıklılığını artırabilir veya elektronik ve optik özelliklerini iyileştirebilir.

Temel Değişiklikler: Bazı durumlarda, MXene yapıları tamamen değiştirilebilir. Bu değişiklikler, MXene'nin temel bileşimini ve yapısal özelliklerini kökten değiştirebilir.

Bu türevler ve modifikasyonlar, MXene'nin farklı uygulamalar için özelleştirilmesini sağlamaktadır. Kimyasal, elektronik, optik ve manyetik özelliklerin bu değişikliklerle nasıl etkilendiğini anlamak, MXene'nin potansiyelini tam olarak anlamak için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, MXene türevleri ve modifikasyonları

üzerine yapılan araştırmalar, malzemenin farklı uygulamalarda nasıl optimize edilebileceğini anlamak için önemlidir.

2.1.7. MXene Üretilmesi

MXene'ler, katmanlı MAX fazlarından seçici olarak alüminyumun çıkarılmasıyla oluşturulur. Bu eksfoliasyon süreci sayesinde karbür katmanları, sadece birkaç atom kalınlığında iki MXene levhasına ayrılır. MXene'ler, malzemenin benzersiz özelliklerini kullanabilmek için bazen gereken bir adım olan interkalsasyon adı verilen bir süreçle katmanları arasında çeşitli iyonlar ve molekülleri alabilirler. Örneğin, MXene levhaları arasına lityum iyonları yerleştirerek, bunların hem lityum-iyon pilleri hem de elektrokimyasal kapasitörler için umut verici malzemeler haline gelebileceği gösterilmiştir. Serbest duran MXene pullarını sentezlemek için teknikler geliştirdiler ve bu sürece minimal yoğunlukta katman eksfoliasyonu (MILD) adını verdiler. Büyük MAX fazını florür tuzu ve hidroklorik asit içeren bir aşındırıcı ile işlediler ve titanyum karbür katmanları arasındaki istenmeyen alüminyum katmanlarını seçici olarak çıkardılar. Ardından, işlenmiş malzemeyi manuel olarak sallayarak titanyum karbür katmanlarını ayırdılar ve topladılar. Her bir katman beş atom kalınlığındadır ve üç titanyum levhasını bağlayan karbon atomlarından oluşmaktadır. MAX'in aşındırılması ve eksfoliasyonu, bu serbest duran MXene katmanlarının birçoğunu üretir. Bu nispeten basit teknik, üretim ölçeğinde üretimi mümkün kılabilir. O zamandan beri devam eden keşifler, enerji depolama yetenekleri, elektromanyetik girişimi engelleme, suyun arıtılması ve hatta bakterilere karşı koruma gibi olağanüstü yeteneklerini ortaya koymuştur. Ve son araştırmalar, MXene'lerin aynı türdeki en dayanıklı malzeme olduğunu göstermektedir. MXene alaşım bileşimlerinin birçoğ olmasına rağmen, çoğu stabil olmayacaktır. Malzeme bilimcilerin karşılaştığı zorluk, oluşum enerjisi en düşük ve dolayısıyla en yüksek stabiliteye sahip olanları belirlemek için büyük bir alaşım konfigürasyonu arasından etkili bir şekilde geçmek nasıl olacağıdır. Geleneksel "ilk prensipler" hesaplama yaklaşımları, bu taramanın uygulanabilir olmadığı için çok hesaplama yoğunudur.

MXene'ler için olası kompozisyonların yüksek verimli taraması, araştırmacılara milyonlarca olası malzeme tarifinden en iyi adayı seçme konusunda kıymetli yönlendirme sağlar. MXene'lerin bu geniş uygulama yelpazesi, malzemenin sentezlenmesi, modifikasyonu ve karakterizasyonu üzerine yapılan araştırmaların sürekli artmasını sağlamıştır. Özellikle, MXene'lerin elektronik, manyetik, optik ve dielektrik özelliklerinin detaylı bir şekilde anlaşılması, onların farklı endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda nasıl kullanılabileceğini belirlemek için kritiktir. MXene'lerin üretim süreci, malzemenin kalitesi, saflığı ve uygulama özelliklerini belirleyen kritik bir faktördür. MILD gibi gelişmiş yöntemler, MXene levhalarının homojen kalitesini ve miktarını artırırken, aynı zamanda üretim maliyetlerini düşürebilir (Cui vd., 2023). Bu tür teknolojik gelişmeler, MXene'lerin ticari üretiminin ve endüstriyel kullanımının daha yaygın hale gelmesine katkıda bulunabilir. MXene'lerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini optimize etmek için yapılan modifikasyonlar, malzemenin belirli uygulamalara özgü ihtiyaçlarını karşılamak için esastır. Yüzey fonksiyonallasyonu, interlayer aralığı ayarlama ve alaşım formülasyonları gibi yöntemler, MXene'lerin performansını ve dayanıklılığını artırabilir. Son olarak, MXene'lerin endüstriyel uygulamalarının genişlemesi, sürdürülebilirlik ve yeşil teknolojiler gibi alanlarda daha etkili ve verimli çözümler sağlayabilir. Bu, enerji depolama, su arıtma, elektromanyetik koruma ve antibakteriyel uygulamalar gibi alanlarda MXene tabanlı yenilikçi ürünlerin geliştirilmesini teşvik edebilir. Bu nedenle, MXene araştırmalarının devam etmesi, malzemenin potansiyelini tam olarak ortaya çıkaracak ve gelecekte daha sürdürülebilir ve yenilikçi teknolojilere yol açacaktır (Lim vd., 2022).

MXene üretimi, karmaşık ve dikkat gerektiren bir süreçtir. Bu süreçte, malzemenin kalitesi, saflığı ve son özellikleri, kritik adıma bağlıdır. İşte MXene üretimi sırasında dikkat edilmesi gereken detaylar:

Malzeme Seçimi: İlk adım, yüksek kaliteli ve saflıkta MAX fazı seçmektir. MAX fazının kalitesi, son ürününün yapısal ve elektronik özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olacaktır. Bu nedenle, başlangıç malzemesinin saflığı ve homojenliği, istenilen MXene ürünlerinin elde edilmesi için esastır.

Etchant Seçimi: Etchant (kimyasal aşındırıcı) seçimi, MAX fazından alüminyumun seçici olarak çıkarılması için kritiktir. Farklı etchant kombinasyonları, MXene ürünlerinin yapısal ve elektronik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Optimal etchant kombinasyonunun belirlenmesi, ürün verimliliğini ve kalitesini artırabilir.

Sıcaklık ve Süre Kontrolü: Etching sürecinin sıcaklık ve süresi, MXene levhalarının kalitesi ve homojenliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Optimal şartların belirlenmesi ve bu şartların sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, ürünün homojenliğini ve kalitesini optimize edebilir.

Yıkama ve Temizleme: Etching işlemi sonrasında, malzemenin etchant kalıntılarından tam olarak temizlenmesi önemlidir. Bu adım, istenmeyen yan ürünlerin ve kontaminantların malzemedan uzaklaştırılmasını sağlar, bu da ürünün saflığını ve homojenliğini artırabilir.

Depolama Koşulları: Elde edilen MXene ürünlerinin doğru depolama koşullarında saklanması, ürünün stabilitesini ve uzun ömürlülüğünü sağlar. Nem ve oksijen ile temasın önlenmesi, malzemenin bozulmasını ve özelliklerinin değişmesini önleyebilir.

Karakterizasyon: Üretilen MXene ürünlerinin doğru bir şekilde karakterize edilmesi, üretim sürecinin etkinliğini değerlendirmek için kritiktir. Bu, malzemenin yapısal, kimyasal ve elektronik özelliklerinin doğru bir şekilde anlaşılmasını ve optimize edilmesini sağlar.

Güvenlik Önlemleri: MXene üretimi sırasında kullanılan kimyasalların potansiyel tehlikeleri ve güvenlik önlemleri hakkında bilgi sahibi olmak ve uygun kişisel koruyucu ekipmanları (KKD) kullanmak önemlidir. Kimyasal maddelerle çalışırken güvenli bir şekilde davranmak, çalışanların sağlığını ve güvenliğini sağlar.

Bu detaylar, MXene üretim sürecinin karmaşıklığını ve hassasiyetini göstermektedir. Her adımın dikkatli bir şekilde yönetilmesi, istenilen MXene ürünlerinin elde edilmesi ve malzemenin potansiyelinin tam olarak açığa çıkarılması için kritiktir.

2.2. BAKTERİYEL SELÜLOZ

BS, biyomedikal alanda yaygın kullanıma sahip çok yönlü bir biyomalzemedir. Bu malzeme, bakteriler gibi mikroorganizma grupları tarafından, uygun ortamların varlığında statik veya çalkalanan fermentasyon süreçleri aracılığıyla sentezlenir. Saf selüloz, biyopolimerlerle pozitif etkileşime girebilmektedir. Ancak, BS'un yüksek nem içeriği, hidrofobik biyopolimerlerle uyumu azaltabilir. BS'un mekanik özellikleri, doku mühendisliği, tıbbi implantlar ve biyofilmle mücadele gibi uygulamalarda önemli parametrelerdir. BS'un geniş tıbbi ve endüstriyel kullanımı, ekonomik olarak üretiminin ölçeklendirilmesini gerektirmiştir. BS, farklı bakteriler tarafından statik veya sallantılı fermentasyon süreçleri sırasında üretilen nanofibrillerden oluşan hücre dışı bir polisakkarittir. Bakteriler, farklı karbon kaynakları içeren ortamlarda BS üretirler. Fakat, BS üretim verimliliği kullanılan büyüme substratlarına göre değişir. Substratlar, bakteriyel metabolizmanın yorucu enerji tüketen selüloz sentezi yolunda enerji sağlamaktadır. Glikoza metabolize edilen her karbon bloğu teorik olarak selüloz üretimi için kullanılabilir. BS üretim kapasitesi bakteriler arasında yaygın olsa da en bilinen BS üreticisi *Komagataeibacter xylinus* türüdür. Bu tür, α -Proteobacteria sınıfına ait aerobik Gram-negatif bakterilerdir. Asetik asit bakterilerinin selüloz üretimi için kullanımında önemli bir yön, gıda sınıfı veya GRAS (genel olarak güvenli olarak tanınmış) bakteriler olmalarıdır.

BS, bakteriyel membranda nükleotit-aktive glukozdan sentezlenir. Bakteriler, BS D-glukoz birimlerinden oluşan fibriller olarak hücre zarının gözeneklerinden geçirirler ve bunlar β -1,4-glikozidik bağlarla bağlanır. Zincir doğrudur ve hücreden dışarı çıkarılır. Daha sonra yan yana ve tek yönlü hizalanmış zincirler, tüm mevcut hidroksil grupları aracılığıyla iç ve ara zincir hidrojen bağları oluşturur. Bu şekilde, zincirler, 25 nm genişliğinde ve 1 ila 9 μ m uzunluğunda, yani 2000 ila 18.000 glukoz artığı olan çözünmeyen nanofibrillere birleşir. Bu nanofibriller, 100 nm genişliğinde şerit şeklindeki fibrillere daha da agregatlanır ve bu da BS'a yüksek su tutma kapasitesi, hidrofilitiklik, kristallik ve şekillendirilebilirlik gibi benzersiz özelliklerin kombinasyonunu sağlamaktadır (Gorgieva ve Trček, 2019). Selüloz polimerinin neredeyse tüm hidroksil grupları hidrojen bağları ile dolu olsa da her selüloz

polimerinin bir ucunda modifiye edilmemiş bir C4-hidroksil grubu, diğer ucunda ise serbest bir C1-hidroksil grubu bulunur ve her ikisi de selülozun kimyasal modifikasyonları için olası ihtimalleri temsil etmektedir. Nükleotit-aktif glukozun sentezi bakteriyel sitoplazmada gerçekleşir. Başlangıç substratı glukoz ise, üridin difosfat (UDP)-glukoz üç adımda üretilir: glukokinas tarafından glukozun fosforilasyonu, fosfoglukomutaz tarafından glukoz-6-fosfatın glukoz-1-fosfata izomerizasyonu ve uridiltransferaz (UTP)-glukoz-1-fosfat tarafından UDP-glukozun sentezi. Son olarak, selüloz sentaz, UDP-glukozdan glukozil artıklarını yeni oluşan β -D-1,4-glikan zincirine aktarır. Selüloz sentaz, iki veya üç alt birimden oluşan, membrana gömülü bir glikoziltransferazdır (Torres vd., 2012). Selüloz sentazın katalitik alt birimi, BS'un kimyasal ve fiziksel özelliklerinin önemli bir belirleyicisidir, bu da farklı bakteri türlerinin farklı uzunlukta selüloz üretebileceği anlamına gelmektedir. Asetik asit bakterilerinin genomlarının karşılaştırılması, bu BS üretimi için daha fazla operona sahip olabileceğini ve ayrıca operonların bileşiminin birbirinden farklı olduğunu ortaya koymuştur. Bu farklılıklar büyük olasılıkla selüloz sentezi, selülozun hücre yüzeyine taşınması ve/veya fibrillerin seritlere monte edilmesi üzerinde etkisi vardır.

2.2.1. BS Yapısı

Selüloz, doğada en yaygın olarak bulunan polisakkarittir ve bitkiler, algler ve bakteriler gibi birçok organizma tarafından üretilmektedir. *G. xylinum* bakterisi tarafından üretilen BS, özellikle endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda önemli bir malzeme olarak kabul edilmektedir. BS, bitkisel selüloza benzer kimyasal yapıya sahip olmasına rağmen, fiziksel ve morfolojik özelliklerinde belirgin farklılıklar göstermektedir. BS'un nanofiberleri, bant benzeri yapılar oluşturur ve tipik olarak ortalama 100 nm çapında ve 100 μ m uzunluğundadır. Bu bantlar, selüloz mikrofibrillerinin demetler halinde bir araya gelmesiyle oluşur. Ayrıca, BS'un A ve S olmak üzere iki farklı üç boyutlu yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu yapılar, üretim koşullarına ve bakteri türüne bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Choi vd., 2022).

Selülozun kristal yapıları, X-ışını, NMR, Raman spektroskopisi ve IR analizler gibi tekniklerle tespit edilebilir. BS'un iki ana kristal formu, selüloz I ve selüloz II'dir. Selüloz I, paralel glukoz zincirlerine ve intramoleküler hidrojen bağlarına sahip mikro lifli yapıdaki kristalografik formudur (J. Wang vd., 2019). Selüloz II ise, alkali maddelerle işlem görmüş doğal selülozun suyla yıkanmasıyla elde edilir. Hidrojen bağları, selülozun kristalin yapısının oluşmasında kritik bir rol oynar ve bu yapı, selülozun mekanik dayanıklılığını ve direncini belirlemektedir. Amorf bölgeler ise hidrolize daha duyarlıdır ve selülozun enzimatik parçalanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

2.2.2. BS Özellikleri

BS, bakteriyel mikroorganizmaların fermantasyon süreciyle sentezlediği doğal bir polisakkarittir. Özellikle *G. xylinum* gibi bakteri türleri, yoğun ve kompakt selüloz matlarını üretme yeteneğine sahiptir. Bu matlar, BS'un kimyasal ve fiziksel özelliklerine dayanır.



Şekil 3 BS özellikleri

2.2.2.1. Kimyasal Özellikleri

BS, D-glukoz moleküllerinin β -1,4-glikozidik bağlarla bağlanması sonucu oluşan doğrusal bir polisakkarittir. Bu kimyasal yapı, temel olarak bitkisel selüloza benzerlik gösterir; fakat mikro fibrillerin morfolojisi ve kristal yapıları arasında belirgin farklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar, BS'un benzersiz fiziksel, mekanik ve biyolojik özelliklerini belirleyen kritik faktörlerdir. β -1,4-Glikozidik Bağlar; BS'un temel yapı taşı olan D-glukoz molekülleri, β -1,4-glikozidik bağlarla bir araya gelerek uzun, doğrusal zincirler oluşturur. Bu bağlar, selüloz molekülünün stabilitesini ve bütünlüğünü sağlamaktadır.

Bitkisel Selüloza Benzerlik; Kimyasal olarak, BS, bitkisel selülozla benzer yapıya sahiptir. Her ikisi de D-glukoz moleküllerinin β -1,4-glikozidik bağlarla birleşmesiyle oluşan polisakkarit zincirlerinden oluşmaktadır. Ancak, mikrofibrillerin morfolojisi ve kristal yapılarındaki farklılıklar, bu iki selüloz türü arasında önemli ayırt edici özelliklere neden olmaktadır.

Mikrofibrillerin Morfolojisi; BS'un mikrofibrilleri, tipik olarak daha ince ve düzenli bir yapıya sahiptir. Bu mikrofibriller, bakteriyel hücrelerin yüzeylerinde düzenli ve paralel bir şekilde dizilir, bu da kompakt ve yoğun selüloz matlarının oluşmasına yol açmaktadır.

Kristal Yapı; BS'un kristal yapısı, genellikle bitkisel selüloza göre daha az düzenlidir. Bu, selülozun mekanik özelliklerini, elastikiyetini ve hidrofobik özelliklerini etkileyen kritik bir faktördür. Bu kristal yapı, X-ışını kırınımı ve diğer analitik tekniklerle ayrıntılı olarak karakterize edilebilmektedir.

BS'un kimyasal yapısı, bitkisel selüloza benzer temel özelliklere sahip olsa da mikrofibrillerin morfolojisi ve kristal yapısındaki farklılıklar, bu iki selüloz türü arasında önemli ayırt edici özelliklere neden olmaktadır.

2.2.2.2. Fiziksel Özellikleri

BS, özel fiziksel özelliklere sahip bir polisakkarittir. Bu özellikler, onun endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmasını önemli kılar.

Mekanik Dayanıklılık ve Elastikiyet; BS'un mekanik dayanıklılığı yüksektir. Bu dayanıklılık, hidrojen bağları tarafından sağlanır. Hidrojen bağları, selüloz molekülleri arasında kuvvetli bağlar oluşturarak materyalin mekanik dayanıklılığını artırır. Bu, BS'un yüksek mukavemet ve darbe direncine sahip olmasını sağlar. Elastikiyet, BS'un gerilme altında şekil değiştirebilme yeteneğini ifade etmektedir. Selülozun kristalin yapıları, elastikiyetini ve esnekliğini belirleyen önemli faktörlerdir. Bu, malzemenin esnek ve bükülebilir olmasını sağlar, bu da çeşitli uygulamalar için uygunluğunu arttırmaktadır.

Hidrofilik Özellikler; BS, doğal olarak hidrofiliktir, yani suyu emebilir ve tutabilir. Bu özellik, selülozun suyla etkileşime girmesini ve suyu etkili bir şekilde emmesini sağlamaktadır. Yüksek su emme kapasitesi, BS'un kendi ağırlığının çok üzerinde su tutabilmesine olanak tanımaktadır. Bu, malzemenin nemli koşullarda stabil kalmasını ve su bazlı uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılar.

Mikrofibril Yapısı ve Porozite; BS'un mikrofibril yapısı, kompakt ve düzenli bir yapıya sahiptir. Bu mikrofibriller, materyalin homojen bir yapıya sahip olmasını sağlar. Ayrıca, bu yapı, malzemenin porozitesini etkiler. Yüksek porozite, BS'un gaz ve sıvı akışını kolaylaştırır, bu da belirli uygulamalarda avantajlıdır.

BS'un yüksek mekanik dayanıklılığı, elastikiyeti, hidrofilik özelliği ve özel mikrofibril yapısı, onun birçok endüstriyel ve biyomedikal uygulama için ideal bir malzeme yapmaktadır. Bu özellikler, yara iyileştirme malzemeleri, nem emici ürünler, biyoaktif kaplamalar, gıda ambalajı ve tıbbi implantlar gibi çeşitli alanlarda kullanılmasını sağlamaktadır.

2.2.2.3. BS'un Saflığı

BS, doğal bir polisakkarit olan selülozun saf bir formunu temsil eder. Bitkisel kaynaklardan elde edilen selüloz genellikle kompleks bir yapıya sahipken, BS tamamen saf bir selüloz formuna sahiptir.

BS'un Kompozisyonu; Çoğu bitki, selülozun yanı sıra hemiselüloz ve lignin gibi diğer bileşenleri de içerir. Genellikle bitkinin iskelet yapısında bulunan selülozun oranı %40 ila %60 arasında değişirken, hemiselüloz oranı %20 ila %40 ve

lignin oranı ise %10 ila %25 arasında değişmektedir. Bu bileşenler, bitkisel selülozun fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkiler ve kompleks bir yapı oluşturmaktadır.

BS'un Saf Yapısı; BS, bakteri metabolizmasının bir ürünü olarak doğrudan hücre dışında sentezlenmektedir. Bu nedenle, BS doğal olarak saf bir selüloz formu oluşturur. Nanoporöz lif yapısı ve porları sayesinde, BS'un saflığı ve homojenliği benzersizdir. Bu yapısı, yüksek saflık derecesini ve düşük kontaminasyon riskini sağlamaktadır.

2.2.2.4. Mekanik Yapısı

BS, kendine özgü mekanik özelliklere sahip olan bir polisakkarittir.

Yüksek Kristalizasyon Derecesi; BS'un kristalizasyon derecesi oldukça yüksektir. Bu yüksek kristalizasyon derecesi, BS'un suda çözünmeyen, elastik ve yüksek gerilime dirençli bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır.

Yüksek Yüzey Alanı ve Su Tutma Kapasitesi; BS'un yüzey alanı, bitkisel selüloza göre yaklaşık 200 kat daha büyüktür. Yüzey alanı, BS'un yüksek su tutma kapasitesine sahip olmasını sağlamaktadır (Bielecki vd., 2005). Bu özelliği sayesinde, BS nemli koşullarda stabil kalabilir ve su bazlı uygulamalar için ideal bir malzemedir.

Mikrofibril Yapısı; BS'un mikrofibrilleri, bitkisel selülozun fibrillerinden yaklaşık 100 kat daha incedir ve gözenekli bir yapıya sahiptir. Selülozun sentezlenmesi sırasında, glukoz zincirleri bakteri hücre duvarından salgılanır ve nanofibril selüloz şeritleri oluşturmak üzere bir araya gelir. Bu şeritler, BS'un birbiri etrafında birikerek örümcek ağı şeklinde bir yapı oluşturmaktadır (Chawla vd., 2009).

Dayanıklılık ve Elastikiyet; BS'un dayanıklılığı ve elastikiyeti, bu yüksek kristalizasyon kabiliyetinin bir sonucudur. BS fibrilleri, sıkıca paketlenerek kristallenir ve bu da malzemenin mekanik dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu özellikler, yara iyileştirme, biyoaktif kaplamalar, gıda ambalajı ve tıbbi implantlar gibi uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır.

BS'un yüksek kristalizasyon derecesi, yüksek su tutma kapasitesi, özgün mikrofibril yapısı ve mükemmel mekanik özellikleri, onu çeşitli endüstriyel ve biyomedikal uygulamalar için ideal bir malzeme yapar. Bu özellikler, BS'un birçok uygulamada kullanılmasını ve potansiyel olarak yeni ve yenilikçi uygulamaların geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

2.2.2.5. BS Biyouyumluluk

BS, biyouyumluluk açısından dikkate değer bir materyal olarak kabul edilir. Özellikle, insan vücudunda bulunmayan β -glikozidaz enzimi olmadığı için BS, biyouyumluluğa sahip bir materyal olarak değerlendirilir.

***In Vitro* Biyouyumluluk Çalışmaları;** BS'un biyouyumluluğu birçok *in vitro* çalışma ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarda, BS'un insan kökenli hücrelerle etkileşimde bulunduğu olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, BS'un insan hücreleriyle uyumlu olduğunu ve toksik olmadığını göstermektedir.

***In Vivo* Biyouyumluluk Çalışmaları;** BS'un *in vivo* biyouyumluluğu fare modelinde incelenmiştir. Farelere subkutan olarak BS membran implantasyonu yapılmış ve fareler 90 günlük bir süre boyunca doku takibine alınmıştır. Çalışmanın sonuçları oldukça olumlu olup, 12 haftalık süre zarfında subkutan olarak uygulanan BS'un farelerde herhangi bir yabancı doku reaksiyonuna, şişlik, kızarıklık, ödem ya da immun reaksiyona yol açmadığını göstermiştir. Bu bulgular, BS'un konak dokuya mükemmel bir şekilde entegre olduğunu ve vücudun bu materyali reddetmediğini göstermektedir.

BS, biyouyumluluk açısından güvenli ve etkili bir materyal olarak kabul edilir. Hem *in vitro* hem de *in vivo* çalışmalar, BS'un insan hücreleriyle uyumlu olduğunu ve vücutta yabancı doku reaksiyonu oluşturmadığını göstermektedir.

2.2.2.6. Biodegrasyon

BS biyolojik olarak parçalanması, genellikle hidroliz yoluyla gerçekleşir. Doğada, selülozun parçalanması enzimatik aktiviteye bağlıdır ve bu süreç, doğal bir çevrede genellikle zaman alıcıdır.

Enzimatik Olmayan Biyodegradasyon; BS, insan vücudunda β -(1-4) glikozidaz enziminin eksikliği nedeniyle yavaş bir biyodegradasyona sahiptir. Bu enzim, selülozun doğal olarak parçalanmasında önemli bir rol oynar ve insan vücudunda bulunmamaktadır. Ayrıca, yüksek kristalizasyon indeksi, hidroliz reaksiyonlarının gerçekleşmesini daha da zorlaştırır.

Yavaş Biyodegradasyon ve Biyoçözünürlük; BS'un yavaş biyodegradasyonu, bu malzemenin biyolojik olarak aktif çevrelerde uzun süre kalmasını sağlar. Non-enzimatik, kendiliğinden bir biyodegradasyon süreci de mümkün kılmaktadır.

Biyomateryal Sınıflandırması; Bu yavaş biyodegradasyon özelliği nedeniyle, az miktarda biyodegrade olan biyomateryaller sınıfına dahil edilmektedir. Uzun süreli uygulamalar için ideal olabilecek dayanıklı ve stabil bir materyal sağlamaktadır.

BS'un biyolojik olarak yavaş bir şekilde parçalanması, bu malzemenin dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü vurgulamaktadır.

2.2.2.7. Biyoaktif Özellikleri

BS, doğal olarak biyouyumludur ve yüzey modifikasyonu veya kimyasal işlemlerle biyoaktif özelliklere sahip hale getirilebilir. Bu modifikasyonlar, BS'un tıbbi ve farmasötik uygulamalarda kullanılmasının potansiyelini yaygınlaştırmaktadır.

Antibakteriyel Özellikler; Yüzey modifikasyonu ile, antibakteriyel özellikler kazandırılabilir. Bu, BS'un yüzeyinde bulunan bileşenlerin değiştirilmesi veya antimikrobiyal ajanların entegrasyonu yoluyla gerçekleştirilebilir. Antibakteriyel BS, enfeksiyon riskini azaltmaya yardımcı olabilir ve tıbbi implantların veya yara örtüsü olarak kullanıldığında enfeksiyon kontrolünde etkilidir.

Antienflamatuar Özellikler; Bazı kimyasal işlemlerle, BS'un antienflamatuar özelliklere sahip olması sağlanabilir. Bu, BS'un inflamasyonu azaltmaya ve dokuların iyileşme sürecini desteklemeye yardımcı olmaktadır.

Diğer Biyolojik Aktiviteler; Biyoaktifliği sadece antibakteriyel ve antiinflamatuvar özelliklerle sınırlı değildir. BS'un kimyasal yapısal özellikleri ve yüzey özellikleri, hücre adhezyonu, hücre proliferasyonu ve doku rejenerasyonu gibi diğer biyolojik aktiviteleri etkilemektedir.

BS'un biyoaktif özelliklerinin modifiye edilmesi, malzemenin tıbbi ve farmasötik uygulamalardaki kullanım alanını genişletmektedir. Antibakteriyel, antiinflamatuvar ve diğer biyolojik aktiviteler, yara iyileştirme, doku mühendisliği, tıbbi implantlar ve diğer biyomedikal uygulamalarda etkili ve güvenli bir seçenek olmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, BS'un tedavi edici ve iyileştirici kapasitesini artırarak modern tıbbın ihtiyaçlarına cevap vermektedir.

2.2.2.8. Kristal Yapı

BS'un kristal yapısı, genellikle iki ana formda gözlemlenir: selüloz I ve selüloz II. Her iki form da farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olup, bu özellikler BS'un genel özelliklerini belirleyen kritik faktörlerdir.

Selüloz I, genellikle doğal olarak üretilen BS'un ana kristal formudur. Bu form, paralel düzenlenmiş glukoz zincirlerinden oluşmaktadır. Mikro lifli bir yapıya sahip olan selüloz I, bu zincirler arasında yoğun intramoleküler hidrojen bağlarına sahiptir. Bu bağlar, kristal yapının stabilitesini artırır ve selülozun mekanik dayanıklılığını sağlamaktadır. Selüloz I'in bu yoğun kristal yapısı, malzemenin elastikiyetini ve diğer mekanik özelliklerini belirlemektedir.

Selüloz II, alkali işlem görmüş doğal selülozun suyla yıkanmasıyla elde edilen bir formdur. Bu işlem, selülozun kimyasal yapısında bazı değişikliklere neden olur, bu da farklı bir kristal yapının oluşmasına yol açmaktadır. Selüloz II'nin kristal yapısı, selüloz I'e göre farklı özelliklere sahip olabilir, bu da BS'un uygulama alanlarını ve performansını etkilemektedir.

Kristal yapının bu iki farklı formu, BS'un mekanik özelliklerini, elastikiyetini ve diğer fiziksel özelliklerini belirlemektedir. Kristal yapı, selülozun dayanıklılığını, çekme mukavemetini, su emme kapasitesini ve kimyasal direncini etkileyen anahtar bir faktördür. Ayrıca, selülozun bu kristal yapıları, malzemenin biyoaktif

özelliklerini ve biyouyumluluğunu da etkileyebilir, bu da BS'un tıbbi ve farmasötik uygulamalar için uygunluğunu belirlemektedir.

2.2.3. BS Üretim Yöntemleri

BS'un üretimi, genellikle mikroorganizmaların uygun besin ortamlarında kültüre alınmasıyla gerçekleştirilmektedir. *Bacillus*, *Acetobacter*, *Gluconacetobacter* gibi bakteri türleri BS üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bazı üretim yöntemleri:

2.2.3.1. Yüzey Kültürü Yöntemi

Yüzey kültürü yöntemi, BS üretimi için en eski ve basit yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, bakteriler uygun besin ortamında yüzeyde büyütülür ve bu süreçte selüloz üretilmektedir. Bu yöntemin detayları:

Besin Ortamının Hazırlanması: Selüloz üretimi için uygun bir besin ortamı hazırlanır. Bu ortam, genellikle karbon kaynağı olarak glukoz veya sukroz, azot kaynağı olarak amonyum nitrat veya amonyum sülfat, mineral tuzlar ve diğer gerekli besin maddelerini içerir. Besin ortamının pH değeri, bakterilerin optimum büyüme ve selüloz üretimi için uygun bir seviyede tutulur.

Kültür Hazırlığı: Hazırlanan besin ortamı, sterilize edilmiş kaplara dökülür. Daha sonra, uygun bir bakteri kültürü bu besin ortamına eklenir. Bakteriler, besin maddelerini kullanarak çoğalır ve selüloz üretimine başlarlar.

Selüloz Üretimi: Bakteriler, glukoz moleküllerini β -1,4-glikozidik bağlarla birleştirerek doğrusal bir polisakkarit olan selülozu sentezler. Bu süreçte, bakteri hücre duvarından salgılanan selüloz nanofibrilleri, bir araya gelerek yoğun matlar veya filmler oluşturur.

Kültür Koşullarının Kontrolü: Yüzey kültürü sırasında, oksijenin optimum düzeyde sağlanması için kültürün havalandırılması önemlidir. Ayrıca, besin ortamının sıcaklığı, pH değeri ve diğer fiziksel parametrelerin sürekli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir.

Selüloz Matının Toplanması: Selüloz üretimi tamamlandığında, oluşan selüloz matı sterilize edilerek toplanır ve uygun şekilde kurutulur. Daha sonra, selülozun istenilen formda kullanılması için uygun işlemler uygulanır.

Avantajları ve Dezavantajları:

Yüzey kültürü yönteminin avantajları arasında basitliği, düşük maliyeti ve kolay uygulanabilirliği yer alır. Ancak, bu yöntemle elde edilen selülozun homojenliği ve kalitesi, diğer üretim yöntemlerine göre daha düşük olabilir. Ayrıca, büyük ölçekli üretimler için bu yöntem genellikle daha az verimlidir. Sonuç olarak, yüzey kültürü yöntemi, başlangıç seviyesinde veya küçük ölçekli BS üretimleri için uygun bir seçenek olabilir. Ancak, yüksek kaliteli ve homojen selüloz üretimi için daha ileri teknoloji ve optimize edilmiş yöntemler tercih edilebilir.

2.2.3.2. Sıvı Kültürü Yöntemi

Sıvı kültürü yöntemi, BS üretimi için daha kontrollü ve ölçeklenebilir bir yöntemdir. Bu yöntemde, bakteriler sıvı besin ortamında süspansiyon kültürü olarak üretilir. Bu yöntemin detayları:

Besin Ortamının Hazırlanması: Sıvı kültürü için uygun bir besin ortamı hazırlanır. Bu ortam, genellikle karbon kaynağı olarak glukoz veya sukroz, azot kaynağı olarak amonyum nitrat veya amonyum sülfat, mineral tuzlar ve diğer gerekli besin maddelerini içerir. Besin ortamının pH değeri, bakterilerin optimum büyüme ve selüloz üretimi için uygun bir seviyede tutulur.

Kültür Hazırlığı: Hazırlanan besin ortamı, sterilize edilmiş fermentasyon tanklarına dökülür. Daha sonra, uygun bir bakteri kültürü bu besin ortamına eklenir. Agitasyon (karıştırma) yöntemiyle, besin maddeleri homojen bir şekilde dağılır ve bakterilerin optimum büyüme koşullarına ulaşması sağlanır.

Selüloz Üretimi: Bakteriler, glukoz moleküllerini β -1,4-glikozidik bağlarla birleştirerek doğrusal bir polisakkarit olan selülozu sentezler. Agitasyon sayesinde, selüloz nanofibrilleri sürekli olarak karıştırılır ve homojen bir selüloz üretimi sağlanır.

Kültür Koşullarının Kontrolü: Sıvı kültürü sırasında, agitasyon hızı, besin ortamının sıcaklığı, pH değeri ve oksijen seviyesi gibi parametreler sürekli olarak kontrol edilir. Bu kontroller, bakterilerin optimum büyüme ve selüloz üretimi için gereklidir.

Selüloz Matının Toplanması: Selüloz üretimi tamamlandığında, oluşan selüloz matı sterilize edilerek toplanır. Daha sonra, selülozun istenilen formda kullanılması için işlemler uygulanır.

Avantajları ve Dezavantajları:

Sıvı kültürü yönteminin avantajları arasında kontrollü üretim ortamı, yüksek verimlilik ve ölçeklenebilirlik yer alır. Bu yöntem, büyük ölçekli üretimler için idealdir ve homojen selüloz üretimi sağlar. Ancak, yüksek maliyetli ekipman ve operasyonel gereklilikler nedeniyle başlangıç maliyetleri yüksek olabilir. Nihayetinde, sıvı kültürü yöntemi, BS üretimi için etkili ve kontrollü bir yöntemdir. Optimum büyüme koşulları sağlayarak, yüksek kaliteli ve homojen selüloz üretimi sağlar.

2.2.3.3. Statik Kültür Yöntemi

Statik kültür yöntemi, BS üretimi için kullanılan daha geleneksel bir yöntemdir. Bu yöntemde, bakteriler sıvı besin ortamında hareketsiz (statik) koşullarda üretilmektedir. Bu yöntemin detayları:

Besin Ortamının Hazırlanması: Statik kültür için uygun bir besin ortamı hazırlanır. Bu ortam, genellikle karbon kaynağı olarak glukoz veya sukroz, azot kaynağı olarak amonyum nitrat veya amonyum sülfat, mineral tuzlar ve diğer gerekli besin maddelerini içerir. Besin ortamının pH değeri, bakterilerin optimum büyüme ve selüloz üretimi için uygun bir seviyede tutulur.

Kültür Hazırlığı: Hazırlanan besin ortamı, sterilize edilmiş kültür kaplarına veya tanklarına dökülür. Daha sonra, uygun bir bakteri kültürü bu besin ortamına eklenir. Agitasyon (karıştırma) yapılmadan, besin maddeleri ve bakteriler homojen bir şekilde dağılır.

Selüloz Üretimi: Bakteriler, glukoz moleküllerini β -1,4-glikozidik bağlarla birleştirerek selülozu sentezler. Statik koşullar altında, selüloz nanofibrilleri kaplarda veya tanklarda yavaşça birikir. Hareketsiz koşullar, selüloz matının oluşumunu destekler.

Kültür Koşullarının Kontrolü: Statik kültür sırasında, besin ortamının sıcaklığı, pH değeri ve oksijen seviyesi gibi parametreler düzenli olarak kontrol edilir. Bu kontroller, bakterilerin optimum büyüme ve selüloz üretimi için gereklidir.

Selüloz Matının Toplanması: Selüloz üretimi tamamlandığında, oluşan selüloz matı sterilize edilerek toplanır. Daha sonra, selülozun istenilen formda kullanılması için işlemler uygulanır.

Avantajları ve Dezavantajları:

Statik kültür yönteminin avantajları arasında enerji verimliliği ve düşük işletme maliyetleri yer alır. Bu yöntem, basit ekipman gereksinimleriyle başlangıç maliyetlerini düşürür. Ancak, homojen bir selüloz üretimi sağlamak daha zordur ve üretim verimliliği genellikle sıvı kültürü yöntemine göre daha düşüktür. Statik kültür yöntemi, BS üretimi için daha geleneksel bir yaklaşımdır. Düşük enerji tüketimi ve işletme maliyetleri ile avantajlar sunsa da homojen ürün elde etmek ve yüksek verimlilik sağlamak için ek optimizasyon ve kontroller gereklidir.

2.2.3.4. Yarı-Sıvı Kültür Yöntemi

Yarı-sıvı kültür yöntemi, BS üretiminde sıvı ve katı kültür yöntemlerinin birleşimi olarak kabul edilir. Bu yöntem, jel benzeri bir matris içinde bakteri üretimini destekler. Bu yöntemin detayları:

Jel Matrisin Hazırlanması: Yarı-sıvı kültürde kullanılan jel matris, genellikle agaroz veya diğer jel oluşturucu ajanlara dayalı bir maddedir. Bu matris, sıvı besin ortamının katılaşmasını sağlar ve aynı zamanda bakterilerin üremesi için bir destek sağlar.

Besin Ortamının Hazırlanması: Sıvı besin ortamı, uygun karbon, azot, mineral tuzlar ve diğer gerekli besin maddelerini içeren bir çözelti olarak hazırlanır.

Bu besin ortamı, sterilize edilmiş jel matris içerisine dökülmeden önce homojen bir şekilde karıştırılır.

Kültür Hazırlığı: Hazırlanan sıvı besin ortamı, sterilize edilmiş bir kaptay veya küvet içerisnde agarozaya eklenerek karıştırılır. Daha sonra, uygun bir bakteri kültürü jel matris içerisine eklenir.

Selüloz Üretimi: Bakteriler, jel matris içerisnde çoğalırken, selüloz nanofibrillerini sentezlerler. Jel matris, bakterilerin hızla büyümesi ve selüloz üretimi için uygun bir ortam sağlar. Bakteriler, jel matris içerisnde hareket ederken, selüloz matı yavaşça birikir.

Kültür Koşullarının Kontrolü: Yarı-sıvı kültür sırasında, besin ortamının sıcaklığı, pH değeri ve oksijen seviyesi gibi parametreler düzenli olarak kontrol edilir. Bu, bakterilerin optimum büyüme ve selüloz üretimi için gereklidir.

Selüloz Matının Toplanması: Selüloz üretimi tamamlandığında, oluşan selüloz matı sterilize edilerek toplanır. Mat, jel matrisinden ayrılır ve istenilen formda işlenir.

Avantajları ve Dezavantajları:

Yarı-sıvı kültür yöntemi, BS'un fiziksel özelliklerini optimize etmek için kullanılır. Bu yöntem, selülozun mekanik dayanıklılığını ve elastikiyetini artırabilir. Ayrıca, yarı-sıvı kültür, sıvı ve katı kültür yöntemlerinin avantajlarını birleştirerek, daha yüksek selüloz verimliliği sağlayabilir. Ancak, jel matrisin hazırlanması ve yönetilmesi karmaşık olabilir ve ek maliyetler gerektirebilir. Yarı-sıvı kültür yöntemi, BS üretiminde fiziksel özelliklerin optimize edilmesi için etkili bir yöntemdir. Hem sıvı hem de katı kültür yöntemlerinin kombinasyonu, selüloz üretiminde verimliliği ve kaliteyi artırabilir.

2.2.3.5. Fermantasyon Süreci

BS üretimi, genellikle fermentasyon süreci olarak bilinen biyolojik bir süreçle gerçekleştirilir. Bu süreç, uygun besin maddelerinin, oksijenin, sıcaklığın ve pH değerinin kontrol edildiği sterilize edilmiş bir ortamda gerçekleşir. Fermentasyon sürecinin detayları:

Besin Maddelerinin Hazırlanması: Fermentasyon süreci için gerekli olan besin maddeleri, karbon kaynakları (örn. glukoz), azot kaynakları (örn. amonyum tuzu), mineral tuzları ve diğer gerekli besinler, sterilize edilmiş suyla karıştırılarak hazırlanır.

Fermentasyon Ortamının Hazırlanması: Hazırlanan besin maddeleri, sterilize edilmiş bir fermentasyon kabına aktarılır. Kabin içerisine hava girişi için hava beslemesi sağlanır ve pH, sıcaklık ve oksijen seviyeleri kontrol edilir.

İnokülasyon ve Kültür Süreci: Uygun bir bakteri kültürü (örn. *Gluconacetobacter xylinus*) sterilize edilmiş besin ortamına eklenir. Bakteriler, besin maddelerini kullanarak çoğalmaya başlar ve selüloz üretmeye başlarlar. Bu süreç, belirli bir sıcaklıkta (genellikle 25-30°C) ve belirli bir süre boyunca devam eder.

Kontrol ve Optimize Edilmesi: Fermentasyon süreci boyunca, pH, sıcaklık ve oksijen seviyeleri düzenli olarak kontrol edilir ve gerektiğinde ayarlanır. Bu parametrelerin optimize edilmesi, selüloz üretiminin verimliliğini ve kalitesini artırır.

Selüloz Matının Toplanması: Fermentasyon süreci tamamlandığında, oluşan BS matı, sterilize edilerek toplanır ve istenilen formda işlenir.

Avantajları ve Dezavantajları:

Fermentasyon süreci, kontrollü bir ortam sağlayarak BS üretiminde yüksek verimlilik ve kalite sağlar. Ancak, sürecin başarılı bir şekilde yönetilmesi için deneyimli personel, uygun ekipman ve maliyetli sterilizasyon gereksinimleri gibi bazı zorlukları vardır.

BS üretimi, fermentasyon süreciyle gerçekleştirildiğinde, uygun koşulların sağlanması ve sürecin optimize edilmesiyle yüksek kaliteli ve verimli bir ürün elde edilebilir. Sürecin başarısı, kullanılan üretim yöntemine ve seçilen mikroorganizmalara bağlı olsa da sürekli izleme ve optimizasyon, istenilen selüloz özelliklerinin elde edilmesi için kritik öneme sahiptir.

2.2.4. BS Kullanım Alanları

Kimyasal ve fiziksel özellikleri, çok çeşitli ticari uygulamalar için ideal bir platform sağlamaktadır. Özellikle kimyasal saflığı, yüksek su tutma kapasitesi,

dayanıklılığı, yüksek kristallenme derecesi ve geniş yüzey alanı gibi özellikleri, bu polisakkaritin çeşitli endüstrilerde kullanılmasını teşvik etmektedir.

Bu özellikler, BS’u, kâğıt, tekstil, gıda, tarım, biyomedikal ve elektronik endüstrilerinde önemli bir ham madde olarak konumlandırmıştır. Kâğıt endüstrisinde, yüksek saflığı ve dayanıklılığı sayesinde kaliteli kâğıt üretiminde kullanılırken, tekstil sektöründe nem kontrolü ve antibakteriyel özellikler sağlamak için tercih edilmektedir. Gıda endüstrisinde jöle ve emülsiyon stabilizatörü olarak rol alırken, tarım alanında su tutma kapasitesi ile toprak nemini düzenlemeye yardımcı olabilmektedir (Durand vd., 2021). Sonuç olarak, BS, endüstriyel uygulamalarda geniş bir yelpazede kullanılabilen malzemedir.



Şekil 4 BS Uygulamaları

2.2.4.1. Doku Mühendisliği Alanında Uygulamaları

Doku Mühendisliği alanında BS uygulamaları oldukça geniştir ve bu malzemenin özellikleri nedeniyle birçok tıbbi ürün ve tedavi yöntemlerinde kullanılmaktadır. BS’un yüksek gerilme direnci, mikrofibril yapısı, yüksek gözenekliliği, biyoyumluluğu, su adsorblama kapasitesi ve sterilizasyon yeteneği gibi özellikleri, özellikle yara ve yanık tedavilerinde etkili bir biyomateryal olarak rol oynamaktadır. BASYC® (Bacterial Synthesized Cellulose), yapay kan damarı olarak kullanılmak üzere geliştirilmiş bir biyomalzemedir. Bu ürün, durgun kültürde cam

tüpler iç içe konularak boru şeklinde üretilir. Bu tüplerin iç yarıçapı 1mm, uzunluğu 5mm ve duvar kalınlığı 0.7mm'dir. Köpekler üzerinde yapılan deneyler, bu tüplerin aort ve boyun damarları yerine kullanılabileceğini göstermiştir (Czaja vd., 2007). Bu tüpler, 1 aylık bir süre zarfında trombinin yüzeydeki adhezyonunu koruyarak işlevlerini sürdürmüştür. Biofill® ise yanık ve ülser tedavilerinde kullanılan bir diğer üründür. Acıyı azaltma, enfeksiyon riskini düşürme, yarayı tamamen kaplama ve iyileşme süresini kısaltma gibi önemli avantajları vardır. Farklı şirketler, BS'un tıbbi uygulamalarını geliştirmek için çalışmaktadır. Biofill Produtos Bioetecnologicos, yara iyileştirme ürünleri geliştirmektedir. Lohmann & Rauscher şirketi, Suprasorb® X ve Suprasorb® X + PHMB gibi yara örtü malzemelerini piyasaya sürmüştür (Shu vd., 2021).

Bowil Biotech, CELMAT® Wound/Eye/Face ve Securian® gibi ürünler üretmektedir. Son olarak, Xcell® adlı antimikrobiyal yara örtü malzemesi, 2003 yılında Amerika'da satışa sunulmuştur. Bu ürün, 18 ülser hastası üzerinde yapılan bir araştırmada, yarada büyük oranda iyileşme sağlamıştır (Kingley vd., 2009). Bu uygulamalar, BS'un tıbbi alandaki potansiyelini ve önemini vurgulamaktadır.

Doku mühendisliği alanında, BS hücre kültürlerinin büyümesi için uygun bir destek materyali olarak kullanılmaktadır. Yüksek gözenekliliği ve biyoyumluluğu sayesinde, hücrelerin sağlıklı bir şekilde büyümesini ve doku benzeri yapıların oluşturulmasını desteklemektedir. İmplant malzemeleri olarak, BS'un biyoyumluluğu, implantasyon sonrası enfeksiyon riskini azaltır ve implantın vücutla uyumunu arttırmaktadır. Bu, özellikle ortopedik ve dental implantlarda değerli bir özelliktir. Rejeneratif tıp alanında, BS'un doku yenilenmesini teşvik edebileceği ve hasar görmüş dokuların onarımını destekleyebileceği düşünülmektedir. Bu, özellikle yaraların, yanıkların ve doku hasarı olan bölgelerin tedavisinde büyük bir potansiyele sahiptir.

2.2.4.1.1. Kemik Doku Mühendisliği Uygulama

Kemik doku mühendisliği, kemik hasarlarının tedavisinde biyoyumlu ve biyolojik olarak aktif materyallerin kullanımını içerir ve BS, yüksek saflık, mekanik dayanıklılık ve mükemmel biyoyumluluk özellikleri ile dikkat çekmektedir.

BS, *Acetobacter xylinum* gibi bakteriler tarafından üretilen doğal bir polimer olup, nanofibril yapısı, yüksek su tutma kapasitesi ve biyolojik sistemlerle uyumlu yapısı sayesinde kemik doku mühendisliği için potansiyel bir biyomateryal olarak öne çıkmaktadır. BS'un mekanik dayanıklılığı, kemik dokusunun yük taşıma kapasitesini karşılayacak şekilde kullanılmasına olanak tanırken, esnek yapısı dinamik ortamlara uyum sağlamasını sağlamaktadır. Biyouyumluluğu sayesinde inflamatuvar tepkilere neden olmadan vücutla etkileşime girebilir ve hücrel uyum açısından osteoblastların yapışması, proliferasyonu ve farklılaşması için uygun bir ortam sunmaktadır. BS, kimyasal ve fiziksel olarak modifiye edilebilir ve bu modifikasyonlar, hidroksiapatit kaplama gibi yöntemlerle, biyolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirerek kemik hücrelerinin daha iyi tutunmasını ve kemik oluşumunu teşvik edebilir. BS'un hidroksiapatit ile kaplanmasının osteoblast hücrelerinin yapışma ve proliferasyonunu artırarak kemik rejenerasyonunu desteklediğini ve BS kompozitlerinin, kemik greftleri ve implantlar için kullanılabilirliğini göstermiştir. Kemik dokusu, kalsiyum ve fosfat kaynağı olarak önemli bir rol oynar ve ekstraselüler matriksi (ECM), hidroksiapatit ile mineralize edilmiş kolajen liflerinden oluşur. Kemik doku mühendisliğinde, osteoindüktivite ve osteokondüktivite özelliklerine sahip, vaskülarizasyon için uygun poroziteye sahip iskeleler önemlidir. HA-BS nanokompozitleri, doğal kemik ECM'sine yapısal benzerlikler gösterir ve BS'un mekanik ve biyolojik özelliklerini artırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Moleküler düzeydeki çalışmalar, kemik iliği kök hücrelerinin BS liflerine bağlanmasının MAP kinaz sinyal yolunu aktive ederek osteoblast farklılaşmasını desteklediğini göstermiştir. HA'nın biyobozunurluğu, biyouyumluluğu ve osteoindüktivitesi, kemik doku mühendisliğinde değerli bir bileşen olmasını sağlarken, inorganik malzemelerin zayıf biyomekanik özellikleri, biyomimetik tekniklerle geliştirilmiş yeni HA ve BS bileşimleriyle aşılmaktadır (Chao Chen vd., 2022). HA içeren BS jellerinin doğal kemiğe benzediği ve BMSC'lerin bağlanmasını, proliferasyonunu ve osteogenezini artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, BS bazlı kompozitlerin doğal kemik ortamını taklit ederek kemik rejenerasyonunu etkili bir şekilde destekleme potansiyelini vurgulamaktadır (Pang vd., 2020).

2.2.4.1.2. Damar Doku Mühendisliğinde Uygulama

Damar hastalıkları, dünya genelinde en yaygın ölüm nedenlerinden biridir ve geleneksel tedavi yöntemleri genellikle sınırlıdır, bu nedenle yeni tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekmektedir. BS, *Acetobacter xylinum* gibi bakteriler tarafından üretilen, yüksek saflık derecesi, üç boyutlu nanofibril yapısı ve mükemmel biyouyumluluğa sahip doğal bir polimerdir. BS'un üretimi sıcaklık, pH, besi ortamı bileşimi ve oksijen gibi faktörlere bağlıdır ve optimum koşullarda yüksek verim elde edilebilir. BS, insan hücreleri ile iyi bir biyouyumluluk gösterir, hücre proliferasyonunu ve doku rejenerasyonunu destekler ve yüksek mekanik dayanıklılığı ile damar doku mühendisliği için uygun bir materyaldir. BS'un mekanik ve biyolojik özellikleri kimyasal ve fiziksel modifikasyonlarla iyileştirilebilir. BS bazlı biyomateryallerin hücresel uyumu *in vitro* ve *in vivo* çalışmalarla değerlendirilmiş ve BS'un hücresel proliferasyonu ve doku entegrasyonunu desteklediği, damar dokularına iyi entegre olduğu ve inflamatuvar reaksiyonları minimize ettiği gözlemlenmiştir (D. Liu vd., 2023). Cerrahi bypass, hasar görmüş kan damarlarının yerine konulmasında yaygın bir yöntemdir ve çeşitli greftler kullanılır. Ancak otolog damar greftleri her zaman uygun olmayabilir ve allojenik damar greftleri de çeşitli zorluklar içermektedir. Sentetik damar greftleri büyük çaplı damarlar için uygundur, ancak küçük çaplı greftlerde uzun vadeli açıklık, trombojenite, endotel hücre bağlanma eksikliği ve kan akışı türbülansı gibi sorunlar yaşanabilmektedir. BS, kolajen liflerine benzer ultra ince, yüksek saflıkta lifli ağlar, üstün çekme mukavemeti ve yüksek su içeriği gibi özellikleri ile dikkat çekmiştir. BS kullanarak tübüler yapılar üretme, yüzey modifikasyonu ve antikoagülan faktörlerin kaplanması gibi stratejilerle, rekonstrüktif cerrahide özellikle küçük çaplı uygulamalar için umut verici alternatifler sunulmaktadır. Bu gelişmeler, sentetik greftlerin mekanik ve biyolojik uyumluluğunu artırmayı, klinik ortamlarda performanslarını ve uzun vadeli başarılarını iyileştirmeyi amaçlamaktadır (Chuntao Chen vd., 2022).

2.2.4.2. Gıda Endüstrisinde Uygulamaları

BS, yüksek lif içeriği, modifikasyonlarla uyumluluğu ve saf yapısı sayesinde gıda endüstrisinde çeşitli uygulamalara sahip doğal bir polisakkarittir. BS, düşük kalorili tatlandırıcılarda stabilizatör olarak, dondurma ve salata soslarında dolgu ve koyulaştırıcı olarak ve sosis benzeri gıdaların kaplamasında kullanılmaktadır. BS'un gıda endüstrisinde ticari kullanımı, Filipinler'de Nata De Coco ile başlamıştır. Nata De Coco, hindistancevizi suyunun fermente edilmesiyle elde edilen, şeffaf, kalın jel benzeri selülozdan oluşan bir tatlandırıcıdır. Bu selüloz, küpler halinde kesilir ve sukroz şurubuna batırılır (Sutherland, 1998). Benzer ürünler, çeşitli meyvelerden, meyve sularından ve bitki ekstraktlarından üretilmiştir; örneğin, Nata De Pina, ananastan yapılmaktadır (Iguchi vd., 2000).

Ayrıca, BS, düşük yağ içeriğine sahip ve endüstri standartlarını karşılayan fermente Türk sosilerinin üretiminde kullanılmıştır. BS ilavesi, yağ içeriğini ve nem kaybını azaltmıştır (Ako ve Geli, 2010). Kombucha çayından elde edilen başka bir ürün ise Çin Kombuchasıdır. Bu ürün, çay veya şeker ekstresinin fermente edilmesiyle asetik asit bakterileri tarafından üretilir. Ortaya çıkan pelte, insan sağlığı üzerinde faydalı etkileri olduğu bulunmuştur. BS'un yüksek lif içeriği, tüketicilerde serum lipid ve kolesterol düşürücü etkileriyle rapor edilmiş olup, BS ile yeni düşük kolesterollü gıdaların geliştirilme potansiyelini göstermektedir.

Monascus, doğal bir kırmızı pigment ile birleştirildiğinde, BS'un stabil morfoloji ve renk özellikleri gözlemlenmiştir. Et gibi tat veren bu karışım, vejetaryenler için yapay et üretiminde düşünülmektedir. Ayrıca, BS, geniş bir pH aralığında stabilite sağlar ve koyulaştırıcı, stabilizatör, jelleştirici ajan, süspanse edici ajan ve su bağlayıcı ajan olarak işlev görür. BS'un Japonya'da diyet içeceklerine eklenmeye başlandığı bilinmektedir. Çay ve şekerin BS üreten bakterilerle fermente edilmesiyle elde edilen ürünler, Kombucha veya Mançurya çayı olarak tüketilmektedir (Ako ve Geli, 2010).

BS, Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından GRAS olarak nitelendirilmiş olup, diyet lifi olarak tüketim için güvenliğini ve uygunluğunu vurgulamaktadır. BS'un özünde barındırdığı özellikler, onu gıda endüstrisinde çok çeşitli uygulamalar için

son derece avantajlı kılmaktadır. Yüksek saflığı, gıda ürünleri için gerekli olan katı standartları karşılamasını sağlarken, çeşitli dokular, şekiller, küreler, filamentler, çok şekilli hamurlar, filmler ve kristaller üretilebilme yeteneği, farklı mutfak ve endüstriyel uygulamalar için olağanüstü birçok yönlülük sunmaktadır. BS, modifikasyonlar geçirebilir ve kültür ortamının çeşitli renk ve tatlarına uyum sağlayabilir, bu da işlevselliğini arttırmaktadır. BS'un basit ve verimli üretim süreci, onun büyük ölçekli üretimini kolaylaştırır ve onu gıda endüstrisi için maliyet etkin bir bileşen haline getirmektedir. Bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda, BS, gıda endüstrisi uygulamaları için önemli bir yere sahiptir. Tekstürü iyileştirmek, diyet lifi sağlamak ve genel besin değerini artırmak için geniş bir ürün yelpazesine dahil edilebilir. Örneğin, BS, istenen dokulara sahip düşük kalorili gıda ürünleri yaratmak veya çeşitli soslar ve içeceklerde koyulaştırıcı ve stabilizatör olarak kullanılabilir. Film oluşturma yetenekleri de onu yenilebilir kaplamalar için mükemmel bir aday yapar, bu kaplamalar, bozulma ve kontaminasyona karşı koruyucu bir bariyer sağlayarak bozulabilir gıdaların raf ömrünü uzatabilir.

Yüksek su tutma kapasitesi, unlu mamullerde nemi koruyarak kurumalarını önleyebilir ve raf ömürlerini artırabilir. Sonuç olarak, BS'un yüksek saflığı, çok yönlü doku ve yapısal özellikleri ve üretim kolaylığı, onu gıda endüstrisi için son derece değerli bir bileşen yapmaktadır. BS'un gıda uygulamalarında kullanımını üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, daha fazla potansiyelini ortaya çıkarma vaadini taşır, daha fazla yenilik sağlar ve gıda endüstrisi için yeni çözümler sunmaktadır.

2.2.4.2.1. Geleneksel Tatlılar

BS, jel oluşturma, emülsiyon oluşturma ve su tutma özellikleri sayesinde son derece çok yönlü bir malzeme olup, gıdalara eklendiğinde sertlik, tutunma ve genel doku iyileştirmesi sağlar. Bu özellikleriyle, belirli tatlar ve aromalar ekleyerek çeşitli gıdaların kalitesini artırmak mümkündür. BS'un uzun süredir geleneksel tatlılarda kullanımı, Filipinler'e özgü bir tatlı olan nata de coco ile öne çıkmaktadır. Hindistan cevizi suyunun fermente edilmesiyle elde edilen ve şeker şurubuna batırılan bir santimetre kalınlığında jel tabakalarından oluşan bu tatlı, dünya genelinde geniş bir

popülerite kazanmıştır. Benzer şekilde, ananas suyu gibi farklı özler veya meyve sularından yapılan nata de piña gibi ürünler de bulunmaktadır. Endonezya’da, büyük ölçekte hatta hane halkı seviyesinde BS üretilerek sağlıklı bir gıda seçeneği olarak ihraç edilmektedir. Rusya ve Orta Asya’nın bazı bölgelerinde tüketilen çay mantarı gibi fermente ürünler de BS’un gıda uygulamalarındaki çeşitli kullanımını göstermektedir. BS’un özellikleri sayesinde, geleneksel tatlıları iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda potansiyel sağlık faydaları olan fonksiyonel gıdalara da genişlemektedir. Bu bağlamda, gıda endüstrisindeki kullanımı, sağlıklı ve fonksiyonel gıdaların geliştirilmesine katkıda bulunarak, tüketicilere daha geniş bir ürün yelpazesi sunma potansiyeline sahiptir.

2.2.4.2.2. Gıda Katkı Maddesi

BS, gıda endüstrisinde stabilizatör, süspanse edici, koyulaştırıcı ve jelleştirici madde olarak kullanılmaktadır. BS’un özellikleri, onu ısıya dayanıklı bir süspanسیون ajanı ve kırılğan gıda hidrojelleri için güçlendirici bir malzeme olarak değerli kılmaktadır. Örneğin, BS çalkalanmış kültür ortamında üretildiğinde ve çikolata içeceklerine eklendiğinde, mükemmel termal stabilitesi sayesinde kakao çökmesini önler ve otoklavlamadan sonra bile viskozitesini korur. Bu, çikolata içeceklerinin daha homojen bir yapıya sahip olmasını ve uzun süre stabil kalmasını sağlar. Kremalı soslarda BS eklenmesi, yapışkanlığı artırarak kaşıkla kolay porsiyonlanmasına olanak tanımaktadır. Bu özellik, sosların servis edilebilirliğini ve kullanıcı deneyimini arttırmaktadır.

BS, geniş bir sıcaklık, pH ve dondurma/çözme koşullarında stabilite sağlayarak, gıda katkı maddesi olarak kalori içeriği konusunda endişe duymadan etkili bir şekilde kullanılabilir. Örneğin, düşük kalorili gıda ürünlerinde kalori eklemekten dokuyu iyileştirme potansiyeli sunar. Ayrıca, BS’un ısıya dayanıklı olması, pişirme ve pastörizasyon gibi işlemler sırasında yapısal bütünlüğünü korumasını sağlar. Çeşitli gıda ürünlerinin dokusunu ve stabilitesini artırarak, BS modern gıda teknolojisinde değerli bir bileşen olduğunu kanıtlamıştır. Bu bağlamda, BS’un kullanımı, gıda ürünlerinin kalitesini, raf ömrünü ve tüketici memnuniyetini artırarak gıda endüstrisine önemli katkılar sağlamaktadır (Bartoshuk vd., 2016).

2.2.4.3. Tıbbi Alanda Uygulamaları

BS, gıda endüstrisinin yanı sıra tıbbi alanda da çeşitli uygulamalara sahip olan doğal bir polisakkarittir. Tıbbi alandaki kullanımı, yara iyileşmesi, doku mühendisliği, implant malzemeleri, ilaç salımı ve tıbbi görüntüleme gibi çeşitli alanlarda gerçekleştirilmektedir. BS'un bu özellikleri, hidrojel yara bandı, yapay deri, kemik, kırık, kas ve vasküler protez gibi çeşitli tıbbi malzemelerin üretiminde kullanılmasını mümkün kılar. Özellikle yanık tedavisinde, iyileştirici özellikleri, steril edilebilirliği, dokuya uyumlu yapısı, gözenekliliği, elastikiyeti ve su emme kapasitesi nedeniyle yaraların daha hızlı iyileşmesini teşvik ettiği ve enfeksiyon riskini azalttığı belirlenmiştir. BS, yanık bölgelerin ısını absorbe ederek ağrı ve acıyı azaltırken, yaraların dokuda yayılmasını engelleyerek enfeksiyon oluşumunu önlemektedir. Bu özellikleri, BS'un yanık tedavisinde etkili bir alternatif olarak kullanılmasını desteklemektedir. Medikal uygulamalarda, BS'un biyouyumluluğu ve doğal yapısı, çeşitli doku ve organların onarımı ve rejenerasyonu için potansiyel bir taşıyıcı materyal olarak kabul edilmesini sağlamaktadır.

2.2.4.3.1. Yara İyileşmesi

BS, yara iyileşmesini teşvik eden ve enfeksiyon riskini azaltan benzersiz bir yapıya sahiptir. BS'un hidrofilik özellikleri, yaranın nemli bir ortamda kalmasını sağlar, bu da epitelizasyon sürecini (yara kenarlarının iyileşmesi) destekler. Nemli bir yara ortamı, hücre proliferasyonunu ve migrasyonunu artırarak daha hızlı doku yenilenmesine yardımcı olur. BS, ayrıca mikrop gözenekli yapısıyla oksijen ve besin maddelerinin geçişine izin verirken, bakterilerin girişini engelleyerek enfeksiyon riskini önemli ölçüde düşürmektedir. BS'un esnek ve dayanıklı yapısı, yaraya kolayca uyum sağlar ve hastaların rahat hareket edebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu biyomateryal, yara bölgesinde uzun süre kalabilen bir bariyer oluşturur, bu da sürekli pansuman değiştirme ihtiyacını azaltarak hem hasta konforunu artırır hem de enfeksiyon riskini minimuma indirmektedir. Sonuç olarak, BS, yara iyileşme sürecini hızlandıran hem de enfeksiyon riskini azaltan etkili bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

2.2.4.3.2. Yanık Tedavisi

Etkili bir yara örtü malzemesi, gaz geçirgenliği, antimikrobiyal özellikler, nem düzenleme, eksudat emilimi ve yara bölgesinde yeniden epitelizasyonun teşviki gibi çeşitli kritik kriterleri karşılamalıdır. BS, doğal olarak bakteriyostatik veya bakterisidal olmasa da antimikrobiyal etkinliğini artırmak için sıklıkla kompozit formda kullanılmaktadır. Özellikle, gümüş nanoparçacık emdirilmiş BS, kontamine yaralardaki yaygın patojenler olan *E. coli* ve *S. Aureus*'un canlı miktarında önemli azalmalar göstermiştir (Picheth vd., 2017). Buna ek olarak antibiyotik veya inorganik/organik antimikrobiyaller içeren BS kompozitleri, yüksek yüzey alanı ve mükemmel porozitesi sayesinde artırılmış antibakteriyel aktivite sergilemiştir. BS'un mekanik ve fiziksel özellikleri, yara yönetimi için uygunluğuna katkıda bulunur. BS, çeşitli insan fibroblast hücre hatlarında gözlemlenen sitotoksikite eksikliği ve minimal bağışıklık reaksiyonları ile mükemmel biyouyumluluk göstermektedir. Ayrıca, yüksek su tutma kapasitesi, kontrollü ilaç salım kinetiği, çekme mukavemeti ve esnekliği, sıvı ilaçlar veya biyoaktif bileşikler için ideal bir taşıyıcı yapar; bu da ağrı hafifletme, iltihap azaltma ve yara izi giderme süreçlerine yardımcı olmaktadır (Alavi, 2019). BS bazlı yara örtülerinin ticarileştirilmesi, uygulamalarına yönelik özel hususları içerir; bu, nem tutucu membran veya kuru film olarak, farklı yara tipleri ve eksudat seviyelerine uygun olacak şekilde tasarlanmış olabilir. Örneğin, Suprasorb X® gibi ürünler düşük ila orta seviyede eksudat içeren kronik yaralar için uygunken, Nanoderm® nem koruması gerektiren cilt lezyonlarına yöneliktir. Ayrıca, *Acetobacter xylinum*'dan elde edilen BS, doku rejenerasyonuna elverişli nemli bir ortamı koruyarak, ilaç taşıma ve yara izolasyonu sağlayarak ikinci derece yanıkların tedavisinde umut vaat etmektedir. Yanık hastalarında BS membranlarının kullanıldığı klinik denemeler, hızlandırılmış iyileşme, sıvı kaybının azaltılması, uygun eksudat emilimi ve minimal aşırı duyarlılık reaksiyonları göstermiştir; bu da BS'un yara yönetimindeki potansiyelini vurgulamaktadır (Czaja vd., 2007). BS, yara iyileşme uygulamaları için oldukça etkili bir malzeme olarak öne çıkmaktadır, bu etkinlik büyük ölçüde yara bölgesinde nemli bir ortamı koruma yeteneğinden kaynaklanmaktadır; bu durum, optimal iyileşme sonuçları için hayati önem taşır. Yara yönetiminde etkinliğine katkıda bulunan birkaç önemli özellik şunlardır:

Nem Tutma: BS, yara bölgesinde nemi korumada mükemmeldir; bu durum, daha hızlı epitelizasyonu teşvik eder ve yara izini en aza indirir, böylece genel iyileşme sürecini hızlandırmaktadır.

Bariyer Fonksiyonu: BS, mikrobiyal enfeksiyonları engelleyen koruyucu bir bariyer görevi görerek yara kontaminasyonu ve ilişkili komplikasyon riskini azaltır.

Ağrı Azaltma: BS'un soğutucu özellikleri, yara eksudatını emerek ağrıyı hafifletir ve iyileşme sürecinde hasta konforunu arttırmaktadır.

Biyouyumluluk: BS, insan vücudu ile mükemmel uyumluluk gösterir, olumsuz reaksiyonların meydana gelme olasılığını en aza indirir ve hızlandırılmış yara iyileşme tepkilerini kolaylaştırmaktadır.

Ticari Kullanım: Biofill® ve Suprasorb® X gibi ticari yara yönetim ürünleri, BS'un yararlı özelliklerinden faydalanarak yanık ve ülser tedavisi için etkili çözümler sunmaktadır.

Yüksek Porozite: BS'un doğal gözenekli yapısı, besin ve gaz değişimini kolaylaştırarak doku rejenerasyonu için uygun bir ortam sağlamaktadır.

2.2.4.3.3. İmplant Malzemeleri

Biyouyumluluğu sayesinde, BS'un vücut tarafından kabul edilme oranı oldukça yüksektir, bu da bağışıklık sisteminin olumsuz tepkilerini minimize etmektedir. BS'un bu özelliği, implantların çevresindeki dokularla uyumlu bir şekilde entegrasyonunu kolaylaştırır ve inflamasyon riskini azaltır. BS'un mikroyapısı, hücrelerin yapışması ve proliferasyonu için ideal bir ortam sağlamaktadır. Hücre dostu yüzeyi, hücrelerin implant yüzeyine tutunmasını ve büyümesini teşvik eder, böylece implantın vücutla bütünleşmesi hızlandırmaktadır. Ayrıca, BS'un gözenekli yapısı, hücrelerin ve besin maddelerinin serbestçe hareket edebilmesine olanak tanır, bu da doku mühendisliği uygulamalarında önemli bir avantajdır. BS'un mekanik özellikleri de implant malzemesi olarak kullanılmasını desteklemektedir. Yüksek mukavemeti ve esnekliği, implantın vücut içindeki doğal hareketlere uyum sağlamasına yardımcı olur ve implantın kırılma veya hasar görme

riskini azaltmaktadır. BS, bakteriyel enfeksiyonlara karşı koruma sağlayarak, implantların uzun ömürlü ve güvenli olmasını temin etmektedir. Bu, post-operatif komplikasyonları minimize eder ve hastaların iyileşme sürecini hızlandırır. Sonuç olarak, BS, mekanik özellikleri, hücre dostu yapısı ve anti-bakteriyel özellikleri nedeniyle implant malzemesi olarak oldukça avantajlıdır. Bu özellikler, BS'un tıp ve diş hekimliği gibi alanlarda geniş bir yelpazede uygulama bulmasını sağlar ve implant teknolojilerinde inovatif çözümler sunmaktadır.

2.2.4.3.4. İlaç Salınımı

BS, ilaçların kontrollü salınımı sağlayan materyallerin üretiminde kullanılır. Bu sayede ilaçların etkisi zamanla ve kontrollü bir şekilde vücuda salınır, bu da tedavi sürecini optimize eder. Özellikle, kontrollü salım sistemleri ve hedefe yönelik tedavi yöntemleri için uygun bir taşıyıcı olarak kullanılabilir.

Kontrollü Salım Sistemleri: BS'un yüksek su tutma kapasitesi ve kontrollü porozitesi, ilaçların kontrollü salımı için ideal bir ortam sağlar. Bu özellikler, BS bazlı ilaç taşıma sistemlerinin ilaç salım profillerini optimize etmeye olanak tanır. BS'un doğal yapısı, ilaçların yavaş ve kontrollü bir şekilde salınmasını sağlar, böylece tedavi sürecinde etkinliği artırır ve yan etkileri azaltmaktadır.

Hedefe Yönelik Tedavi: BS, hedefe yönelik ilaç taşıma sistemlerinde kullanılabilir. BS'un yüzey özellikleri modifiye edilerek, spesifik hücre veya doku türlerine yönelik hedefleme yapılabilir. Bu, kanser tedavisi gibi alanlarda, ilaçların doğrudan hedeflenen bölgeye ulaştırılmasını sağlar ve sağlıklı dokular üzerindeki yan etkileri en aza indirmektedir (Jozala vd., 2016).

Antimikrobiyal Taşıyıcı: BS, antimikrobiyal maddelerle birleştirilerek, enfeksiyon tedavisinde kullanılabilir. Antibiyotikler veya diğer antimikrobiyal ajanlar BS'a entegre edilerek, enfeksiyon bölgelerine doğrudan ilaç salımı sağlanabilir. Bu, enfeksiyonun kontrol altına alınmasını hızlandırır ve sistemik yan etkileri azaltmaktadır.

Nanopartikül Taşıyıcı: BS, nanopartiküllerle birleştirilerek, ileri düzey ilaç taşıma sistemleri oluşturulabilir. Nanopartiküller, BS'un yapısına entegre edilerek,

ilaçların daha etkili ve hedeflenmiş bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır. Bu, özellikle kanser tedavisi ve gen terapisi gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır.

BS, ilaç taşıma sistemlerinde çok yönlü bir malzeme olarak öne çıkmaktadır ve bu alandaki avantajları, çeşitli biyomedikal uygulamalar için umut verici çözümler sunmaktadır. BS'un ilaç taşıma sistemlerindeki avantajları şunlardır:

Yavaş ve Kontrollü Salım: BS'un yüksek su tutma kapasitesi ve porozitesi, ilaçların yavaş ve kontrollü bir şekilde salınmasını sağlamaktadır. Bu, tedavi sürecinde daha etkili bir ilaç salım profili sunar ve ilacın terapötik etkinliğini arttırmaktadır.

Hedefe Yönelik Taşıma: BS'un yüzey özellikleri modifiye edilerek, belirli hücre veya doku türlerine yönelik ilaç taşıma sistemleri oluşturulabilir. Bu, ilaçların doğrudan hedeflenen bölgeye ulaştırılmasını sağlar ve sağlıklı dokular üzerindeki yan etkileri en aza indirmektedir.

Antimikrobiyal Özellikler: BS, antimikrobiyal ajanlarla birleştirildiğinde, enfeksiyon tedavisinde etkili bir taşıyıcı haline gelmektedir. Bu, enfeksiyon bölgelerine doğrudan ilaç salımı sağlayarak, enfeksiyonun hızlı bir şekilde kontrol altına alınmasını sağlamaktadır.

Biyouyumluluk ve Biyobozunurluk: BS, biyouyumlu ve biyobozunur bir malzeme olduğu için, vücutta güvenli bir şekilde kullanılabilir ve zamanla doğal olarak parçalanmaktadır. Bu, ilaç taşıma sistemlerinin güvenliğini ve etkinliğini arttırmaktadır.

Nanopartikül Entegrasyonu: BS, nanopartiküllerle birleştirildiğinde, ileri düzey ilaç taşıma sistemleri oluşturabilir. Nanopartiküller, BS'un yapısına entegre edilerek, ilaçların daha etkili ve hedeflenmiş bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır.

2.2.4.3.5. Tıbbi Görüntüleme

BS, tıbbi görüntüleme uygulamalarında potansiyel bir biyomalzeme olarak dikkate değerdir. Özellikle bilgisayarlı tomografi (CT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi görüntüleme tekniklerinde kontrast etken madde olarak

kullanılabilir. BS'un biyouyumluluğu, modifiye edilebilirliği ve uygun fiziksel özellikleri, bu tür uygulamalarda avantaj sağlamaktadır.

MRI: BS, manyetik nanopartiküllerle birleştirildiğinde, MRI için etkili bir kontrast ajanı haline gelebilir. BS'un yapısına entegre edilen manyetik nanopartiküller, MRI görüntülerinin netliğini artırır ve hedeflenen dokuların daha belirgin bir şekilde görüntülenmesini sağlar. Bu, tanı ve tedavi süreçlerinde doğruluğu ve etkinliği arttırmaktadır (J. Wang vd., 2019).

CT: BS, radyopak maddelerle kombine edilerek, CT görüntüleme için kontrast madde olarak kullanılabilir. Bu, BS'un iç yapısının modifiye edilmesiyle gerçekleştirilir ve sonuçta, BS bazlı kontrast ajanları, CT taramalarında daha net ve ayrıntılı görüntüler elde edilmesinde etkilidir. Bu, özellikle vasküler yapıların ve diğer iç organların görüntülenmesinde faydalıdır.

Ultrason Görüntüleme: BS, ultrason görüntüleme tekniklerinde de kullanılabilir. BS'un yüzey özellikleri ve porozitesi, ultrason dalgalarının yansımalarını etkileyerek, görüntü kalitesini artırabilir. Bu, ultrason tabanlı tanı yöntemlerinde daha net ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

Optik Görüntüleme: BS, optik görüntüleme tekniklerinde de potansiyel bir malzeme olarak araştırılmaktadır. Özellikle floresan boyalar veya fotonik kristallerle modifiye edilen BS, optik görüntüleme için yüksek kontrast sağlayabilir. Bu, hücre ve doku görüntülemesinde daha hassas ve ayrıntılı görüntüler elde edilmesine olanak tanımaktadır (C. Zhang vd., 2013).

BS, tıbbi görüntüleme uygulamalarında kullanılmak üzere çok yönlü ve etkili bir biyomalzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu alandaki avantajları, çeşitli görüntüleme tekniklerinde daha net ve ayrıntılı görüntüler elde edilmesine katkıda bulunur. BS'un tıbbi görüntüleme uygulamalarındaki avantajları şunlardır:

Yüksek Kontrast: BS, manyetik nanopartiküller, radyopak maddeler veya floresan boyalar gibi çeşitli kontrast ajanları ile modifiye edilebilir. Bu, farklı görüntüleme tekniklerinde yüksek kontrast sağlayarak, hedeflenen dokuların daha belirgin bir şekilde görüntülenmesini sağlar.

Biyouyumluluk: BS, biyouyumlu bir malzeme olduğu için, vücut içinde güvenle kullanılabilir. Bu, BS bazlı kontrast ajanlarının tıbbi görüntüleme uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlar.

Modifiye Edilebilirlik: BS'un yüzey özellikleri kolayca modifiye edilebilir, bu da çeşitli kontrast ajanlarının BS yapısına entegre edilmesini mümkün kılar. Bu, farklı görüntüleme teknikleri için özelleştirilmiş çözümler sunar.

Çok Yönlülük: BS, MRI, CT, ultrason ve optik görüntüleme gibi çeşitli tıbbi görüntüleme tekniklerinde kullanılabilir.

Özetle BS, yüksek kontrast, biyouyumluluk, modifiye edilebilirlik ve çok yönlülük gibi özellikleriyle tıbbi görüntüleme uygulamalarında dikkat çeker. Bu avantajlar, tanı ve tedavi süreçlerinde daha net ve ayrıntılı görüntüler elde edilmesine katkı sağlayarak tıbbi görüntülemenin doğruluğunu ve etkinliğini arttırmaktadır. BS, yapısal özellikleri ve biyouyumluluğu sayesinde yara iyileşmesi, doku mühendisliği, ilaç taşıma sistemleri ve tıbbi görüntüleme gibi çeşitli biyomedikal alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yara iyileşmesi uygulamalarında nemli bir ortam sağlayarak iyileşme sürecini hızlandırır ve enfeksiyon riskini azaltan antimikrobiyal özelliği bulunmaktadır. Doku mühendisliğinde, yüksek mekanik dayanımı, doğal porozitesi ve hücre proliferasyonunu destekleyici özellikleriyle çeşitli doku tiplerinin yeniden oluşturulmasında etkin bir iskele malzemesi olarak öne çıkmaktadır. İlaç taşıma sistemlerinde, kontrollü salım sağlayabilen yapısı sayesinde ilaçların etkinliğini artırırken yan etkileri azaltır ve biyouyumlu, biyobozunur yapısı uzun vadeli tedavilerde güvenli kullanım konusunda faydalıdır. Tıbbi görüntüleme alanında, manyetik nanopartiküller ve radyopak maddelerle modifiye edilerek yüksek kontrast sağlayabilir, bu da MRI, CT ve diğer görüntüleme tekniklerinde daha net görüntüler elde edilmesini sağlamaktadır. Biyomedikal uygulamalarda sunduğu çok yönlü avantajlarla yenilikçi bir biyomalzeme olarak öne çıkmakta ve gelecekte daha etkin ve güvenli tedavi yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunma potansiyeline sahiptir.

2.2.4.4. Kağıt Endüstrisinde Uygulamalar

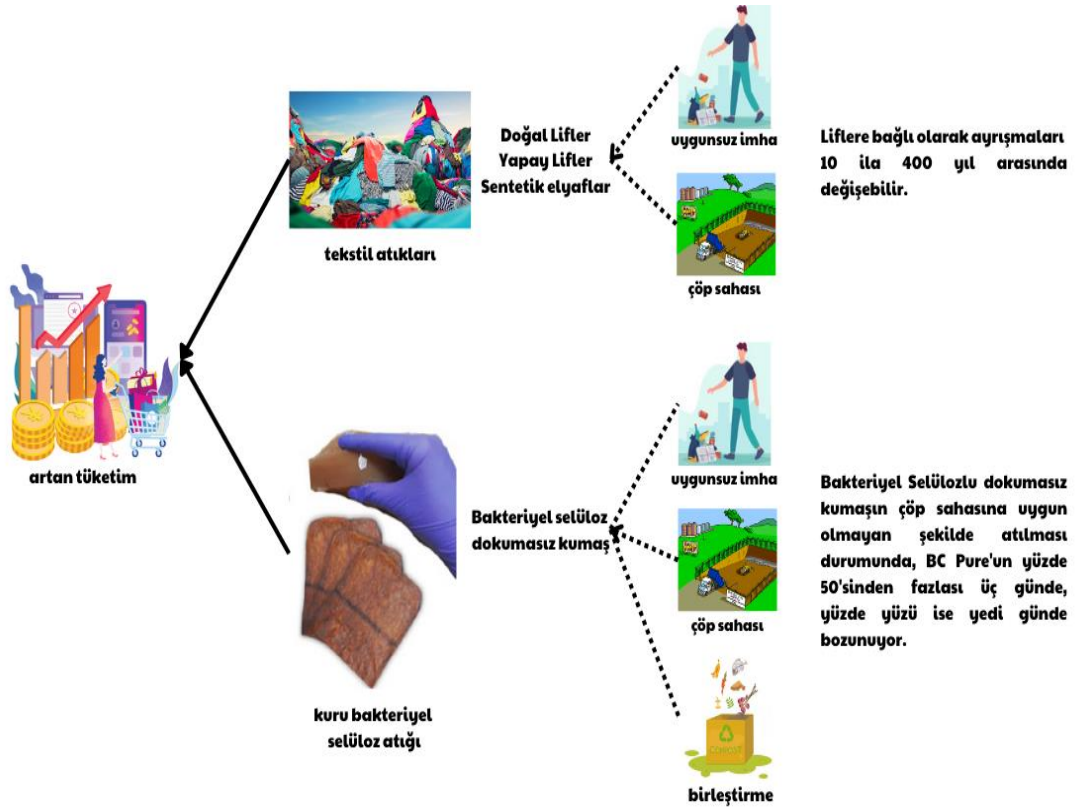
BS, kâğıt endüstrisinde yenilikçi uygulamalar için önemli bir potansiyele sahiptir. Yüksek mekanik dayanıklılığı, elastikiyeti ve diğer özel özellikleri sayesinde bu alanda çeşitli avantajlar sunmaktadır. BS, çok küçük mikrofibrillerden oluşan yapısı nedeniyle yüksek mekanik dayanıklılığa sahip kağıtların üretiminde ideal bir malzemedir. Bu malzeme, aynı zamanda suyu etkili bir şekilde emme, geçirgenlik ve dolgu maddeleri ile renk maddelerini tutabilme gibi özelliklere de sahiptir.

Elektronik kâğıt üretiminde BS'un kullanılması, bu alandaki en yenilikçi uygulamalardan biridir. Elektronik kâğıt, geleneksel kâğıdın optik özelliklerini, yüksek kontrast ve yansıtıcılığı ile birleştirirken aynı zamanda esneklik ve taşınabilirlik gibi modern teknolojilerin ihtiyaçlarına da cevap vermektedir. Bu süreçte, Brown ve Shah, BS katmanına entegre edilmiş dönüşümlü renk değişimi sağlayan bir elektronik boya geliştirmişlerdir. Bu katman, şeffaf elektrotlar arasında yer alır ve radyo sinyalleriyle gönderilen yazı ve grafikler elektrik akımı ile aktive edilerek görüntü haline getirilir. Elektrik akımı kesildiğinde, renk stabil kalır. Ters akım uygulandığında ise renk soluklaşır, tekrar renksiz hale gelir. Bu özellikler, elektronik kâğıdın enerji verimliliğini ve kullanıcı dostu özelliklerini artırır (Shah ve Brown, 2005). Sonuç olarak, BS'un kâğıt endüstrisindeki bu yenilikçi uygulamaları, hem çevre dostu malzemelerin kullanımını teşvik eder hem de endüstriye farklı ve değerli ürünler sunar. Bu potansiyel, gelecekte daha geniş çaplı uygulamaların ve geliştirmelerin önünü açabilir.

2.2.4.5. Tekstil Endüstrisinde Uygulamalar

Nanollose, Avustralya'nın Nedlands şehrinde bulunan bir şirket, dünyanın ilk bitki içermeyen viskoz-rayon lifi olan Nullarbor Fibre™'in geliştirilmesinde öncü rol oynamıştır. Bu yenilikçi lif, geleneksel viskoz liflerden farklı olarak mikrobiyal selülozdan elde edilmiştir. Geleneksel viskoz liflerin üretim süreci önemli çevresel dezavantajlar içermektedir. Büyük miktarlarda ağaç kesilmeli, ezilmeli, kimyasal maddelerle işlenmeli ve lif üretimi için gerekli selülozun çıkarılması için enerji yoğun bir rafine işlemi uygulanmalıdır. Bu yöntem önemli çevresel etkilere sahiptir;

orman tahribatına, kimyasal kirliliğe ve yüksek enerji tüketimine katkıda bulunur. Buna karşılık, Nullarbor Fibre™ mikrobiyal selüloz kullanarak sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Bu selüloz, bira ve şarap üretimi gibi sıvı gıda endüstrilerinin atık ürünlerinden elde edilir. Bir biyo dönüşüm süreciyle, mikroorganizmalar bu endüstriyel yan ürünleri selüloza dönüştürürler. Bu yöntem, geleneksel selüloz üretimiyle ilişkilendirilen çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltır. Atığı değerli bir kaynağa dönüştürerek, bu süreç hem atık yönetimini teşvik eder hem de doğal kaynak korumasına katkı sağlamaktadır. Mikrobiyal selüloz daha sonra Nullarbor Fibre™'e işlenir ve bu, iplik, kumaş ve hatta giysilere başarıyla dönüştürülmüştür. Bu başarı, sadece lifin tekstil endüstrisinde geniş kapsamlı uygulamalar için potansiyelini göstermekle kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği teşvik etme rolünü de vurgulamaktadır. Mikrobiyal selülozun, odun kökenli selülozun yerine geçerek, orman tahribatına ve zararlı kimyasallara olan bağımlılığı azaltır ve enerji yoğun süreçlere karşı çıkmaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, sürdürülebilir tekstil üretiminde önemli bir ilerleme temsil eder ve endüstride çevresel etkileri azaltma ve döngüsel ekonomi ilkelerini destekleme çabalarıyla uyumludur. Nullarbor Fibre™'in üretim süreci birkaç kritik aşamayı içermektedir. Başlangıçta, sıvı gıda endüstrilerinden atık ürünler toplanır ve uygun mikroorganizmalarla fermantasyona tabi tutulur. Bu mikroorganizmalar, atıktaki organik maddeleri selüloza dönüştürürler. Elde edilen mikrobiyal selüloz daha sonra Nullarbor Fibre™'e işlenir. Bu işlem, geleneksel viskoz üretiminin kimyasal ve enerji yoğun adımlarını atlayarak çevresel etkileri önemli ölçüde azaltır. Sonuç olarak, Nanollose'un Nullarbor Fibre™'i çevresel sürdürülebilirlik açısından tekstil endüstrisinde çığır açan bir yenilik sunmaktadır. Mikrobiyal selülozun kullanımı doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunur ve endüstriyel atığı değerli bir ürüne dönüştürmektedir (Yıldırım vd., 2020).



şekil 5 Tekstil lifleri ile BS arasındaki ayrışmanın karşılaştırılması

2.3. BS VE MXEN BAZLI NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMALARI

MXene ve BS kombinasyonu, her iki malzemenin de özelliklerini birleştirerek çeşitli ileri teknoloji uygulamaları için ideal bir kompozit malzeme sunar. MXene, geniş yüzey alanı, yüksek elektriksel iletkenlik, mekanik dayanıklılık, esneklik ve toksisite riski taşımaması gibi dikkate değer özelliklere sahiptir. BS ise yüksek mekanik dayanıklılık, su emme kapasitesi, gözeneklilik, biyolojik parçalanabilirlik ve biyouyumluluk gibi nitelikleriyle bilinir. Bu iki malzemenin sinerjik etkisi, çeşitli biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda kullanıma uygun nanokompozitlerin geliştirilmesini sağlamaktadır.

Özellikler:

Mekanik Dayanıklılık: MXene ve BS'un birleşimi, yüksek mekanik dayanıklılık sağlar. Bu özellik, özellikle film ve kaplama uygulamalarında önemlidir. Katmanlı MXene/BS kaplamaları, BS'un varlığı ile MXene katmanlarını ayırarak

malzemenin bütünlüğünü hidrojen bağları yoluyla artırır ve filmin yüksek mekanik dayanıklılığa sahip olmasına katkıda bulunur.

Elektriksel İletkenlik: MXene'nin yüksek elektriksel iletkenliği, kompozit malzemelerin elektronik ve enerji depolama uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılar. MXene'nin geniş yüzey alanı ve yüksek iletkenliği, kompozitin elektriksel performansını artırır.

Su Emme ve Gözeneklilik: BS, yüksek su emme kapasitesi ve gözeneklilik sunarak, kompozitin biyomedikal uygulamalarda, özellikle yara iyileştirici hidrojellerde kullanılmasına olanak tanır. Bu özellikler, BS'un hidrofilik yapısı ve doğal porozitesinden kaynaklanır.

Biyouyumluluk ve Biyobozunurluk: BS'un biyouyumluluğu ve biyolojik olarak parçalanabilirliği, bu nanokompozitlerin tıbbi uygulamalarda güvenle kullanılabilmesini sağlar. BS, alerjik reaksiyonlara neden olmadan sterilize edilebilir ve biyolojik olarak bozunabilir.

Uygulamalar:

Yara İyileştirici Bandajlar: MXene/BS bazlı hidrojeller, yüksek performanslı yara iyileştirme sağlamaktadır. Bu hidrojeller, nemli bir yara ortamı sağlayarak iyileşme sürecini hızlandırır ve enfeksiyon riskini azaltmaktadır. BS'un yüksek su emme kapasitesi, yara yüzeyindeki fazla sıvıyı emerken, MXene'nin antimikrobiyal özellikleri enfeksiyon riskini azaltır.

Süperkapasitörler: Enerji depolama uygulamalarında, MXene/BS kompozitleri yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj özellikleri sunmaktadır. Bu özellikler, süperkapasitörlerin verimliliğini artırır ve enerji depolama cihazlarının performansını iyileştirmektedir.

EMI Koruması: MXene/BS tabanlı kompozit malzemeler, EMI koruma verimliliğinde yüksek performans göstermektedir. Bu, elektronik cihazların dış etkenlerden korunmasına yardımcı olur ve cihazların daha güvenilir çalışmasını sağlamaktadır.

Sensörler: Geleneksel sensörlere kıyasla daha yüksek hassasiyet sunan MXene/BS kompozitleri, çevresel ve biyomedikal sensör uygulamalarında kullanılabilir. MXene'nin elektriksel iletkenliği ve BS'un mekanik dayanıklılığı, sensörlerin performansını arttırmaktadır.

Giyilebilir Elektronikler: BS'un esnek yapısı ve MXene'nin iletkenliği, giyilebilir elektronikler için mükemmel bir kompozit malzeme sunar. Bu kompozitler, çeşitli biyolojik sinyallerin izlenmesi ve analizi için kullanılabilir. BS'un cilde mükemmel yapışma yeteneği ve MXene'nin iletkenliği, giyilebilir elektronik cihazların rahat ve etkili bir şekilde kullanılmasında etkilidir.

MXene ve BS'un sinerjik etkisiyle geliştirilen nanokompozit malzemeler, geniş bir uygulama yelpazesi sunarak, mühendislik ve biyomedikal alanlarda yenilikçi çözümler sağlar. Bu kompozitlerin daha da geliştirilmesi, gelecekte daha etkin ve güvenilir teknolojilerin ortaya çıkmasına katkıda bulunabilir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. MATERYAL VE METOT

3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE CİHAZLAR

Aşağıda, hücre ve malzeme çalışmalarında kullanılan kimyasallar ve cihazlar listelenmiştir. Bu listede, her bir kimyasal ve cihazın kullanım amacı ve özellikleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bilgiler, deneylerin doğru ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi ve malzeme üretilmesi için gerekli olan donanımı ve malzemeleri kapsamaktadır.

Tablo 2 Malzemeler ve Cihazlar

Kimyasallar ve Malzemeler	Cihazlar
4% Paraformaldehit: Hücrelerin sabitlenmesi ve immünofloresan mikroskopisi için kullanılmıştır. Paraformaldehit, hücrelerin yapılarını sabitleyerek sonraki işlemler için hazırlar.	Liofilizatör: Son ürünün kurutulması için liofilizatör kullanılır. Liofilizasyon işlemi, suyun düşük sıcaklıkta dondurulması ve ardından vakum altında buharlaştırılması yoluyla malzemenin kurutulmasını sağlar. Bu işlem, malzemenin yapısını korurken suyun çıkarılmasını sağlar.
Hidroflorik asit (HF): Ti_3AlC_2 'nin arındırılması ve MXene malzemesinin sentezi için kullanılır. %49'luk konsantrasyonu, işlemdeki uygun etkiyi sağlamak için belirli bir konsantrasyondur.	X-Ray Cihazı: Malzemelerin kristalografik özelliklerini analiz etmek için kullanılan bir cihazdır. Bu cihaz, malzemelerin iç yapısını ve kristal yapıların belirlemek için kullanılır.
Etanol: HF'ün kalıntılarını uzaklaştırmak ve reaksiyon ürünlerini temizlemek için etanol kullanılır. Bu adım, sentez sonrası malzemenin arındırılmasında önemlidir.	XPS Cihazı (KRATOS AXIS-ULTRA DLD-600W): Bu cihaz, malzemelerin yüzey bileşimini ve kimyasal bağlanma durumunu belirlemek için kullanılır. X-ışını fotoelektronları tarafından malzemenin yüzeyinden yayılan elektronların enerjilerini analiz eder.
Deiyonize Su: Deiyonize su, sentez sonrası malzemenin yıkanması için kullanılır. Bu, HF ve diğer kimyasal kalıntıların giderilmesini sağlar. Deiyonize su, çözücü olarak kullanılarak malzemenin saf hali elde edilir.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Quanta 200, FEI): SEM, numunenin yüzeyini yüksek çözünürlüklü olarak görüntülemek için kullanılır. Malzeme yüzeyinin morfolojisini, topografyasını ve bileşimini incelemek için kullanılır.

Kimyasallar ve Malzemeler	Cihazlar
NaOH (%0,1): %0,1'lik sodyum hidroksit çözeltisi, BS peliküllerinin artırılması için kullanılır. Bu çözelti, peliküller üzerindeki organik kalıntıları ve diğer kirleticileri uzaklaştırmak için kullanılır.	Altın Sıçratma Kaplama: Numuneler, SEM'de görüntüleme sırasında yeterli iletkenlik sağlamak için altın ile ince bir tabaka ile kaplanır. Bu, numunenin elektrik yükünü boşaltarak elektron mikroskopunda daha iyi görüntüler elde edilmesini sağlar.
Cu Kα Işınları: Bu, XRD analizinde kullanılan bir ışın türüdür. Ti ₃ C ₂ T _x -MXene ve rBS tabanlı hidrojellerin kristalografik özelliklerini belirlemek için kullanılır.	Potansiyel Durum (CHI 660, ABD): Elektriksel iletkenliğin ölçümü için kullanılan bir cihazdır. Bu cihaz, numunenin iki ucundaki voltaj ve akımı ölçer.
Epiklorohidrin (ECH): Bu, hidrojel oluşumunda kullanılan bir çapraz bağlayıcıdır. BS veya BS/MXene çözeltisi ile karıştırılarak hidrojel oluşumunu sağlar.	TGA Cihazı (TGA8000, PerkinElmer, ABD): Malzemenin termal kararlılığını değerlendirmek için kullanılan bir cihazdır. Bu cihaz, numunenin sıcaklık artışına bağlı olarak ağırlığının değişimini ölçer.
Fosfat Tamponlu Saline (PBS): Numunelerin iletkenliğini ölçmeden önce 24 saat boyunca numunelerin hidrojel ortamında (PH= 7.4) bekletildiği çözeltilerdir. Bu, numunelerin deney öncesinde stabilize olmasını sağlar.	Santrifüj: Deproteinize edilmiş hidroliz çözeltisinin hazırlanması için kullanılan bir cihazdır. Numunelerin çözeltilerden ayrılmasını sağlar. 12000 devir/dakika hızında çalışır.
Selüloz: Enzimatik hidroliz için kullanılan bir enzimdir. Sigma-Aldrich'ten temin edilmiştir. Enzim aktivitesi 370 U/g'dir.	Mikroplaka Okuyucu (Thermo Fisher): Karışımın optik yoğunluğunu ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Bu cihaz, ışığın emilimi ile ilgili renk değişimini ölçer.
DNS Reaktifi (Sigma-Aldrich): İndirgen şekerlerin tespit edilmesi için kullanılan bir kimyasal maddedir. Bu reaktif, indirgen şekerlerin varlığında renk değişikliği gösterir.	Laser Taramalı Konfokal Mikroskop (LSCM, Olympus FV1000, Japonya): Hücrelerin bağlanma ve yayılma davranışlarının incelenmesi için kullanılmıştır. LSCM, hücreleri üç boyutlu olarak görüntülemek için kullanılan güçlü bir mikroskop teknolojisidir.
Tamlama Çözeltisi (0.9% NaCl): Hemoliz oranı testi için kullanılan tamlama çözeltisidir. Bu çözelti, normal tuzlu suyun (NaCl) %0.9'luk bir konsantrasyonunda hazırlanır. Bu, hemoliz testi sırasında kullanılan standart bir çözeltidir.	Instron 5567 Evrensel Test Cihazı: Bu cihaz, malzemelerin sıkıştırma, gerilme, bükülme, yırtılma ve diğer mekanik testlerini gerçekleştirmek için tasarlanmıştır.
Üre: Kimyasal formülü CO(NH ₂) ₂ olan organik bir bileşiktir. Bu bileşik, birçok biyolojik ve endüstriyel uygulamada kullanılır. BS hidrojelin üretiminde, üre birkaç önemli rol oynar:	DSA100 (Krüss Şirketi, Almanya): Yüzey temas açısı analizleri için kullanılan gelişmiş bir sistemdir. Bu cihaz, bir yüzeye düşen sıvı damlasının temas açısını ölçmek için tasarlanmıştır. Temas açısı, sıvının yüzeyde yayılma derecesini belirler ve yüzeyin hidrofilik veya hidrofobik olup olmadığını anlamak için kullanılmaktadır.

3.2. MXENE (Ti₃C₂T_x) SENTEZİ

Bu tezde, rBS ve katmanlı MXene (Ti₃C₂T_x) modifiye hidrojellerin sentezi için bir yöntem geliştirilmiştir. İlk olarak, 1 gram Ti₃AlC₂ içeren bir numune, %49 HF içeren 10 mL'lik bir sulu çözeltiye batırıldı. Bu adım, numunenin HF ile etkileşime girmesini sağlamak ve Ti₃AlC₂'den Ti₃C₂T_x 'e geçişi başlatmak amacıyla gerçekleştirildi. Batırma işlemi özenle 60 °C'de 30 saat boyunca sürdürüldü; bu süreçte numunenin HF ile tam olarak reaksiyona girmesi ve istenilen MXene ürününün oluşması sağlandı. Batırma işlemi sonucunda, çok katmanlı Ti₃C₂T_x-MXene elde edildi. Bu malzeme, santrifüj yardımıyla toplandı. Santrifüj işlemi, istenmeyen katkı maddelerini ve fazla HF çözeltisini ayırtmak için kullanıldı. Santrifüjün hızı 3500 rpm olarak ayarlandı ve işlem süresi 10 dakika olarak belirlendi. Elde edilen materyal, HF kalıntısını gidermek için üç kez etanol ve deiyonize su ile yıkandı. Bu yıkama işlemi, üründe bulunan HF kalıntılarını ve diğer katkı maddelerini uzaklaştırmak için yapıldı. Yıkama işlemi sonunda, arzu edilen saflıkta Ti₃C₂T_x -MXene elde edildi. Son olarak, elde edilen Ti₃C₂T_x tozu -50 °C'de 24 saat boyunca liyofilize edilerek son ürün elde edildi. Bu işlem, ürünü dondurarak suyun buharlaşmasını ve MXene tozunun kalıcı bir şekilde kurutulmasını sağladı. Son ürün, istenilen formda ve saflıkta katmanlı MXene ürünü olarak elde edildi. Bu süreç, Ti₃C₂T_x -MXene'nin başarılı bir şekilde hazırlandı.

3.3. BS PELİKÜLLERİNİN BİYOSENTEZİ VE SAFLAŞTIRILMASI

İlk olarak, *Gluconacetobacter xylium* (ATCC53582) bakterisi, HS (Hestrin-Schramm) besiyeri ortamında statik bir ortamda inkübe edilir. Bu inkübasyon süreci, bakterinin aktif olarak çoğalmasını ve BS üretmesini sağlar. Elde edilen BS pelikülleri, saflaştırma işlemine tabi tutulur. Bu işlem, peliküllerin içinde bulunan herhangi bir kirletici maddenin giderilmesini ve BS'un saf bir formda elde edilmesini amaçlar. İlk saflaştırma adımında, BS pelikülleri 0.1 M NaOH çözeltisine batırılır ve bu çözeltide 2 gün boyunca bekletilir. Bu süreç, peliküllerin yüzeyindeki kirleticilerin ve bakteriyel kalıntıların çözeltiye geçmesini sağlar. Daha sonra, BS pelikülleri 0.1 M NaOH çözeltisi ve deiyonize su karışımında 30 dakika boyunca kaynatılır. Bu kaynatma işlemi, peliküllerin temizlenmesini ve bakteriyel hücre

artıklarının tamamen uzaklaştırılmasını sağlar. BS pelikülleri, kaynatma işleminden sonra herhangi bir kalıntı NaOH'u gidermek için üç gün boyunca deiyonize suya batırılır. Bu süreç, peliküllerin tamamen temizlenmesini ve saflaştırılmasını sağlar. Son olarak, saflaştırılmış BS pelikülleri bir doku karıştırıcı kullanılarak BS karışımına dönüştürülür. Bu karışım daha sonra bir liyofilizatör kullanılarak 24 saat boyunca dondurularak kurutulur. Bu işlem, BS'un toz haline getirilmesini ve uzun süreli saklanabilir hale getirilmesini sağlar. Bu detaylı süreç, başlangıçta BS üretiminden başlayarak, peliküllerin saflaştırılması ve son ürün olan BS tozunun elde edilir.

3.4. rBS HIDROJELİ VE RBS/MXENE ($Ti_3C_2T_x$) KOMPOZİT HIDROJELLERİN SENTEZİ

İlk adımda, %3 ağırlıkça BS çözeltisi, kurutulmuş BS karışımının düşük sıcaklıkta NaOH-Üre-H₂O sistemi (w/w: 7: 12: 81) içinde tamamen çözünmesiyle hazırlanır. Bu işlem, yoğun karıştırma kullanılarak gerçekleştirilir ve bir önceki çalışmalarda belirtildiği gibi, şeffaf ve viskoz bir BS çözeltisi elde edilir. İkinci aşamada, hazırlanan $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin farklı miktarları BS çözeltisine eklenerek, MXene içeren %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 ağırlıkça BS/MXene karışımları elde edilir. Son olarak, rBS hidrojel ve rBS/MXene kompozit hidrojeller, kimyasal ve fiziksel çift çapraz bağlanma yöntemiyle sentezlenir. Bu süreçte, ECH adı verilen bir çapraz bağlayıcı (Sigma) kullanılır. ECH, BS ve BS/MXene çözeltilerine belirli bir oranda eklenir (WBS: VECH= 4: 4.2). Hava kabarcıkları santrifüj ile uzaklaştırıldıktan sonra, ECH içeren BS ve BS/MXene çözeltileri 24 kuyruklu bir tabağa dökülür ve tam kimyasal çapraz bağlanma reaksiyonunun gerçekleşmesi için 4 °C'de 24 saat bekletilir. Elde edilen rBS tabanlı hidrojeller, kalıplardan çıkarıldıktan sonra, fazla ECH'nin uzaklaştırılması ve fiziksel çapraz bağlanmayı indüklemek için 4 °C'de %75'lik bir sulu etanol çözeltisine 30 dakika batırılır. Ardından, NaOH'nin büyük ölçüde nötralize edilmesi için %5 H₂SO₄ çözeltisine 2 saat batırılır ve son olarak, fazla ECH moleküllerinin ve tüm küçük organik ve inorganik moleküllerin tamamen uzaklaştırılması için deiyonize suya 7 gün boyunca batırılır. Bu detaylı süreç, BS hidrojellerinin ve BS/MXene kompozit hidrojellerin başarıyla sentezlenir.

3.5. XRD ANALİZİ

XRD analizi, MXene'ler gibi kristal yapıya sahip malzemelerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu analiz, numunenin kristal yapısal özelliklerini belirlemek için X-ışını kırınımı tekniğini kullanılmaktadır. Numune hazırlığı, genellikle numunenin öğütülmesi veya düzeltilmesi gibi işlemleri içerir ve ölçüm sırasında kullanılan parametreler, ışın kaynağı, örneğin tipi ve detektör tipi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Ölçüm sırasında, MXene numunesi X-ışınlarına maruz bırakılarak difraksiyon deseni elde edilir. Bu desen, difraksiyon piklerinin konumlarını, yüksekliklerini ve genişliklerini içeren veriler sağlar. Analiz sonuçları, MXene'nin kristal yapısal parametrelerini belirleme ve farklı fazların varlığını tespit etme gibi uygulamalar için önemlidir. XRD analizi, malzemenin yapısal özelliklerini anlamak ve uygulamalar için optimize etmek için bir araçtır. XRD analizi, $Ti_3C_2T_x$ -MXene ve rBS tabanlı hidrojenlerin kristalografik özelliklerini ayrıntılı bir şekilde belirlemek için kullanılan önemli bir karakterizasyon tekniğidir. Bu analiz, örneklerin kristal yapılarını, atomik düzenlerini ve kristal hacimlerini tespit etmede kritik bir rol oynamaktadır. PANalytical B.V, Hollanda tarafından üretilen X'Pert3 Powder XRD cihazı, analizlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Bu cihaz, örnekler üzerine Cu K α radyasyonu ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) uygular ve 40 kV ve 40 mA koşullarında çalışır. XRD ölçümleri, örneklerin toz halinde olduğu durumlarda yapılır. Radyasyon örnekler üzerinden geçerken, atomik düzlem yapıları nedeniyle difraksiyon oluşur. Bu difraksiyon deseni, örneklerin kristal yapılarının ve bileşenlerinin tanımlanmasına olanak tanır. Analiz sonuçları, örneklerin kristalografik özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlar ve $Ti_3C_2T_x$ -MXene ve rBS tabanlı hidrojenlerin yapısal özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. XRD analizi, materyallerin karakterizasyonu ve uygulamalarının anlaşılması için kritik bir adımdır. Elde edilen veriler, materyallerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra kristal yapılarının özgünlüğünü de açığa çıkarmaktadır. Bu nedenle, XRD analizi, $Ti_3C_2T_x$ -MXene ve rBS tabanlı hidrojenlerin sentezi ve karakterizasyonu sürecinde önemli bir araç olarak kabul edilmektedir.

3.6. X-IŞINI FOTOELEKTRON SPEKTROSKOPİ (XPS) ANALİZİ

Elementel analiz, bir maddenin bileşiminde bulunan elementlerin ve bu elementlerin miktarlarının belirlenmesi sürecidir. Bu analiz, malzemenin kimyasal özelliklerini anlamak, kalite kontrolü yapmak veya belirli uygulamalara yönelik malzemeler geliştirmek gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Elementel analizde yaygın olarak kullanılan teknikler arasında XPS, enerji dispersif X-ışını spektroskopisi, atom emisyon spektroskopisi, kütle spektrometrisi ve optik emisyon spektroskopisi bulunmaktadır. Örnekler, genellikle uygun bir şekilde hazırlanarak analiz edilir. Örneğin, XPS analizi öncelikle örneğin yüzeyine odaklanan X-ışınları gönderir ve numuneden yayılan elektronları analiz etmektedir. Bu sayede, örneklerin yüzey kimyasal durumları hakkında derinlemesine bilgi sağlar. Elementel analiz, malzemelerin bileşimini ve yapısal özelliklerini belirleyerek, potansiyel uygulamalarını belirlemek ve optimize etmek için önemlidir. Elementel analiz, bir maddenin bileşiminde bulunan elementlerin tespit edilmesi ve miktarlarının belirlenmesi sürecidir. Bu analiz, örneklerin içerdiği elementlerin kimyasal yapılarını ve miktarlarını belirlemek için çeşitli analitik teknikler kullanır. Örnekler kimyasal ayrıştırma, spektroskopik veya spektrometrik yöntemlerle analiz edilir. Elementel analiz, malzemelerin kimyasal özelliklerini anlamak, kalite kontrolü yapmak veya belirli endüstriyel uygulamalara yönelik malzemeler geliştirmek gibi birçok alanda kullanılır. Elementel analiz, $Ti_3C_2T_x$ -MXene ve rBS tabanlı hidrojellerin bileşimlerini ve içerdikleri elementlerin miktarlarını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, örneklerin yüzeyinde bulunan elementlerin kimyasal durumlarını ve bağlanma özelliklerini değerlendirmek için XPS adı verilen bir teknik kullanılarak gerçekleştirilir. Analiz, Japonya'da bulunan KRATOS AXIS-ULTRA DLD-600W XPS cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu yüksek hassasiyetli cihaz, örnek yüzeyine odaklanarak X-ışınları gönderir ve yüzeyden yayılan elektronları analiz ederek örneğin elementel bileşimini belirler. Örneklerin geniş taramaları, 1200-200 eV aralığında gerçekleştirilir. Bu taramalar, örneklerin yüzeyinde bulunan tüm elementlerin tespit edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, C 1s, O 1s ve Ti 2p gibi belirli elementlerin dar taramaları da yapılmıştır. Bu dar taramalar, belirli elementlerin bağlanma durumlarını ve kimyasal durumlarını daha ayrıntılı bir şekilde incelemek

için kullanılmıştır. Elde edilen veriler, örneklerin yüzey kimyasal durumları hakkında derinlemesine bilgi sağlar. Örneğin, Ti 2p yüksek çözünürlüklü spektrumları, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin oksidasyon durumunu ve metalik karakterini belirlemede önemli bilgilendirme sağlamaktadır. Benzer şekilde, C 1s spektrumları, karbonun farklı bağlanma durumlarını ve oksidasyon seviyelerini gösterebilir. Bu analiz, $Ti_3C_2T_x$ -MXene ve rBS tabanlı hidrojenlerin bileşimlerinin ve yüzey özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olur. Ayrıca, materyallerin potansiyel uygulamalarını belirlemek için faydalıdır.

3.7. MORFOLOJİ ANALİZİ

Morfoloji gözlemi, bir malzemenin veya örneğin fiziksel yapısının, şeklinin, boyutlarının, dokusunun ve diğer dışsal özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi ve tanımlanması sürecidir. Bu tür bir gözlem genellikle elektron mikroskobu gibi yüksek çözünürlüklü görüntüleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Morfoloji gözlemi, malzemenin mikro yapılarını, yüzey özelliklerini, porozite derecesini ve yapısal detaylarını belirlemek için önemlidir. Bu bilgi, malzemenin özelliklerini anlamak, karakterize etmek ve belirli uygulamalara yönelik olarak optimize etmek için kullanılır. Morfoloji gözlemi, $Ti_3C_2T_x$ -MXene ve rBS tabanlı hidrojenlerin yapısal özelliklerini anlamak için yapılan önemli bir adımdır. Bu inceleme, numunelerin mikro yapılarını ve yüzey detaylarını belirlemek için SEM kullanılarak gerçekleştirilir. Bu süreç, numunelerin yüzeylerini altın gibi bir metal ile kaplayarak elektriksel iletkenliği artırır ve elektron mikroskopisi sırasında olası yüzey yüklemelerini önler. Quanta 200, FEI marka SEM cihazı kullanılarak yapılan gözlem, yüksek çözünürlük sağlayan bir ivme gerilimi altında gerçekleştirilir. Bu sayede, numunelerin mikro yapıları ve yüzey özellikleri daha ayrıntılı bir şekilde incelenir. Her bir numune için farklı büyütme seviyeleri ve odaklanma ayarları kullanılarak, özellikle $Ti_3C_2T_x$ -MXene ve rBS tabanlı hidrojenlerin yapısal detaylarına odaklanılır. Bu detaylı morfoloji gözlemi, materyallerin fiziksel özelliklerini, yapılarını ve bileşenlerini belirlemek için önemlidir. Ayrıca, materyallerin uygulamalardaki performansını ve etkinliğini anlamak için temel bir adımdır.

3.8. FTIR ANALİZİ

FTIR analizi, bir maddenin IR ışığını kullanarak moleküler yapılarını ve bileşenlerini belirlemek için kullanılan bir analiz tekniğidir. Bu teknik, bir maddenin kimyasal bağlarını, fonksiyonel gruplarını ve moleküler yapılarını tanımlamak için yaygın olarak kullanılır. FTIR analizi, bir FTIR spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilir. Bu cihaz, bir IR kaynağından gelen IR ışığı numuneye gönderir. Numune, bu ışığı emer ve belirli dalga boylarında IR ışık soğurmasına neden olur. Ardından, soğurulan ışık, bir dedektör tarafından algılanır ve bir spektrum oluşturmak için analiz edilir. Elde edilen FTIR spektrumu, numunenin IR emilim desenini gösterir. Her bir emilim piksi, numunenin farklı kimyasal bağlarının varlığını ve yoğunluğunu temsil eder. Bu şekilde, spektrum, numunenin içerdiği fonksiyonel grupları ve moleküler yapıları hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. FTIR analizi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve çeşitli endüstriyel, bilimsel ve tıbbi alanlarda kullanılır. FTIR analizi, malzemelerin kimyasal bileşimlerini ve özelliklerini anlamak için güçlü bir araçtır. Bu nedenle, araştırma laboratuvarlarında, endüstriyel tesislerde ve akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. FTIR analizi, rBS tabanlı hidrojellerin yapısal özelliklerini belirlemek için kullanılan güçlü bir tekniktir. Bu analizde, numunelerin moleküler yapılarındaki değişikliklerin belirlenmesi amacıyla kızılötesi ışık kullanılır. VERTEX 70 modeli Bruker marka FTIR cihazı, bu analiz için kullanılmıştır. Örneklerin FTIR spektrumları, genellikle 4000 cm^{-1} 'den 500 cm^{-1} 'e kadar olan bir dalga sayısında (wavenumber) ölçülür. Bu aralık, örneklerin moleküler yapılarındaki karakteristik bağların ve fonksiyonel grupların spektral özelliklerini gözlemlemek için uygun bir aralıktır. Analiz sırasında, örneklerin spektrumları 5 cm^{-1} çözünürlükte ölçülür. Bu çözünürlük, numunelerin yapısal özelliklerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak tanır. Numuneler, analiz için uygun hale getirilir. Bu, numunenin temizlenmesini, kurutulmasını ve uygun bir şekilde düzeltilmesini içerir. Hidrojeller, kurutulduktan sonra ince bir toz haline getirilir ve FTIR cihazına yerleştirilir. FTIR spektrumlarındaki pikler ve bantlar, örneklerin içerdiği moleküllerin ve fonksiyonel grupların kimyasal bağ yapısını yansıtır. Bu şekilde, hidrojellerin içerdiği bileşenler ve moleküler düzenleri hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Bu detaylı analiz,

rBS tabanlı hidrojellerin kimyasal bileşimini ve yapısal özelliklerini anlamak için önemlidir. Ayrıca, hidrojellerin uygulamalardaki performansını belirlemek için temel bir adımdır.

3.9. MEKANİK ÖZELLİK TESTİ

Mekanik özellik testleri, rBS bazlı hidrojellerin dayanıklılığını, elastikiyetini ve esneklik özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu testler, hidrojellerin sıkıştırma ve gerilme yeteneklerini ölçmek amacıyla Instron 5567 (ABD) adlı evrensel bir makine test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma testleri için, 14 mm çapında ve 14 mm yüksekliğinde silindirik hidrojeller hazırlanmıştır. Gerilme testleri için ise 5 cm uzunluğunda, 3 cm genişliğinde ve 3 mm kalınlığında membran hidrojeller kullanılmıştır. Bu standart boyutlar, test sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini sağlamak için belirlenmiştir. Sıkıştırma ve gerilme testleri, hidrojellerin maksimum gerilme miktarının %80'ine kadar olan hızda, 1 mm/dakika hızla gerçekleştirilmiştir. Hidrojellerin maksimum basınç dayanımı, beş örneğin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Her bir örneğin basınç dayanımı ve Young modülü, gerilme-stres eğrilerinin %0-25 aralığındaki başlangıç doğrusal segmentin eğimi kullanılarak belirlenmiştir. Hidrojellerin esneklik ve iyileşme özelliklerini belirlemek için, dört ardışık sıkıştırma döngüsü yapılmıştır. Bu döngüler, hidrojellerin elastikiyetini ve esnekliğini değerlendirmek amacıyla aynı hızda %70 gerilme miktarına kadar gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek, test sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak amacıyla üç kez test edilmiştir. Bu detaylı mekanik özellik testleri, hidrojellerin uygulama alanlarına yönelik performanslarını anlamak ve optimize etmek için önemlidir.

Hidrojel Numuneleri:

Silindirik Hidrojel Numuneleri:

- Basınç testleri için kullanılırlar.
- 14 mm çapında ve 14 mm yüksekliğindedirler.
- Genellikle hidrojin basınç dayanımını değerlendirmek için kullanılır.

- Silindirik formdaki bu numuneler, homojen bir basınç uygulaması sağlar.

Membran Hidrojel Numuneleri:

- Gerilme testleri için kullanılırlar.
- 5 cm uzunluğunda, 3 cm genişliğinde ve 3 mm kalınlığındadırlar.
- Genellikle hidrojin gerilme dayanımını ve elastik davranışını değerlendirmek için kullanılır.
- Bu numuneler, hidrojin gerilme sırasında nasıl davrandığını incelemek için kullanılır.

Bu numuneler, hidrojin mekanik özelliklerini belirlemek için standart test yöntemlerinde kullanılır. Silindirik hidrojel numuneleri, basınç altında nasıl davrandığını gözlemek için kullanılırken, membran hidrojel numuneleri gerilme altında nasıl davrandığını incelemek için kullanılmaktadır. Bu testler, hidrojin çeşitli uygulamalarda nasıl performans gösterebileceğini anlamak için önemlidir.

3.10. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇÜMÜ

Elektriksel iletkenlik ölçümleri, rBS ve rBS/MXene hidrojinin uygulanabileceği çeşitli alanlarda performanslarını anlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu ölçümler, hidrojin elektriksel iletkenlik seviyelerini belirleyerek, potansiyel olarak elektrikle çalışan cihazlarda veya enerji depolama sistemlerinde kullanılabilecekleri uygunluk düzeyini değerlendirmektedir. Ayrıca, MXene içeriğinin elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisini değerlendirerek, bu tür nanomalzemelerin hidrojin performansını nasıl etkileyebileceğini anlamak da önemlidir. Bu ölçümler, rBS ve rBS/MXene hidrojinin elektriksel özelliklerinin yanı sıra, farklı MXene içeriklerinin hidrojin elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisini anlamak için yapılmıştır. Elde edilen veriler, malzeme tasarımında ve geliştirmede kullanılarak, gelecekteki uygulamalar için optimize edilmiş hidrojin tasarımına rehberlik edebilmektedir. Bu sayede, elektriksel iletkenlik ölçümleri, rBS ve rBS/MXene hidrojinin potansiyel uygulamalarını değerlendirmek ve

gelecekteki enerji depolama, sensör teknolojisi veya elektronik cihazlar gibi alanlarda kullanımlarını optimize etmek için önemli bir araç sağlar. rBS ve rBS/MXene hidrojellerinin elektriksel iletkenliği, MXene içeriği farklı olan serilerde bulunan örneklerle yapılmıştır. Her bir grupta, beş örnek ortalama değeri alınarak iki prob yöntemi kullanılmıştır. Elektriksel iletkenliği ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, numunenin iki ucuna yerleştirilmiş iki elektrot arasındaki elektriksel direnç ölçülür. BC ve rBC/MXene hidrojellerinin, farklı MXene içerikleriyle elektriksel iletkenliği, iki problu yöntemle ölçülmüştür ve her grup için beş numunenin ortalaması alınmıştır. Kısaca, hidrojel örnekleri (l = 3 mm, d = 12 mm) testten önce 24 saat boyunca fosfat tamponlu salin (PBS, pH = 7.4) içinde bekletildi ve ardından iki paralel titanyum elektrot hidrojelini iki ucuna sabitlendi. İletkenlikleri, potansiyel durum (CHI 660, USA) kullanılarak tespit edildi. Elektriksel iletkenlik (σ , S/cm) değeri, aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır:

$$\sigma = \frac{4Il}{V \cdot \pi d^2} \quad (3.1)$$

Burada, V ve I potansiyel cihaz tarafından ölçülen gerilim ve akımı; l ve d sırasıyla hidrojellerin uzunluğu ve çapını temsil eder. Bu hesaplama, her bir hidrojel örneği için yapılmıştır. Elde edilen iletkenlik değerleri, hidrojellerin elektriksel özelliklerini ve MXene içeriğinin etkisini anlamak için kullanılmıştır.

3.11. TERMOGRAVİMETRİK ANALİZ

TGA, bir malzemenin ısıtma, soğutma veya sabit sıcaklık altında kütle değişimlerini ölçen bir tekniktir. TGA analizi sırasında, numunenin ağırlığı, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedilir. Özellikle, hidrojellerin bileşenlerinin termal bozunma sıcaklıkları ve bozunma hızları belirlenerek, malzemelerin termal kararlılığı hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Bu bilgiler, hidrojellerin çeşitli uygulama alanlarına uygunluğunu belirlemek ve termal koşullarda nasıl davranacaklarını öngörmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, TGA analizi, rBS/MXene hidrojellerinin bileşenlerinin termal bozunma davranışlarındaki değişiklikleri belirlemek için MXene katkısının etkisini değerlendirmiştir. Bu sayede,

MXene'nin hidrojenlerin termal kararlılığı üzerindeki etkisi daha detaylı bir şekilde anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, rBS/MXene hidrojenlerinin termal özelliklerinin optimize edilmesi ve istenen uygulama alanlarına uygun hale getirilmesi için önemli bir rehber sağlamaktadır. rBS ve rBS/MXene hidrojenlerinin termal kararlılığını belirlemek amacıyla TGA gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, hidrojenlerin ısıya karşı nasıl davrandığı incelenmiştir. Örnekler, 5 mg ağırlığında alınarak TGA cihazı (TGA8000, PerkinElmer, ABD) kullanılarak test edilmiştir. Analiz, hidrojenlerin ısıtma hızı 10 °C/dakika olan bir ortamda argon gazı altında gerçekleştirilmiştir. Numunenin termal analizinin inert bir ortamda gerçekleştirilmesini sağlamak için kullanılan bir gazdır. Bu, numunenin oksidasyonunun önlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu sıcaklık koşulları, hidrojenlerin termal bozunma davranışını incelemek için uygun bir ortam sağlamıştır. Isıtma süreci oda sıcaklığından başlayarak 600 °C'ye kadar devam etmiştir. Bu sıcaklık aralığında, hidrojenlerin bileşenlerinin termal bozunma sıcaklıkları ölçülmüştür. Analiz sonuçları, hidrojenlerin termal kararlılığını ve MXene katkısının bu kararlılık üzerindeki etkisini belirlemek için değerlendirilmiştir.

3.12. *IN VITRO* BİYUYUMLULUK TESTİ

In vitro biyoyumluluk testi, rBS ve rBS/MXene hidrojenlerinin biyomedikal uygulamalarda potansiyel olarak güvenli ve etkili olup olmadığını belirlemek için kapsamlı bir şekilde yapılmıştır. Bu test, hidrojenlerin çözünürlüğünü ve parçalanma hızını belirlemek için Selülaz enzimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Selülazın hidrojenler üzerindeki etkisi, hidrojenlerin doğal ortamda nasıl davrandığını ve biyolojik ortamlarda ne kadar stabil olduklarını anlamak için değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, hidrojenlerin enzimatik parçalanma süreçlerini ayrıntılı bir şekilde belgelemekte ve bu süreçlerin zaman içindeki değişimini göstermektedir. Ayrıca, enzimatik hidroliz sonucunda oluşan şeker içeriği, hidrojenlerin biyoyumluluk profillerini belirlemek için önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Deproteinize edilmiş hidroliz çözeltilerindeki toplam şeker ve indirgenmiş şeker içeriği, hidrojenlerin biyolojik ortamlarda ne kadar etkili bir şekilde parçalandığını ve bu süreçlerin sonuçlarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu kapsamlı *in vitro* biyoyumluluk testi, hidrojenlerin biyomedikal uygulamadaki kullanım

potansiyelini belirlemek için önemli bir adımdır ve malzemelerin güvenliği ve etkinliği hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. rBS ve rBS/MXene hidrojenlerinin biyoyumlu özellikleri, laboratuvar ortamında enzimatik hidroliz kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu test, hidrojenlerin doğal ortamda çözünürlüğünü ve parçalanma hızını belirlemek için yapılmıştır. İlk olarak, 0,5 gram selüloz içeren bir çözelti hazırlanmıştır. Selüloz enzimatik hidroliz için kullanılan bir enzimdir. Sigma-Aldrich'ten temin edilmiştir. Enzim aktivitesi 370 U/g'dir.

Selüloz çözeltisi, 100 mL HAc/NaAc tampon çözeltisine eklenerek oluşturulmuştur. Enzim çözeltisinin hazırlanması için kullanılan bir tampon çözeltisidir. Bu çözelti, hidroliz işlemi sırasında uygun bir pH seviyesini korumak için kullanılır. pH değeri 4.8'dir. Bu süreç boyunca, hidrojenlerin enzimatik parçalanma durumu düzenli aralıklarla gözlemlenmiştir. Ardından, belirli zaman aralıklarında, enzimatik hidroliz çözeltisinden numune alınmıştır. Bu numuneler daha sonra sevag reaktifi kullanılarak deproteinize edilmiştir. Değerlendirme için kullanılan bir reaktiftir. Bu reaktif, hidroliz çözeltisindeki proteinleri çıkarmak ve şeker içeriğini ölçmek için kullanılır. Kloroform ve n-bütanolün karışımından oluşur. Deproteinize edilmiş enzimatik hidroliz çözeltisi, toplam şeker ve indirgenmiş şeker içeriğinin tespiti için kullanılmıştır. Bu detaylı test süreci, hidrojenlerin biyoyumlu profillerini belirlemek ve biyomedikal uygulamalar için uygunluğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3.12.1. Toplam Şeker Miktarının Belirlenmesi

Toplam şeker miktarının belirlenmesi için yapılan antroin-sülfürik asit yöntemi, hidrojenlerdeki şeker miktarını hassas bir şekilde ölçmek için etkili bir spektrofotometrik yöntemdir. Bu yaygın olarak kullanılan yöntem, sadece glukozu değil, aynı zamanda farklı şeker türlerinin varlığını da tespit edebilir. İlk aşamada, antroin sülfat çözeltisi hazırlanır; bunun için 0.1 g antroin, 50 mL konsantre sülfürik asit içine eklenerek çözelti oluşturulur. Sonrasında, deproteinize edilmiş enzimoliz çözeltisinden 200 µL alınarak, bu çözeltiye 800 µL antroin sülfat eklenir ve karışım 10 dakika boyunca kaynar su banyosunda inkübe edilir. Bu inkübasyon süresi, reaksiyonun tamamlanması ve maksimum renk oluşumunun sağlanması için

yeterlidir. Daha sonra, karışımın optik yoğunluğu, 620 nm dalga boyunda bir mikropilaka okuyucu kullanılarak ölçülür. Bu ölçüm, şeker miktarını dolaylı olarak belirlemek için kullanılırken, toplam şeker miktarının belirlenmesi için bir standart eğri oluşturulur. Bu amaçla, 1 g/L glukoz standart çözeltisi kullanılarak benzer bir prosedür izlenir ve standart çözeltiye dayanarak, örneklerdeki toplam şeker miktarı hesaplanır ve sonuçlar standart eğriye göre raporlanır. Bu detaylı analiz, hidrojellerin biyoyumluluk ve şeker içeriği hakkında önemli bilgiler sağlar. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların daha kapsamlı bir değerlendirmesi için, biyoyumluluk testlerinde kullanılan şeker miktarının yanı sıra hidrojellerin biyolojik sistemlerle etkileşimlerini de değerlendirmek önemlidir.

3.12.2. Enzimoliz Çözeltisindeki İndirgenmiş Şeker Miktarının Tespiti

Elde edilen indirgenmiş şeker miktarının değerlendirilmesi, hidrojellerin biyo okunabilirliği hakkında daha derinlemesine bir anlayış sağlamaktadır. Bu değerlendirme, hidrojellerin biyolojik sistemlerle etkileşimini anlamak ve biyomedikal uygulamalardaki potansiyelini belirlemek açısından önemlidir. Özellikle, indirgenmiş şeker miktarının belirlenmesi, hidrojellerin biyolojik ortamlarda çözünürlüğünü ve bozunma hızını anlamak için önemli bir gösterge olabilir. Ayrıca, bu bilgiler, hidrojellerin hedeflenen biyolojik dokular veya sistemlerle etkileşim düzeyini değerlendirmeye yardımcı olabilir ve dolayısıyla biyolojik uyumluluk ve biyolojik stabilite açısından önemli ipuçları sağlayabilir. Bununla birlikte, indirgenmiş şeker miktarının değerlendirilmesi, hidrojellerin biyolojik sistemlerdeki metabolik etkilerini de anlamak için önemlidir. Örneğin, hidrojellerin indirgenmiş şekerlerle etkileşimi, biyolojik sistemlerdeki glukoz metabolizması ve enerji üretimi üzerinde potansiyel etkileri olabilir. Bu etkilerin belirlenmesi, hidrojellerin uzun vadeli biyolojik etkilerini ve biyoyumluluğunu daha iyi anlamamıza yardımcı olabilir. Sonuç olarak, indirgenmiş şeker miktarının belirlenmesi, hidrojellerin biyolojik performansını, biyo okunabilirliğini ve biyomedikal uygulamalardaki potansiyelini değerlendirmek için önemli bir araç olarak görülmektedir. Enzimoliz çözeltisindeki indirgenmiş şeker miktarı, 3,5-Dinitrosalisilik asit (DNS) reaktif yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem, indirgenmiş şekerlerin varlığını ve miktarını belirlemek için yaygın olarak kullanılan

bir spektrofotometrik tekniktir ve hidrojellerin biyo okunabilirliği hakkında değerli bilgiler sağlar. İlk olarak, deproteinize edilmiş enzimoliz çözeltilisinden 400 µL alınarak, buna 600 µL DNS reaktifi (Sigma-Aldrich) eklenmiştir. Bu karışım daha sonra, reaksiyonun tamamlanması ve renk oluşumunun sağlanması için 10 dakika boyunca kaynar su banyosunda inkübe edilmiştir. Sonrasında, karışımın optik yoğunluğu 540 nm dalga boyunda bir mikropilaka okuyucu (Thermo Fisher) kullanılarak ölçölmüştür. Bu ölçüm, karışımdaki indirgenmiş şeker miktarını dolaylı olarak belirlemek için yapılmıştır. İndirgenmiş şeker miktarını belirlemek için bir standart eğri oluşturulmuştur. Bu amaçla, aynı yöntemle elde edilen indirgenmiş şeker standart çözeltilisi kullanılmıştır. Bu standart çözeltiliye dayanarak, örneklerdeki indirgenmiş şeker miktarı hesaplanmış ve sonuçlar standart eğriye göre raporlanmıştır. Bu detaylı analiz, hidrojellerin biyo okunabilirliği ve içerdikleri indirgenmiş şeker miktarı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

3.12.3. Hidrofiliklik Analizi

Hidrojellerin hidrofilik özellikleri, su temas açısı analiz sistemi (DSA100, Krüss Şirketi, Almanya) kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu sistem, bir malzemenin yüzeyine düşen bir su damlasının temas açısını ölçmek için kullanılır. Temas açısı, suyun yüzeyde yayılma eğilimini belirler ve dolayısıyla malzemenin hidrofobik veya hidrofilik olduğunu gösterir. Düşük temas açıları hidrofilik, yüksek temas açıları ise hidrofobiklik ile ilişkilendirilir. Bu analiz, hidrojellerin su ile etkileşimini ve yüzeylerinin hidrofilik derecesini belirlemek için yapılmıştır. Öncelikle, farklı rBS tabanlı hidrojellerin yüzeylerine 3 µL hacminde su damlacıkları ayrı ayrı damlatılmıştır. Daha sonra, su damlacıklarının yüzeydeki durumu, belirli zaman aralıklarında bir kamera tarafından çekilerek gözlemlenmiştir. Bu sayede, hidrojellerin su ile etkileşim süreci ve su damlacıklarının yüzeydeki dağılımı hakkında bilgi elde edilmiştir. Her bir grup için beş örnek kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır. Bu sayede, analizin sonuçları daha güvenilir hale getirilmiştir. Bu detaylı analiz, hidrojellerin hidrofilik özelliklerinin anlaşılmasına ve hidrojellerin suya karşı davranışlarının belirlenmesine yardımcı olmuştur. Bu bilgiler, hidrojellerin çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliğini değerlendirmek için önemlidir.

3.12.4. Su Emme Kapasitesi Testi

rBS tabanlı hidrojellerin su emme yeteneği, fosfat tamponlu salin (PBS, pH=7.4) içinde 37 °C'de bekletilerek test edilmiştir. Bu test, hidrojellerin çevresel sıvılarla etkileşimini ve hidrojen bağları aracılığıyla suyun emilimini değerlendirmek için yapılmıştır. Öncelikle, dondurularak kurutulmuş rBS ve rBS/MXene hidrojelleri PBS içine yerleştirilmiş ve 37 °C'de belirli bir süre bekletilmiştir. Daha sonra, belirlenen zaman aralıklarında şişmiş örnekler PBS'den çıkarılmış ve yüzeydeki çözelti, filtre kâğıdı kullanılarak atılmıştır. Ardından, hidrojeller tartılmıştır, böylece su alımı miktarı belirlenmiştir.

Su emme yeteneği, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Su alımı (\%)} = [(W_s - W_d) / W_d] \times 100 \quad (3.2)$$

Burada, W_s şişmiş hidrojelin ağırlığını ve W_d orijinal dondurarak kurutulmuş hidrojelin ağırlığını temsil etmektedir. Her grup için beş örneğin ortalaması alınmıştır, böylece verilerin güvenilirliği sağlanmıştır. Bu detaylı test, hidrojellerin su tutma yeteneğini ve hidrofobik ya da hidrofilik özelliklerini belirlemek için önem arz etmektedir.

3.13. HÜCRE KÜLTÜRÜ

Bu çalışmada kullanılan NIH3T3 (Fare embriyonik fibroblast hücre hattı), tipik kültür için Wuhan Üniversitesi'nde bulunan koruma merkezinden temin edilmiştir. Fare embriyonik fibroblast hücre hattı olan NIH3T3, Wuhan Üniversitesi Tıp Kültür Koruma Merkezi'nden temin edilmiştir. Bu hücre hattı, hücre kültürü deneylerinde yaygın olarak kullanılan bir model sistemidir. Hücreler, %5 CO₂ seviyesinde nemli bir ortamda ve 37 °C sıcaklıkta bulunan bir inkübatörde DMEM ortamında yetiştirilmiştir. Hücre kültüründe kullanılan besiyeri ortamıdır. Bu ortam, hücrelerin uygun bir şekilde büyümesi ve çoğalması için gerekli besin maddelerini ve koşulları sağlar. Kültür ortamı, her üç günde bir değiştirilmiştir.

Kültür ortamında kullanılan bileşenler şunlardır:

DMEM ortamı

%10 fetal sığır serumu

%1 penisilin/streptomisin

Bu ortam, hücrelerin optimum büyüme ve proliferasyon koşullarını sağlamak için seçilmiştir. Hücrelerin sağlıklı bir şekilde çoğalabilmesi ve istenen fenotipleri sergileyebilmesi için düzenli olarak beslenmeleri ve uygun bir ortamda tutulmaları önemlidir.

3.13.1. Sitotoksisite Değerlendirmesi

Çalışmada, farklı MXene içeriklerine sahip rBS tabanlı hidrojellerin sitotoksisitesini araştırmak için NIH3T3 hücrelerince salınan kültür ortamındaki laktat dehidrogenaz (LDH) aktivitesi belirlenmiştir. Bu değerlendirme, hidrojellerin biyotoleransını ve hücreler üzerindeki olası zararlı etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Testler öncesinde, 7 mm çapında ve 2 mm kalınlığında olan rBS ve rBS/MXene hidrojellerinin yuvarlak örnekleri, sterilizasyon için 2 saat boyunca %75 etanol ile işlem görmüş ve ardından fosfatlı tamponlu salin (PBS, pH=7.4) ile yıkanmıştır. Daha sonra, artırılmış hidrojeller, 37 °C’de 1 gün boyunca DMEM ortamında bir denge şişme durumuna ulaşmak üzere 24-pozlu bir plağa batırılmıştır. 24-Well Plak, hücre kültüründe kullanılan bir plak türüdür. Bu plak, birçok kültür kabını tek bir yapıda birleştirir ve hücrelerin büyümesi ve çoğalması için uygun bir ortam sağlar. Sonrasında, farklı hidrojel örneklerinin yuvarlak örnekleri üzerine, her birine 1×10^4 hücre/well yoğunluğunda NIH3T3 hücreleri eklenmiştir. İnkübasyonun 1. ve 3. günlerinde kültür ortamı toplanmış, ardından santrifüj edilerek süpernatant alınmıştır. LDH aktivitesi, süpernatanttan alınan örneklerde Beyotime (Çin) marka LDH kit kullanılarak üretici talimatlarına göre belirlenmiştir. Bu kit, LDH’nin spektrofotometrik analizini gerçekleştirmek için gerekli reaktifleri ve talimatları içerir. Bu sayede, hidrojellerin hücreler üzerindeki etkisi ve sitotoksisite seviyeleri değerlendirilmiştir. Bu detaylı değerlendirme, hidrojellerin biyomedikal uygulamalarda güvenliğini ve etkinliğini değerlendirmek için önemlidir. Elde edilen sonuçlar, hidrojel bileşenlerinin hücreler üzerindeki

etkilerini anlamamıza ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmaları için gereken önlemleri alabilmemize yardımcı olmuştur.

3.14. HÜCRE CANLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

Hücre canlılığı, CCK-8 kit (Dojindo, Japonya) kullanılarak belirlenmiştir. Hücre canlılığını değerlendirmek için kullanılan bir ticari kittedir. Bu kit, hücrelerin metabolik aktivitesini ölçmek için kullanılır ve hücre canlılığını, hücrelerin rengini değiştiren bir reaksiyon aracılığıyla belirler. Kısaca, temas testinde, NIH3T3 hücreleri (1 × 10⁴/well), sterilize edilmiş rBS tabanlı hidrojellerin yuvarlak örneklerinin üzerinde kültürlenmiştir. Örneklerin çapı 7 mm ve kalınlığı 2 mm'dir ve bu kültür 96-pozlu plakalarda 1, 3 ve 5 gün boyunca sürdürülmüştür. Ayrıca, temas testi için tüm rBS tabanlı hidrojellerin ekstraktı, 2 gün boyunca DMEM ortamına batırılarak elde edilmiştir. Bu ekstraktlar, NIH3T3 hücreleri (1 × 10⁴/well) ile 96-pozlu plakalarda 1, 3 ve 5 gün boyunca kültürlenmiştir. Her plak, 96 kültür kuyusuna sahiptir ve her kuyu farklı bir deney koşulunu içerebilir. Daha sonra, kültür ortamı 100 µL serum içermeyen ortam ve 10 µL CCK-8 çözeltisi ile değiştirilmiş ve bu karışım, bir CO₂ inkübatöründe 37 °C'de bir saat daha inkübe edilmiştir. Ardından, ortamdaki optik yoğunluk, mikropilaka okuyucuda (Thermo Fisher) 450 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Hücre canlılığı, aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$\text{Hücre canlılığı (\%)} = [(OD_S - OD_B) / (OD_N - OD_B)] \times 100 \quad (3.3)$$

Burada, OD_S, OD_B ve OD_N sırasıyla örneklere, boş kontrol ve negatif kontrol için ölçülen optik yoğunluk değerlerini ifade eder. Deneysel verilerin geçerliliğini sağlamak için tüm örnekler üçlü olarak analiz edilmiştir. Hücre canlılığı deneyleri, hücrelerin bir materyalle etkileşime girdiği durumlarda materyalin biyoyumluluğunu ve biyotoleransını değerlendirmek için kritik bir araçtır. Bu deneylerde, hücrelerin metabolik aktivitesini yansıtan optik yoğunluk değerleri ölçülür. Ölçümler, örneklerin, boş kontrol ve negatif kontrol olarak adlandırılan standart ortamlarla karşılaştırılmasıyla yapılır. Negatif kontrol, hücrelerin normal

büyüme koşullarını yansıtan standart bir ortamdır. Örnekler ise, hücrelerin materyalle etkileşimi sonucu oluşan reaksiyonları değerlendirmek için kullanılır. Bu örnekler, genellikle hidrojeller gibi çeşitli materyallerden oluşur ve hücrelerle temas veya temas etmeyen testler için kullanılabilir. Deneyin geçerliliğini sağlamak için, tüm örnekler üçlü tekrarlı olarak test edilir. Bu yaklaşım, verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır. Hücre canlılığı (%) hesaplaması, örneklerin optik yoğunluk değerlerinin belirlenmesine dayanır. Bu hesaplama, örneklerin optik yoğunluğunun, negatif kontrol ve boş kontrol değerlerine göre oransal olarak belirlenmesiyle yapılır. Bu yöntemler ve hesaplamalar, materyallerin hücreler üzerindeki etkilerini objektif bir şekilde değerlendirmek için önemlidir.

3.14.1. Hemoliz Oranı Testi

rBS tabanlı hidrojellerin çeşitli MXene içerikleri için kan uyumluluğu değerlendirmesi, hemoliz oranı testi ile gerçekleştirilmiştir. Test, bir önceki literatüre dayanarak yapılmıştır. Kısaca, farklı hidrojellerin yuvarlak örnekleri, çapı 10 mm ve kalınlığı 2 mm olan örnekler, öncelikle tuzlu su (0.9% NaCl çözeltisi) içerisinde üç kez yıkanmıştır. Daha sonra, test öncesinde 37 °C'de 24 saat boyunca bir 24-pozlu plakada tuzlu suya batırılmıştır. Ardından, örnekler, 1.5 mL'lik tüpler içinde her birinde 0.9 mL tuzlu su bulunan tüplere aktarılmış ve her bir tüpe, koyunun seyreltilmiş tam kanından ($V_{\text{kan}} : V_{\text{tuzlu su}} = 1:1.25$) 0.1 mL eklenmiştir. Pozitif ve negatif kontrol için sırasıyla, yalnızca distile su ve seyreltilmiş tam kan içeren tuzlu su kullanılmıştır. Sonrasında, 37 °C'deki su banyosunda 1 saat daha inkübe edildikten sonra, her tüp 1000 rpm'de 5 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Süpernatantın optik yoğunluğu, 545 nm dalga boyunda mikropilaka okuyucu (Thermo Fisher) kullanılarak ölçülmüştür. Hemoliz oranı (HR), aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$HR (\%) = [(OD_S - OD_B) / (OD_P - OD_N)] \times 100 \quad (3.4)$$

Burada, OD_S , OD_N ve OD_P sırasıyla örneklerin ortalama absorbans değerlerini, negatif kontrolü ve pozitif kontrolü ifade etmektedir. Her bir grup için ortalama altı örnek alınmıştır. Hemoliz oranı testi için kullanılan tamlama çözeltisi

%0.9'luk NaCl içeren standart bir çözeltilidir ve koyun tam kanı testin hedef materyalidir. Koyun tam kanı, laboratuvar testlerinde kullanılmak üzere önceden hazırlanır ve belirli bir konsantrasyonda seyreltilir. Test numunelerinin ve çözeltilerinin saklanması ve işlenmesi için 1.5 mL tüpler kullanılır. Test sırasında, farklı numunelerin ve kontrollerin optik yoğunluk değerleri ölçülür ve bu değerler, numunelerin hemoliz seviyelerini belirlemek için kullanılır. Negatif kontrol, hemoliz olmayan bir ortamı temsil ederken, pozitif kontrol tam kanın tamamen hemolize olduğu bir ortamı temsil eder. Numuneler arasındaki hemoliz seviyelerinin karşılaştırılması, test edilen rBS bazlı hidrojellerin kan uyumluluğunu değerlendirir. Tüm numuneler üçlü tekrarlı olarak test edilir, bu da deneyin geçerliliğini sağlamaktadır.

3.14.2. Hücre Yapışma ve Yayılma Davranışı Çalışmaları

NIH3T3 hücrelerinin farklı rBS tabanlı hidrojel üzerindeki yapışma ve yayılma davranışlarını değerlendirmek amacıyla SEM ve lazer taramalı konfokal mikroskopi (LSCM, Olympus FV1000, Japonya) kullanılmıştır. Bu çalışmada, hücrelerin hidrojel yüzeyine tutunma ve yayılma şekillerini görselleştirmek için çeşitli mikroskopik tekniklerin birleşimi kullanılmıştır. Öncelikle, sterilize edilmiş rBS tabanlı hidrojel örneklerine 5×10^4 hücre/yuva yoğunluğunda NIH3T3 hücreleri eklenmiştir. Bu hücrelerin, hidrojel yüzeyine nasıl bağlandığı ve nasıl yayıldığı gözlemlenmiştir. 3 gün boyunca kültür edildikten sonra, hücreler fosfat tamponlu tuz çözeltisi (PBS, pH=7.4) ile yıkanmış, ardından %2.5 glutaraldehit ile sabitlenmiş ve derecelendirilmiş etanol serisi kullanılarak dehidrate edilmiştir. Daha sonra, örnekler dondurularak kurutulmuş ve altın ile sıvılaştırılarak SEM gözlemi için hazırlanmıştır. SEM, hücrelerin hidrojel yüzeyine bağlanma şekillerini ve yayılma morfolojilerini yüksek çözünürlüklü görüntülerle görselleştirmek için kullanılmıştır. Ayrıca, hücrelerin içindeki hücre dışı matriks ile etkileşimlerini gözlemlemek için LSCM kullanılmıştır. Bu yöntemde, hücrelerin F-aktin iskeletinin yapısal organizasyonu TRITC-Falloidin (Sigma) ile boyanarak incelenmiştir.

3.14.3. Canlı/Ölü Boyama Testi

NIH3T3 hücrelerinin, rBS tabanlı hidrojeller üzerindeki proliferasyon, canlılık ve erken yapışma ile yayılma yetenekleri, Canlı/Ölü Boyama kiti kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu test, hücrelerin hidrojel yüzeyine tutunma ve gelişme davranışlarını belirlemek için yapılmıştır. İlk olarak, NIH3T3 hücreleri sterilize edilmiş farklı rBS tabanlı hidrojellerin yuvarlak örneklerine (her biri 14 mm çapında ve 2 mm kalınlığında) ekilmiştir. Hücreler, her biri 5×10^4 hücre/yuva yoğunluğunda, 24-yuvalı bir plakaya ekilmiştir. 1 gün boyunca kültüre edildikten sonra, hücreler PBS çözeltisi ile üç kez yıkanmıştır. Daha sonra, hücrelerin canlılık ve ölü hücre sayısını belirlemek için Canlı/Ölü Boyama kiti kullanılmıştır. Bu amaçla, hücrelerin üzerine Calcein-AM (2 μ M) ve PI (4 μ M) çalışma çözeltileri eklenmiştir. Canlı ve ölü hücreleri belirlemek için kullanılan floresan boyalar. Calcein-AM canlı hücreleri yeşil olarak boyarken, PI ölü hücreleri kırmızı olarak boyar. Bu çalışma çözeltileri, stok çözeltilerden hazırlanmış ve hücrelere 500 μ L/yuva olacak şekilde eklenmiştir. Hücreler, 37 °C'de 30 dakika boyunca inkübasyona alınmıştır. İnkübasyonun ardından, örnekler serum içermeyen bir ortam ile yıkanmış ve LSCM altında incelenmiştir. Bu şekilde, hücrelerin canlılık durumu ve yayılma davranışı görsel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, elektrostimülasyonun etkisini belirlemek için, NIH3T3 hücreleri saf rBS hidrojel, rBS/MXene-1% ve rBS/MXene-2% hidrojellerinde günde 30 dakika boyunca çeşitli potansiyeller altında elektrostimüle edilmiştir. Elektrostimülasyon sonrası 3 günlük inkübasyonun ardından, hücrelerin canlılık durumu ve yayılma davranışı yine Canlı/Ölü Boyama testi ile değerlendirilmiştir. Bu deneyler, hücrelerin hidrojel yüzeyine tutunma ve gelişme yeteneklerini, hidrojellerin biyolojik uyumluluğunu ve hücrelerin hidrojel üzerindeki proliferasyonunu anlamak için yapılmıştır.

3.14.4. Metiltiyazoltetrazolyum Testi

MTT (metiltiyazoltetrazolyum) testi, hücrelerin canlılığını ve proliferasyonunu değerlendirmek için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu test, hücrelerin metabolik aktivitesini belirlemek için bir indikatör olan MTT'nin kullanılmasını içerir. NIH3T3 hücreleri, saf rBS hidrojel, rBS/MXene-1% ve

rBS/MXene-2% hidrojellerindeki proliferasyon canlılığının değerlendirilmesi için bu testle incelenmiştir. Bu deneyde, elektriksel uyarım (ES) sonrası kültür ortamı, 3 gün boyunca serum içermeyen bir ortam ve MTT çözeltisi ile değiştirilir. MTT çözeltisi, hücrelerin mitokondriyal redüktaz enzimleri tarafından indirgenerek formazan kristallerine dönüşür. Bu formazan kristalleri daha sonra dimetil sülfoksit (DMSO) eklenerek çözünür hale getirilir. DMSO, formazanın hücrelerden salınmasını ve çözünmesini sağlar, böylece optik yoğunluk ölçülebilir hale gelir. Elde edilen çözeltinin optik yoğunluğu, bir mikropilaka okuyucu kullanılarak 490 nm dalga boyunda ölçülür. Optik yoğunluk, hücrelerin canlılığı ve proliferasyonu ile doğrudan ilişkilidir, bu nedenle daha yüksek bir optik yoğunluk, daha fazla canlı hücre ve daha fazla proliferasyonu gösterir. Bu deney, farklı hidrojel türlerindeki hücrelerin proliferasyonunu değerlendirmek için güvenilir bir yöntemdir. Tüm örnekler, deneyin güvenilirliğini sağlamak amacıyla üç kez test edilir.

3.14.5. Kantitatif Gerçek Zamanlı Polimeraz Zincir Reaksiyonu (qRT-PCR)

Yara iyileşme sürecinin moleküler düzeyde incelenmesi için Vasküler endotel büyüme faktörü, Doku Büyüme Faktörü- β (TGF- β) ve epidermal büyüme faktörü genlerinin ekspresyon seviyeleri belirlenmiştir. Yara iyileşme sürecini değerlendirmek için hedeflenen genlerdir. Bu genlerin ifade seviyeleri qRT-PCR kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, her bir tedavi grubunda ($n = 4$) bulunan örneklerden toplam ribonükleik asit (RNA) Trizol reaktifi (Invitrogen, ABD) kullanılarak çıkarılmıştır. Daha sonra, 1 μ g RNA, ters transkripsiyon reaktifleri kiti (Roche, Almanya) kullanılarak komplementer DNA (cDNA)'ya dönüştürülmüştür. Elde edilen cDNA'lar, Applied Biosystems 7500 Hızlı Gerçek Zamanlı PCR Sistemi (Applied Biosystems, ABD) kullanılarak kantitatif gerçek zamanlı PCR ile analiz edilmiştir. PCR işlemi, başlangıç aktive etme adımından sonra belirli sıcaklık profiliyle (95 °C'de 2 dakika) 40 döngüde gerçekleştirilmiştir. Her bir döngü, hedef genin belirli bir sıcaklıkta (94 °C'de 3 s) denatüre edilmesi ve ardından genin spesifik primerlerle bağlanabileceği belirli bir sıcaklıkta (60 °C'de 30 s) primer uzatma adımını içermiştir. Tüm PCR reaksiyonları, önceden belirlenmiş gen bölgelerini hedefleyen primerlerdir. Primerler, hedef genlerin ifade seviyelerini

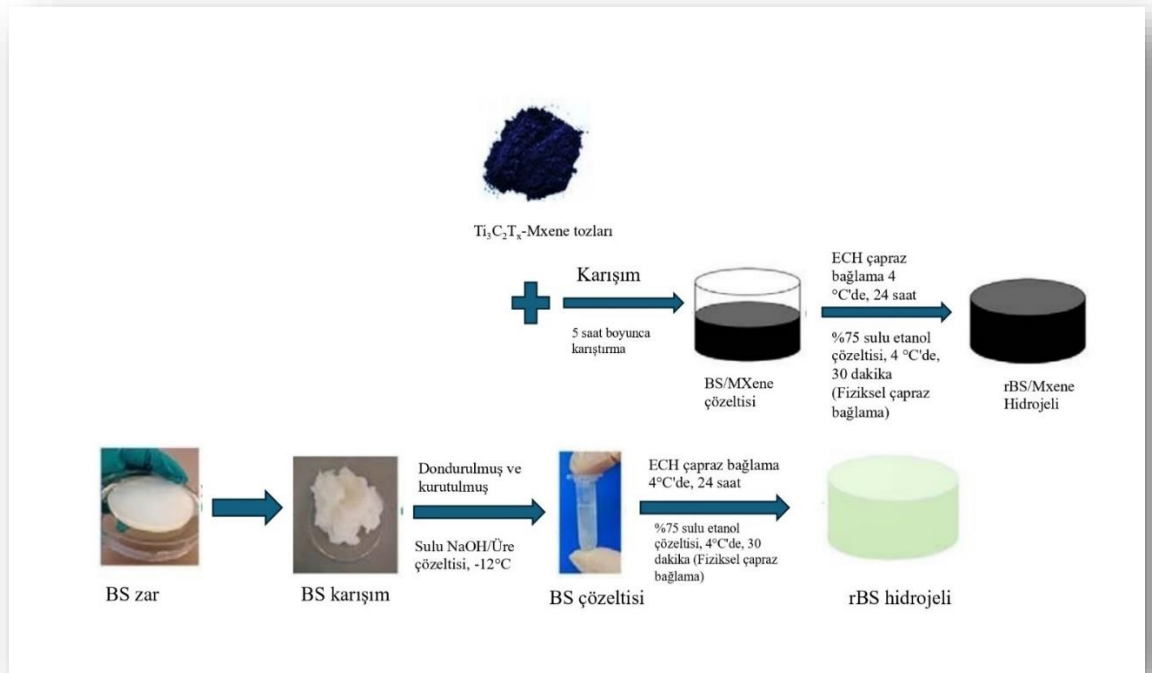
belirlemek için kullanılmıştır. Primer dizileri ve spesifikasyonları, Tablo 3’de sunulmuştur. Elde edilen veriler, hedef genlerin ifade düzeylerinin analizi için standart döngü eşik (Ct) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu analizler, yara iyileşme sürecine katkıda bulunan genlerin tedavi grupları arasındaki ifade farklarını belirlemek için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3 qTR-PCR için kullanılan primer dizileri

Primerler	Yön	Sıralama
VEGF	İleri	5'-TCACTATGCAGATCATGCGGA-3
	Ters	3'-GTCCTATGCAGATCATGCGGA-3'
TGF- β	İleri	5'ATGACATGAACCGACCCTTC-3'
	Ters	5'TGTGTTGGTTGTAGAGGGCA-3'
EGF	İleri	5'-TCTGAACCCGGACGGATTTG-3'
	Ters	5'GACATCGCTCGCCAACGTAG-3'

SONUÇ

rBS/MXENE OLUŞTURMA SÜRECİ



Şekil 6 Saf rBS hidrojeli ve rBS/MXene kompozit hidrojel için sentetik sürecin şematik diyagramları.

Şematik diyagramda, saf rBS hidrojeli ve rBS/MXene üretim süreci adım adım açıklanmaktadır. İlk olarak, $Ti_3C_2T_x$ -MXene tozlarının hazırlanması adımı yer alır. Bu adımda, MXene tozları başlangıç malzemesi olarak kullanılır. Daha sonra, BS/MXene çözeltisinin hazırlanması aşamasına geçilir. Bu aşamada, MXene tozları ile BS malzemesi bir araya getirilir ve 5 saat boyunca karıştırılarak homojen bir çözelti elde edilir. Üçüncü adımda, BS/MXene kompozit hidrojeli (rBS/MXene) hazırlanır. Bu işlem, ECH (epiklorohidrin) çapraz bağlayıcı kullanılarak gerçekleştirilir. İlk olarak, BS/MXene çözeltisi ECH ile 4°C'de 24 saat boyunca

çapraz bağlanır. Daha sonra, fiziksel çapraz bağlama için %75 sulu etanol çözeltisinde işleme tabi tutulur ve sonunda rBS/MXene hidrojel elde edilir.

Dördüncü ve son adımda, saf BS hidrojel (rBS) hazırlanır. İlk olarak, saf BS zarı hazırlanır ve sulu NaOH/Üre çözeltisi ile -12°C 'de işleme tabi tutulur. Daha sonra, karışım dondurulup kurutulur ve elde edilen BS çözeltisi, ECH çapraz bağlayıcı kullanılarak 4°C 'de 24 saat boyunca işleme tabi tutulur. Son olarak, fiziksel çapraz bağlama için %75 sulu etanol çözeltisinde işleme tabi tutulur ve rBS hidrojel elde edilir.

Özetle, bu süreçlerde hem saf BS hidrojel hem de BS/MXene kompozit hidrojel ürünleri elde edilir. MXene'nin eklenmesiyle kompozit hidrojel elde edilirken, saf BS işleminde sadece BS kullanılarak hidrojel oluşturulmaktadır.

FARKLI GLUKOZ VE D-SAKKARİK ASİT POTASYUM TUZU ORANLARININ KOMAGATAEIBACTER XYLINUS ÜZERİNDEKİ BÜYÜME, SELÜLOZ ÜRETİMİ VE MXENE'NİN TERMAL İNDİRGENMESİ İLE FİLM OLUŞUMUNA ETKİSİ



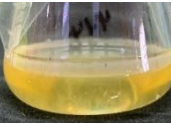

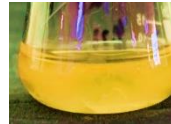
Bu çalışma, glukoz (Glc) ve D-Sakkarik asit potasyum tuzunun (KCl) farklı oranlarının *Komagataeibacter xylinus*'un büyümesi, selüloz üretimi ve MXene'nin termal indirgenmesi ile film oluşumu üzerindeki etkisini incelemektedir. Çalışma kapsamında, beş farklı Glc oranı kullanılarak çeşitli deneyler yapılmıştır: 4:0, 3:1, 2:2, 1:3 ve 0:4. Tüm Glc oranları için film oluşumu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu, tüm kombinasyonların *Komagataeibacter xylinus*'un selüloz üretimi ve film oluşumu için uygun olduğunu göstermektedir. Su içeriği, 4:0 oranında 99.04 ± 0.21 iken, 3:1 oranında 98.98 ± 0.31 , 2:2 oranında 99.06 ± 0.37 , 1:3 oranında 99.03 ± 0.15 ve 0:4 oranında 99.40 ± 0.10 olarak ölçülmüştür. Su içeriği oranları, filmlerin oldukça yüksek su içeriğine sahip olduğunu ve bu durumun oranlara göre çok fazla değişmediğini göstermektedir.

Verim açısından, en yüksek verim 4:0 oranında elde edilmiştir (3.17 ± 0.24 g/L). Bu oran Glc'nin en yüksek olduğu oran olup, Glc oranının azalmasıyla verim

de düşmektedir. 3:1 oranında verim 2.45 ± 0.13 g/L, 2:2 oranında 2.61 ± 0.29 g/L, 1:3 oranında 2.13 ± 0.17 g/L ve 0:4 oranında 1.14 ± 0.17 g/L olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, Glc'nin selüloz üretimi için kritik bir rol oynadığını ve oranının artmasıyla verimin de arttığını göstermektedir. Tablodaki temizleme ve işleme kısmında, her bir Glc oranı için elde edilen selüloz filmlerinin görselleri sunulmuştur. Bu görseller, filmlerin görsel olarak değerlendirilmesi için önemli bir veri sağlamaktadır. MXene'nin termal indirgenmesi kısmında, farklı Glc oranlarına bağlı olarak MXene filmlerinin renk değişimleri gözlemlenmiştir. 4:0 oranında elde edilen MXene koyu kahverengi, 3:1 oranında açık kahverengi, 2:2 oranında turuncu, 1:3 oranında sarı ve 0:4 oranında açık sarı renkte görülmüştür. Bu renk değişimleri, farklı oranlardaki termal indirgeme işleminin MXene'nin optik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Glukoz ve D-Sakkarik asit potasyum tuzunun farklı oranlarının *Komagataeibacter xylinus*'un büyümesi, selüloz üretimi ve MXene'nin termal indirgenmesi ile film oluşumu üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, belirli Glc oranlarının selüloz üretimi ve MXene'nin optik özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

Tablo 4 Glukoz (Glc) ve D-Sakkarik Asit Potasyum Tuzunun (SA) Farklı Oranlarının *Komagataeibacter xylinus*'un Büyümesi, Selüloz Üretimi ve Filmin Termal İndirgenmesi ile MXene Oluşumu Üzerindeki Etkisi

Özellik	BS	SABS-1	SABS-2	SABS-3	SABS-4
Glc: SA	4:0	3:1	2:2	1:3	0:4
Film oluşumu olup olmadığı	Oluşum	Oluşum	Oluşum	Oluşum	Oluşum
					
Su içeriği (%)	99.04 ± 0.21	98.98 ± 0.3	99.06 ± 0.37	99.03 ± 0.15	99.40 ± 0.10

Verim (g/L) 3.17±0.24 2.45±0.13 2.61±0.29 2.13±0.17 1.14±0.17

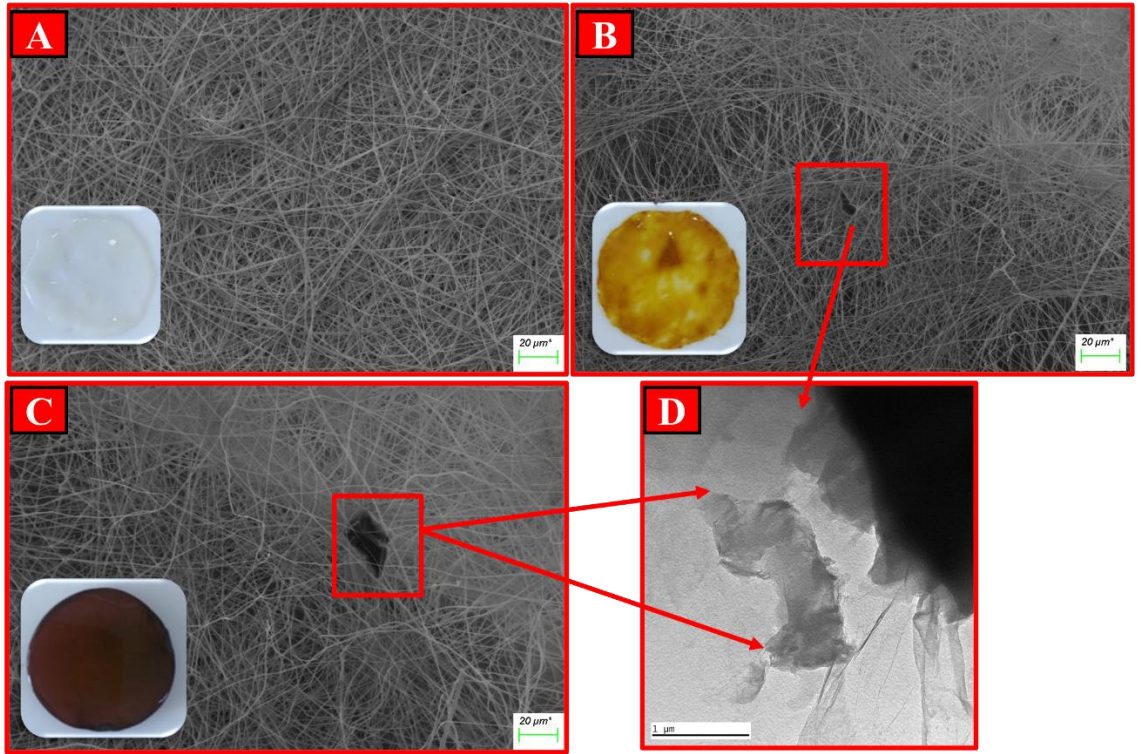
Temizleme ve
işleme



MXene'nin
termal
indirgenmesi



SEM MORFOLOJİK GÖRÜNTÜLERİ



Şekil 7 A.rBS nanofibril hidrojellerin optik mikroskopi görüntüsü, B. rBS/MXene-0.5% hidrojeli ve C. rBS/MXene-1% hidrojeli için SEM morfolojik görüntüleri. D. fBS'ye yüklenen MXene yapıların TEM morfolojik görüntüleri.

Ti₃C₂Tx -MXene'nin iki farklı görüntüsünü içermektedir:

a) Optik Mikroskopi Görüntüsü: Görselin sol tarafında, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin makroskopik görünümü bulunmaktadır. Bu, toz halinde siyah veya koyu renkli bir madde olarak görünmektedir. Optik mikroskopi görüntüleri genellikle malzemenin genel morfolojisini ve makroskopik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır.

B) SEM Görüntüsü: Görselin sağ tarafında, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin yüksek çözünürlüklü SEM görüntüsü bulunmaktadır. SEM görüntüsü, malzemenin mikroskopik yapısını ve yüzey morfolojisini detaylı bir şekilde gösterir. Bu görüntüde, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin tipik katmanlı yapısı açıkça görülmektedir. Katmanlar halinde istiflenmiş ince tabakalar veya yaprak benzeri yapılar dikkat çekmektedir. Bu tür yapılar, MXene malzemelerinin özelliklerini anlamada kritik öneme sahiptir.

SEM görüntüsündeki ölçek çubuğu, görüntüdeki detayların boyutlarını anlamamıza yardımcı olur. Bu ölçek çubuğu, 20 mikrometre (μm) uzunluğundadır ve görüntünün yaklaşık 100,000 kez büyütüldüğünü gösterir. Bu da malzemenin nanoyapısının ince detaylarını gözlemlememizi sağlar.

A) görseli rBS nanofibril malzemenin makroskopik görünümünü sunarken, B) görseli mikroskopik seviyede hem rBS'nin hem de rBS'ye coating olan yani yüklenen MXene (%1 oranda) yapısını detaylı yüzey morfolojisini ve yapısını ortaya koymaktadır. Bu tür analizler, malzemenin yapısal ve fiziksel özelliklerini anlamak için oldukça önemlidir.

Görselde, farklı MXene içeriklerine sahip rBS/MXene hidrojenlerinin yüzeyinin, kesitinin ve gözenek duvarlarının SEM görüntüleri gösterilmektedir. Her bir hidrojel numunesi için yüzey, kesit ve gözenek duvarlarının detaylı incelemeleri yapılmıştır. Görüntülerde kırmızı oklar kullanılarak MXene'nin matris içindeki dağılımı ve yerleşimini D) görselinde TEM morfolojisiyle vurgulanmıştır. Aşağıda her bir görüntü detaylı olarak açıklanmıştır:

Yüzey Görüntüleri (A, B, C):

A: rBS nanofibril hidrojenli yüzeyi. BS yapısı fibril yapıdadır ve bu durum Sem morfolojisinde görülmüştür.

B: rBS/MXene-0.1% hidrojelü yüzeyi. Burada da kırmızı oklar MXene parçacıklarının rBS matrisine gömülmesini gösterir.

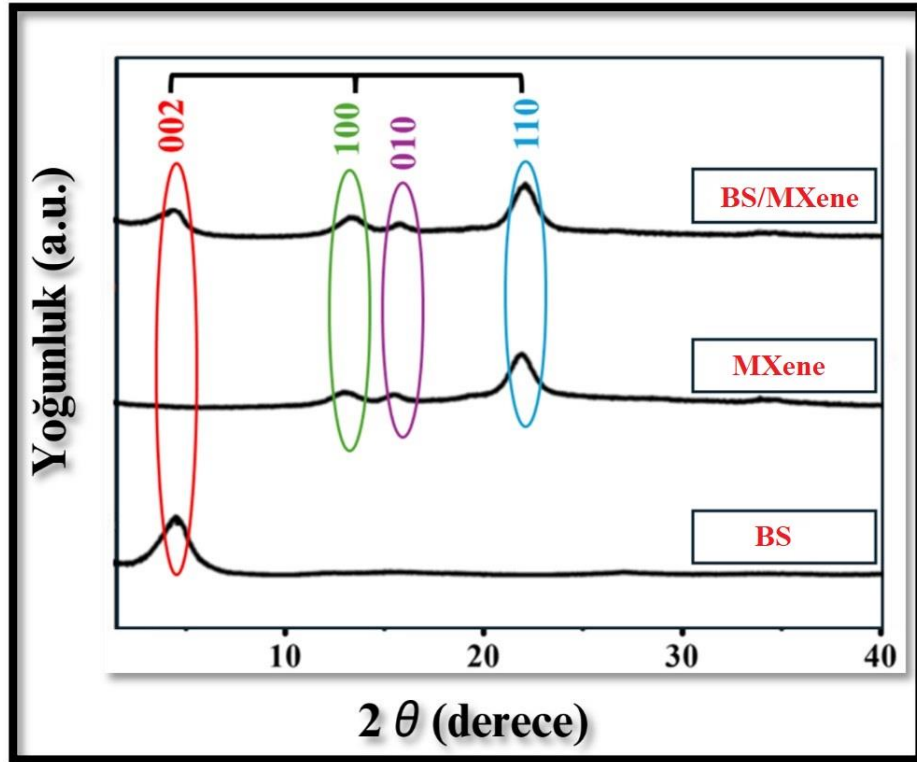
C: rBS/MXene-2% hidrojelü yüzeyi. Yine kırmızı oklar MXene'nin matris içinde gömülmesini ve yüzeydeki yerleşimini işaret eder.

Kesit Görüntüleri (D):

D: MXene kesiti. Fibril yapı içinde MXene'in daha net olarak nano katmanlı yapısı gözükmektedir.

Bu SEM mikrografiler, farklı konsantrasyonlarda MXene içeren rBS/MXene hidrojelünün mikroyapısal özelliklerini ve MXene'nin matristeki dağılımını göstermektedir. Görüntüler, MXene'nin rBS matrisine homojen bir şekilde dağılabildiğini ve hem yüzeyde hem de gözenek duvarlarında yerleştiğini ortaya koymaktadır. Bu tür detaylı mikroyapısal analizler, kompozit malzemelerin performans ve işlevselliğinin anlaşılmasında kritik öneme sahiptir.

XRD SONUÇLARI



Şekil 8 Ti_3AlC_2 ve $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin XRD deseni.

Görselde, Ti_3AlC_2 ve $Ti_3C_2T_x$ -MXene'nin XRD (X-ray Difraksiyon) desenleri gösterilmektedir. XRD desenleri malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi sağlar ve belirli bir malzemeye özgü kristal düzlemlere karşılık gelen pikler içerir. Grafikte yoğunluk (y eksen) ve 2θ (derece) (x eksen) verilmiştir.

Grafikte üç farklı örneğin XRD desenleri görülmektedir:

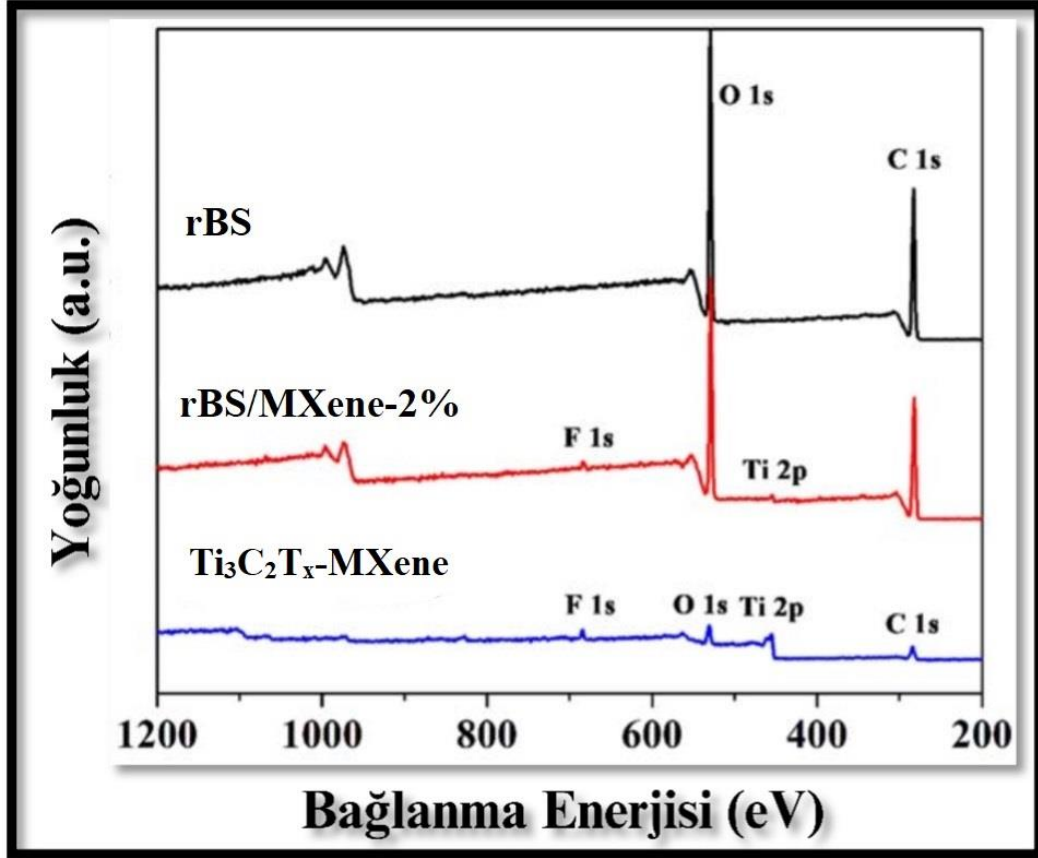
BS: En altta yer alan bu desen, sadece BS örneğini temsil etmektedir.

MXene: Orta kısımda yer alan desen, MXene örneğini temsil etmektedir.

BS/MXene: En üstte yer alan desen, BS ve MXene karışımını temsil etmektedir.

Pikler, kristal yapısının belirli düzlemleri arasındaki uzaklıklarla ilişkilidir. Bu pikler genellikle hkl indeksleri ile tanımlanır. Burada, belirli hkl düzlemlerine karşılık gelen pikler farklı renklerle işaretlenmiştir. Her bir desenin pik pozisyonları ve yoğunlukları, malzemenin kristal yapısının ve bileşiminin anlaşılması için önemlidir. Grafikten görülebileceği üzere, BS/MXene karışımı, BS ve MXene'ye özgü piklerin birleşimini göstermektedir. Bu XRD desenleri, Ti_3AlC_2 ve $Ti_3C_2T_x$ - MXene'nin kristal yapılarının karakterizasyonu için kullanılmıştır ve farklı örneklerin kristal yapılarını karşılaştırmak amacıyla gösterilmektedir. Bu tür analizler, malzemelerin yapısal özelliklerini anlamak ve belirli uygulamalar için uygunluklarını değerlendirmek için kullanılmaktadır.

XPS TARAMA SPEKTRUMLARI



Şekil 9 Ti₃C₂T_x-MXene, saf rBS hidrojel ve rBS/MXene-2% hidrojelinin XPS tarama spektrumları.

Grafik, Ti₃C₂T_x-MXene, saf rBS hidrojel ve rBS/MXene-2% hidrojelinin XPS tarama spektrumlarını göstermektedir. XPS, malzemelerin yüzey kimyasını ve element dağılımını analiz etmek için kullanılmaktadır. Grafikte yatay eksen bağlanma enerjisini (eV) ve dikey eksen yoğunluğu (a.u.) göstermektedir. Her bir örnek için farklı elementlerin zirve sinyalleri izlenebilmektedir.

Ti₃C₂T_x-MXene Spektrumu: Bu spektrumda Ti (Titanium) 2p, C (Carbon) 1s ve O (Oxygen) 1s zirveleri belirgin olarak gözlemlenmektedir. Ti 2p zirvesi yaklaşık 460 eV civarında bulunur ve MXene'in ana bileşeni olan titanyumu temsil eder. O 1s

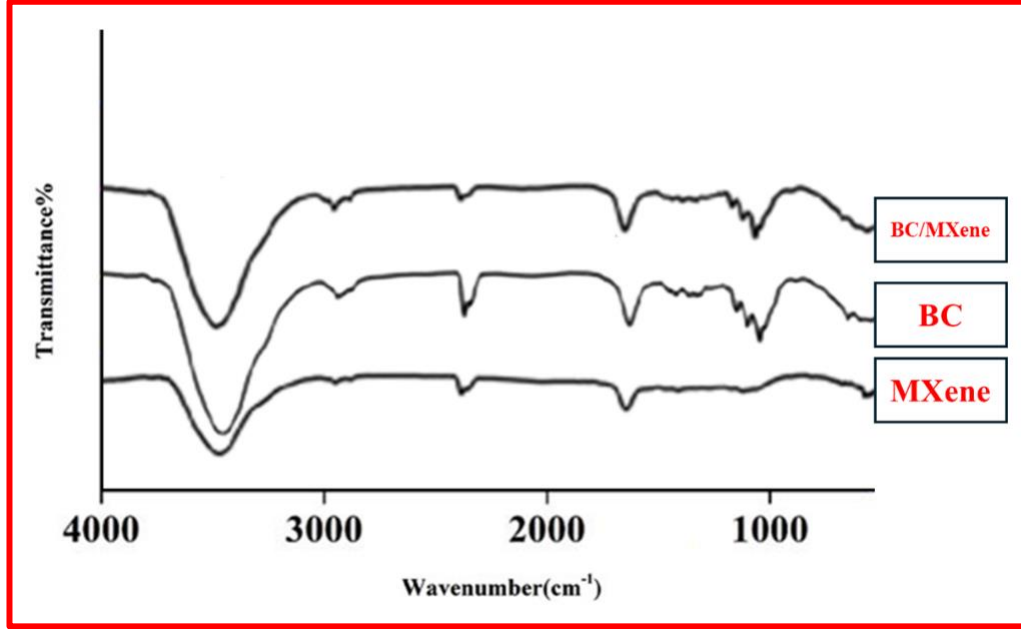
zirvesi yaklaşık 530 eV civarında gözlemlenir, bu MXene yüzeyindeki oksijen gruplarını işaret eder. C 1s zirvesi ise yaklaşık 285 eV civarında bulunmaktadır.

rBS/MXene-2% Hidrojeli Spektrumu: Bu spektrum, rBS/MXene-2% kompozit hidrojelini göstermektedir. Bu spektrumda, hem rBS'nin hem de MXene'in karakteristik zirveleri görülebilmektedir. Ti 2p, C 1s ve O 1s zirveleri burada da bulunur. Ancak, yoğunluk ve zirve şekilleri saf MXene'den farklıdır, çünkü bu spektrumda rBS'nin etkisi de mevcuttur.

Saf rBS Hidrojeli Spektrumu: Saf rBS hidrojelinde spektrumunda, C 1s ve O 1s zirveleri belirgindir. Bu zirveler, rBS'nin ana bileşenleri olan karbon ve oksijen gruplarını temsil eder. Ti 2p zirvesi bu spektrumda bulunmaz, çünkü saf rBS hidrojelinde titanyum içermemektedir.

Her üç spektrum birlikte incelendiğinde, $Ti_3C_2T_x$ -MXene'in karakteristik Ti, C ve O zirveleri rBS/MXene-2% kompozit hidrojelinde de mevcuttur. Ancak, saf rBS hidrojelinde sadece karbon ve oksijen zirveleri bulunur. Bu farklılıklar, MXene'in rBS ile birleştiğinde spektral özelliklerinin değiştiğini ve her iki bileşenin de kompozit hidrojel yüzey kimyasını etkilediğini göstermektedir. Özetle, bu XPS spektrumları, rBS/MXene-2% hidrojelinin yüzey kimyasını anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır. $Ti_3C_2T_x$ -MXene'in karakteristik zirveleri ve rBS'nin etkisi, kompozit hidrojel yüzeyinde bulunan elementlerin ve kimyasal bağların analizini sağlamaktadır.

FTIR SPEKTRUMLARI



Şekil 10 Saf BS hidrojel ile çeşitli MXene içeriklerine sahip BS/MXene hidrojellerinin FTIR spektrumları

Yukarıdaki grafikte, saf BS hidrojel (BS) ile farklı MXene içeriklerine sahip BS/MXene hidrojellerinin FTIR spektrumları gösterilmektedir. FTIR spektrumları, malzemelerin kimyasal bileşimlerini ve fonksiyonel gruplarını belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Görselde üç farklı spektrum yer almaktadır:

MXene FTIR Spektrumu: Bu spektrum en alt kısımda yer almaktadır ve sadece MXene tozlarının FTIR spektrumunu temsil etmektedir. Dalgaboyu ekseninde 4000 cm⁻¹ ile 500 cm⁻¹ arasında uzanan çeşitli pikler gözlemlenmektedir. Bu pikler, MXene'nin karakteristik fonksiyonel gruplarını ve kimyasal bağlarını temsil eder.

BS FTIR Spektrumu: Ortada yer alan bu spektrum, saf BS hidrojelinin FTIR spektrumunu göstermektedir. Bu spektrumda, BS'nin yapısal özelliklerine ve fonksiyonel gruplarına ait karakteristik pikler gözlemlenir. Özellikle, 3000 cm⁻¹ civarında geniş bir OH gerilme bandı ve 1000-1500 cm⁻¹ aralığında çeşitli C-O ve C-H bükülme bantları dikkat çekmektedir.

BS/MXene Kompozit Hidrojeli (rBS/MXene) FTIR Spektrumu: Üstte yer alan bu spektrum, BS ve MXene'nin birleşiminden oluşan kompozit hidrojin FTIR spektrumunu temsil eder. Bu spektrumda hem BS hem de MXene'ye ait karakteristik pikler gözlemlenebilir. Bu kombinasyon, kompozit malzemede her iki bileşenin de kimyasal varlığını ve etkileşimlerini ortaya koyar.

Spektrum Analizi:

4000-3000 cm^{-1} aralığı: Genellikle OH ve NH gerilme vibrasyonlarını temsil eder. BS ve BS/MXene spektrumlarında bu bölgede geniş bantlar gözlemlenmektedir, bu da hidroksil gruplarının varlığını gösterir.

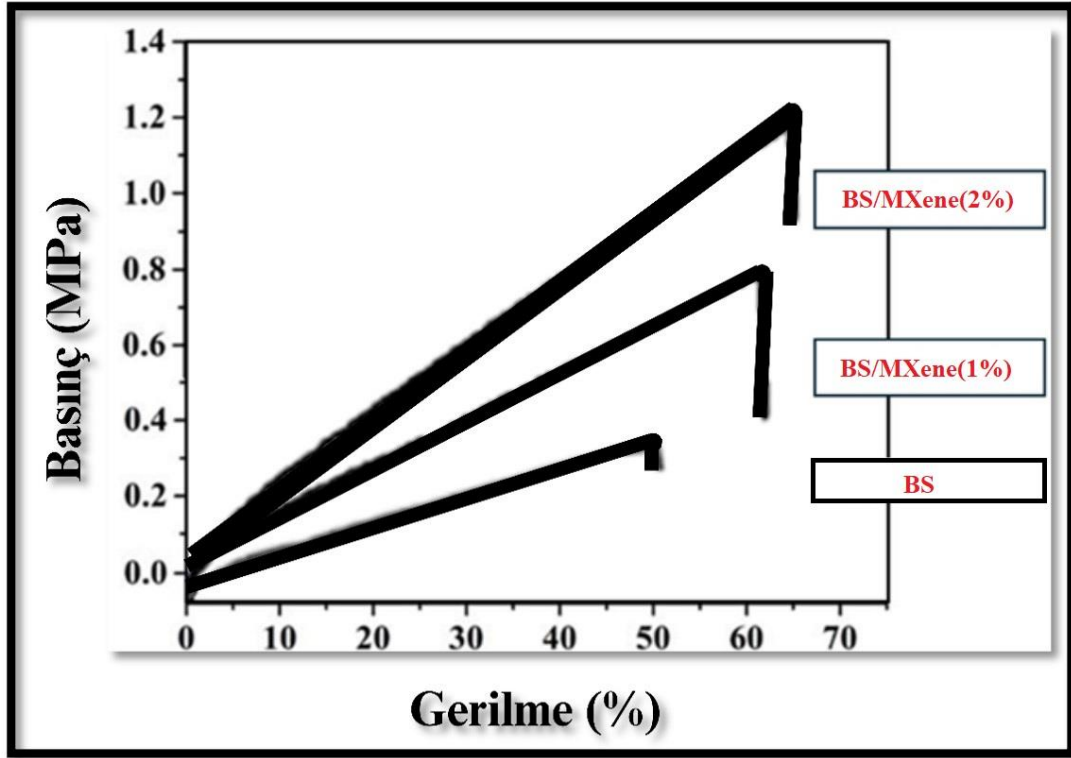
3000-2000 cm^{-1} aralığı: C-H gerilme vibrasyonlarını içerir, ancak bu spektrumlarda belirgin bir pik gözlemlenmemektedir.

2000-1500 cm^{-1} aralığı: C=O ve C=C gerilme vibrasyonlarını temsil edebilir. BS ve BS/MXene spektrumlarında bu bölgede belirgin pikler bulunabilir.

1500-1000 cm^{-1} aralığı: C-O ve C-H bükülme vibrasyonlarını içerir. BS ve BS/MXene spektrumlarında bu bölgede belirgin pikler bulunur.

Bu FTIR spektrumları, BS ve MXene'nin kimyasal yapıları hakkında bilgi vermektedir ve BS/MXene kompozit hidrojinin, her iki bileşenin de kimyasal özelliklerini taşıdığını göstermektedir. Bu, kompozit malzemenin sentezi sırasında her iki bileşenin başarılı bir şekilde birleştirildiğini ve bir arada bulunduğunu kanıtlamaktadır.

BS/MXENE MEKANİK SONUÇLARI



Şekil 11 Değişen maksimum sıkıştırmaya sahip BS/MXene (%2 ağırlıkça) hidrojinin basınç-gerilme eğrileri.

Grafikte, farklı MXene içeriklerine sahip BS/MXene hidrojinin basınç-gerilme (stress-strain) eğrileri sunulmaktadır. Grafik, saf BS hidrojeni ile %1 ve %2 ağırlıkça MXene içeren BS/MXene hidrojinin maksimum sıkıştırma altındaki mekanik performanslarını karşılaştırmaktadır. X eksenini deformasyon yüzdesini (%), Y eksenini ise stres (MPa) değerlerini göstermektedir.

Saf BS Hidrojeni: Bu eğri saf BS hidrojinine aittir. Deformasyon yüzdesi arttıkça, BS hidrojeni belirli bir stres altında deforme olur. Maksimum stres değeri, %50-60 deformasyon aralığında yaklaşık 0.3 MPa civarındadır. Saf BS hidrojeni, MXene içermediğinden dolayı nispeten daha düşük mekanik dayanım gösterir.

BS/MXene (%1) Hidrojeli: %1 ağırlıkça MXene içeren BS/MXene hidrojinin eğrisidir. Bu hidrojin deformasyon yüzdesi arttıkça, stres değeri saf BS hidrojinine göre daha yüksek bir artış gösterir. Maksimum stres değeri, yaklaşık %50 deformasyonda 0.8 MPa civarındadır. Bu, MXene'nin BS matrisi içerisinde bulunmasının hidrojin mekanik dayanımını artırdığını göstermektedir.

BS/MXene (%2) Hidrojeli: %2 ağırlıkça MXene içeren BS/MXene hidrojinin eğrisidir. Deformasyon yüzdesi arttıkça, bu hidrojel en yüksek stres değerine ulaşır. Maksimum stres değeri, yaklaşık %55-60 deformasyonda 1.2 MPa civarındadır. Bu, MXene içeriğinin artmasıyla birlikte hidrojin mekanik dayanımının belirgin bir şekilde yükseldiğini gösterir.

Grafik, MXene içeriğinin BS hidrojinlerinin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Saf BS hidrojeli en düşük mekanik dayanımı gösterirken, %1 ve %2 ağırlıkça MXene içeren hidrojinlerin mekanik dayanımları sırasıyla artış göstermektedir. Bu sonuçlar, MXene'nin BS matrisine dahil edilmesinin hidrojinlerin sıkıştırma dayanımını artırdığını ve MXene oranı arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiğini kanıtlamaktadır. Bu bulgular, MXene'nin mekanik olarak dayanıklı kompozit hidrojinlerin geliştirilmesinde önemli bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Tablo 5 Oda sıcaklığında çeşitli MXene içeriğine sahip BS ve BS/MXene hidrojinlerinin kuvvet ve gerilme özellikleri (n=4).

Örnekler (Hidrojinler)	Sıkıştırma			Gerilim		
	σ_{Comp} [MPa]	ε_{Comp} [%]	E_{Comp} [MPa]	σ_{Tens} [MPa]	ε_{Tens} [%]	E_{Tens} [MPa]
BS	0.98±0.01	3.82±0.25	71.98±3.03	0.14±0.02	66.24±2.91	0.45±0.12
BS/MXene (1 % wt)	1.44±0.28	3.90±0.39	70.93±2.27	0.15±0.02	62.83±2.67	0.45±0.10
BS/MXene (2 % wt)	1.20±0.06	4.38±0.26	70.57±1.74	0.18±0.03	56.31±3.70	0.48±0.11

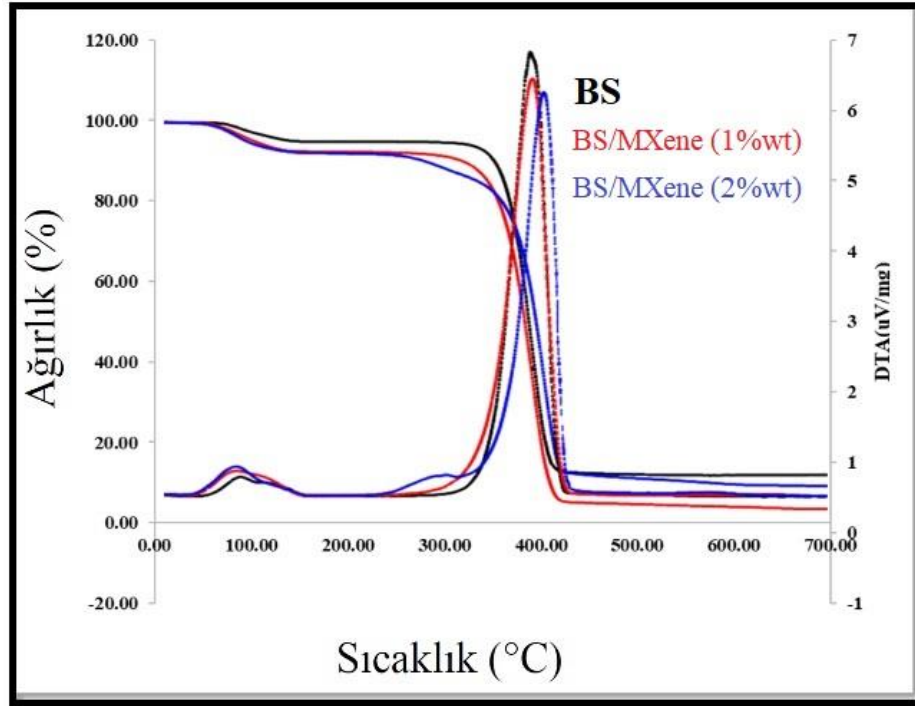
σ_{Comp} , ε_{Comp} ve E_{Comp} sırasıyla kırılma noktasındaki gerilim, kırılma uzaması ve sıkıştırma altındaki modülü ifade eder.

σ_{Tens} , ϵ_{Tens} ve E_{Tens} sırasıyla gerilme dayanımı, kırılma uzaması ve gerilme altındaki Young modülünü ifade eder.

Tabloda, çeşitli MXene içeriğine sahip BS ve BS/MXene hidrojellerinin oda sıcaklığındaki sıkıştırma ve gerilme özellikleri gösterilmektedir. Tablo, bu hidrojellerin kırılma noktalarındaki gerilim, kırılma uzaması ve sıkıştırma/gerilme altındaki modül değerlerini karşılaştırmaktadır.

MXene içeriğinin BS hidrojellerinin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Saf BS hidrojel en düşük mekanik dayanımı gösterirken, %1 ve %2 ağırlıkça MXene içeren hidrojellerin mekanik dayanımları sırasıyla artış göstermektedir. Bu sonuçlar, MXene'nin BS matrisine dahil edilmesinin hidrojellerin sıkıştırma dayanımını artırdığını ve MXene oranı arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiğini kanıtlamaktadır. Bu bulgular, MXene'nin mekanik olarak dayanıklı kompozit hidrojellerin geliştirilmesinde önemli bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

TGA-DTA ANALİZ SONUÇLARI



Şekil 12 Farklı MXene içeriğine sahip BS tabanlı hidrojellerin TGA-DTA analizi.

Grafikte, farklı MXene içeriğine sahip BS tabanlı hidrojellerin TGA (Termogravimetrik Analiz) ve DTA (Diferansiyel Termal Analiz) sonuçları gösterilmektedir. Bu analizler, malzemelerin ısıl kararlılığını ve termal davranışını değerlendirmek için kullanılır.

TGA Analizi:

Başlangıç Ağırlık Kaybı: İlk 100°C'de, tüm örneklerde su kaybına bağlı olarak bir miktar ağırlık kaybı gözlemlenir. Bu, malzemelerdeki su veya nemin buharlaşmasına bağlıdır.

Ana Ağırlık Kaybı: Yaklaşık 300°C - 400°C aralığında, tüm örneklerde büyük bir ağırlık kaybı gözlemlenir. Bu, malzemelerin ana yapısının termal bozunmasını temsil eder.

BS/MXene örneklerinde (özellikle %2 wt MXene içeriğine sahip olanlarda), saf BS'ye kıyasla daha yüksek bir sıcaklıkta ağırlık kaybı başlamaktadır. Bu durum, MXene eklenmesinin BS'nin termal kararlılığını artırdığını gösterir.

Son Ağırlık: Yaklaşık 600°C'den sonra, tüm örneklerde ağırlık değişimi stabil hale gelir ve bu noktada kalıntı miktarı gözlemlenir. MXene içeriği arttıkça kalıntı miktarı artmaktadır.

DTA Analizi:

Endotermik ve Ekzotermik Tepkimeler:

300°C- 400°C aralığında büyük bir endotermik tepe gözlemlenir. Bu, BS ve BS/MXene örneklerinin termal bozunma sürecine işaret eder.

MXene içeriği arttıkça, bu tepkinin sıcaklığı bir miktar yükselir, bu da MXene'nin BS'nin termal stabilitesini artırdığını gösterir.

BS'nin Termal Davranışı: Saf BS yaklaşık 300°C'de ciddi bir ağırlık kaybı yaşar ve termal bozunmaya uğrar.

MXene'nin Etkisi: MXene ilavesi, BS'nin termal kararlılığını artırır. Bu, ağırlık kaybının daha yüksek sıcaklıklarda başlaması ve DTA analizinde endotermik tepkimenin sıcaklığının yükselmesiyle doğrulanır.

Kalıntı Miktarı: MXene içeriği arttıkça, termal bozunma sonrası kalan kalıntı miktarı da artar.

Bu analizler, MXene ilavesinin BS tabanlı hidrojenlerin termal kararlılığını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Tablo 5. TGA analizine göre farklı MXene içeriğine sahip BS ve BS/MXene hidrojenlerinin bozunma sıcaklığı (Td) ve kayıp ağırlığı (Delta W).

Örnekler	Td (°C)	Delta W (%)
BS	343.33	88.79
BS/MXene-1%	351.56	67.67
BS/MXene-2%	352.76	54.66

Bu tabloda, farklı MXene içeriğine sahip BS ve BS/MXene hidrojenlerinin TGA (Termogravimetrik Analiz) sonuçlarına göre bozunma sıcaklığı (Td) ve kayıp ağırlığı (Delta W) değerleri gösterilmektedir.

İncelenen hidrojen örnekleri (BS ve çeşitli MXene içerikleriyle zenginleştirilmiş BS hidrojenleri).

Td (°C): Bozunma sıcaklığı. Hidrojenlerin termal bozunmaya başladığı sıcaklığı ifade eder.

Delta W (%): Kayıp ağırlık. Termal bozunma sonucu hidrojenlerin kaybettiği ağırlık yüzdesini ifade eder.

Bozunma Sıcaklığı (Td):

Saf BS'un bozunma sıcaklığı 343.33°C olarak belirlenmiştir.

1% MXene içeriğine sahip BS/MXene hidrojeninin bozunma sıcaklığı 351.56°C'ye yükselmiştir.

2% MXene içeriğine sahip BS/MXene hidrojelinin bozunma sıcaklığı ise 352.76°C'ye yükselmiştir.

MXene içeriği arttıkça, hidrojellerin bozunma sıcaklığı artmaktadır. Bu durum, MXene'nin BS hidrojellerinin termal kararlılığını artırdığı anlamına gelir.

Kayıp Ağırlık (Delta W):

Saf BS'nin termal bozunma sonucu kaybettiği ağırlık yüzdesi %88.79 olarak belirlenmiştir.

1% MXene içeriğine sahip BS/MXene hidrojelinde bu değer %67.67'ye düşmektedir.

2% MXene içeriğine sahip BS/MXene hidrojelinde ise %54.66'ya düşmektedir.

MXene içeriği arttıkça, hidrojellerin kayıp ağırlığı azalmakta, bu da MXene'nin BS hidrojellerinin termal dayanıklılığını artırdığına işaret eder.

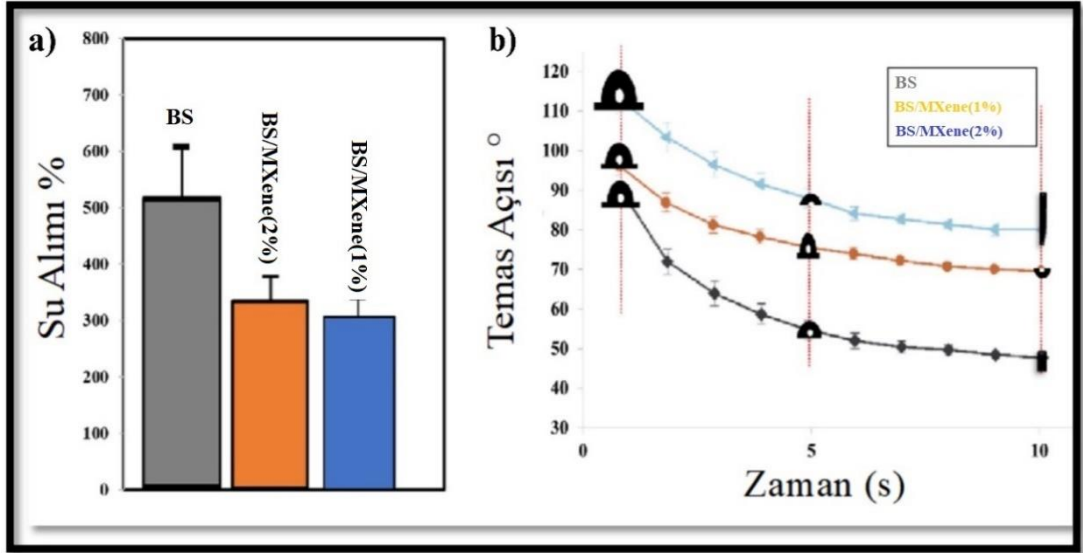
Termal Kararlılık: MXene eklenmesi, BS hidrojellerinin termal kararlılığını artırır, yani hidrojeller daha yüksek sıcaklıklarda bozunmaya başlar.

Ağırlık Kaybı: MXene içeriği arttıkça hidrojellerin termal bozunma sonucu kaybettikleri ağırlık azalır. Bu, MXene'nin BS yapısını güçlendirdiğini ve termal dayanıklılığını artırdığını gösterir.

Bu sonuçlar, MXene'nin BS hidrojellerinin termal özelliklerini iyileştirdiğini ve potansiyel olarak daha dayanıklı kompozit malzemeler elde edilebileceğini göstermektedir. Saf BS ve BS/MXene hidrojellerinin termal davranışları, TGA kullanılarak detaylı bir şekilde incelendi. Saf BS hidrojelinin termal analizinde, yaklaşık 100°C civarında başlangıçta belirgin bir ağırlık kaybı gözlemlendi. Bu ağırlık kaybı, hidrojelde emilen nemin ve hidrojen bağları ile bağlanmış su moleküllerinin buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, 100°C ile 400°C arasında ikinci bir ağırlık kaybı evresi gözlemlendi. Bu aralıkta meydana gelen ağırlık kaybı, 343.33°C'de maksimuma ulaştı ve bu, BS'un glukozil birimlerinin ve serbest radikallerinin termal bozunması, depolimerizasyonu ve parçalanması ile ilişkilendirildi. Bu süreçte aynı zamanda kömürleşmiş bir kalıntı

oluşumu da gerçekleşti. BS/MXene kompozit hidrojellerde ise, termal analiz sonuçları, ağırlık kaybı evrelerinin daha yüksek sıcaklıklara kaydığını gösterdi. Ayrıca, MXene içeriği arttıkça ağırlık kaybı miktarının (delta ağırlık) azaldığı gözlemlendi. Bu bulgular, MXene'nin BS/MXene hidrojellerinin termal stabilitesini artırdığını göstermektedir. MXene'nin termal stabiliteyi artırma mekanizması, selüloz zincirlerini termal şoka karşı koruyabilmesi ile açıklanabilir. MXene, yüksek sıcaklıklarda selülozun bozunmasını geciktirerek, bozunmanın daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesine ve ağırlık kaybının azalmasına neden olur. Bu sayede, BS/MXene kompozit hidrojeller daha yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı hale gelir ve termal stabiliteleri artar.

MXENE İÇERİĞİNİN rBS TABANLI HİDROJELLERİN ISLANMA DAVRANIŞI VE SU EMME KAPASİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ



Şekil 13(a) Islanma davranışı, (b) farklı zaman aralıklarında su emme oranı ve (c) PBS içinde 24 saat boyunca ıslanmış rBS tabanlı hidrojellerin su emme oranları. Veriler, ortalama \pm SD (n = 5) olarak gösterilmiş olup, anlamlı farkın analizi için tek yönlü ANOVA ve Tukey'nin çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

Sol Grafik (Su Alma Yüzdesi):

- Bu grafik, BS ve BS/MXene hidrojel örneklerinin su emme kapasitelerini karşılaştırır.
- Saf BS hidrojelinin en yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir (yaklaşık %600).
- BS/MXene (1%) ve BS/MXene (2%) hidrojel örneklerinin su emme kapasiteleri ise sırasıyla %300 ve %200 civarındadır.
- MXene oranı arttıkça, hidrojin su emme kapasitesinin azaldığı görülmektedir.

Sağ Grafik (Temas Açısı):

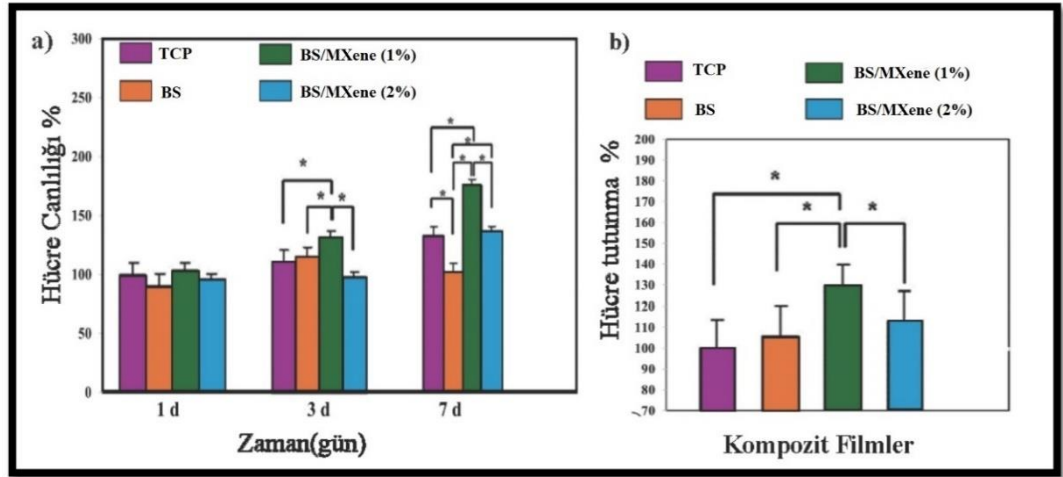
- Bu grafik, BS ve BS/MXene hidrojel örneklerinin suyla temas açısını zamanla göstermektedir.
- Zamanla temas açısında azalma gözlenmektedir, yani hidrojel yüzeyi zamanla daha fazla ıslanabilir hale gelmektedir.
- Saf BS hidrojelinin başlangıç temas açısı yaklaşık 90° olup, zamanla 60° 'ye düşmektedir.
- BS/MXene (1%) hidrojelinin başlangıç temas açısı yaklaşık 100° olup, zamanla 70° 'ye düşmektedir.
- BS/MXene (2%) hidrojelinin başlangıç temas açısı yaklaşık 110° olup, zamanla 80° 'ye düşmektedir.
- MXene oranı arttıkça hidrojin başlangıç temas açısının arttığı ancak zamanla daha az ıslanabilir hale geldiği görülmektedir.

Su Emme Yüzdesi: Saf BS hidrojelinin yüksek su emme kapasitesi, hidrojel yapısının suyu daha fazla tutabilme yeteneğine sahip olduğunu gösterir. MXene eklenmesiyle bu kapasite azalır, bu da MXene'nin hidrojel yapısında daha kompakt bir yapı oluşturduğunu ve suyun bu yapı içinde daha az tutulduğunu gösterir.

Temas Açısı: Saf BS hidrojelinin daha düşük başlangıç temas açısı, yüzeyinin daha hidrofobik (su çekmeyen) olduğunu gösterir. MXene eklenmesiyle başlangıç temas açısı artar, bu da yüzeyin daha hidrofobik hale geldiğini gösterir. Zamanla tüm örneklerin temas açıları azalma olur, bu da yüzeyin suyla temas ettikçe daha hidrofobik özellik kazandığını gösterir.

Bu veriler, BS/MXene hidrojelinin suyla etkileşimini ve mekanik özelliklerini optimize etmek için MXene oranının ayarlanabileceğini göstermektedir.

NIH3T3 HÜCRELERİNİN BS TABANLI HİDROJEL ÜZERİNDEKİ CANLILIK VE TUTUNMA ORANLARI



Şekil 14 NIH3T3 hücrelerinin BS tabanlı hidrojel ekstresindeki canlılığı. Veriler, ortalama \pm SD (n = 7) olarak gösterilmiş olup, anlamlı farkın analizi için tek yönlü ANOVA ve Tukey'nin çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

A Grafiği (Hücre Canlılığı):

1 Gün: İlk gün hücre canlılığı oranları birbirine yakındır ve önemli bir fark gözlenmemektedir.

3 Gün: Üçüncü gün hücre canlılığı oranları arasında farklar ortaya çıkmaya başlar. BS/MXene (%1) örneği en yüksek canlılık oranına sahiptir.

7 Gün: Yedinci gün BS/MXene (%1) örneği yine en yüksek hücre canlılığı oranına sahip olup, BS/MXene (%2) ve diğer örneklerden anlamlı derecede yüksektir. (*) işaretleri, istatistiksel olarak anlamlı farkları göstermektedir.

B Grafiği (Hücre Tutunma):

Hücre Tutunma %: BS/MXene (%1) örneği, en yüksek hücre tutunma yüzdesine sahiptir ve diğer tüm örneklerden anlamlı derecede yüksektir.

BS ve BS/MXene (%2) örnekleri, hücre tutunma yüzdesi açısından benzer değerler göstermektedir ancak BS/MXene (%1) örneği ile kıyaslandığında anlamlı derecede düşüktür.

A Grafiği (Hücre Canlılığı):

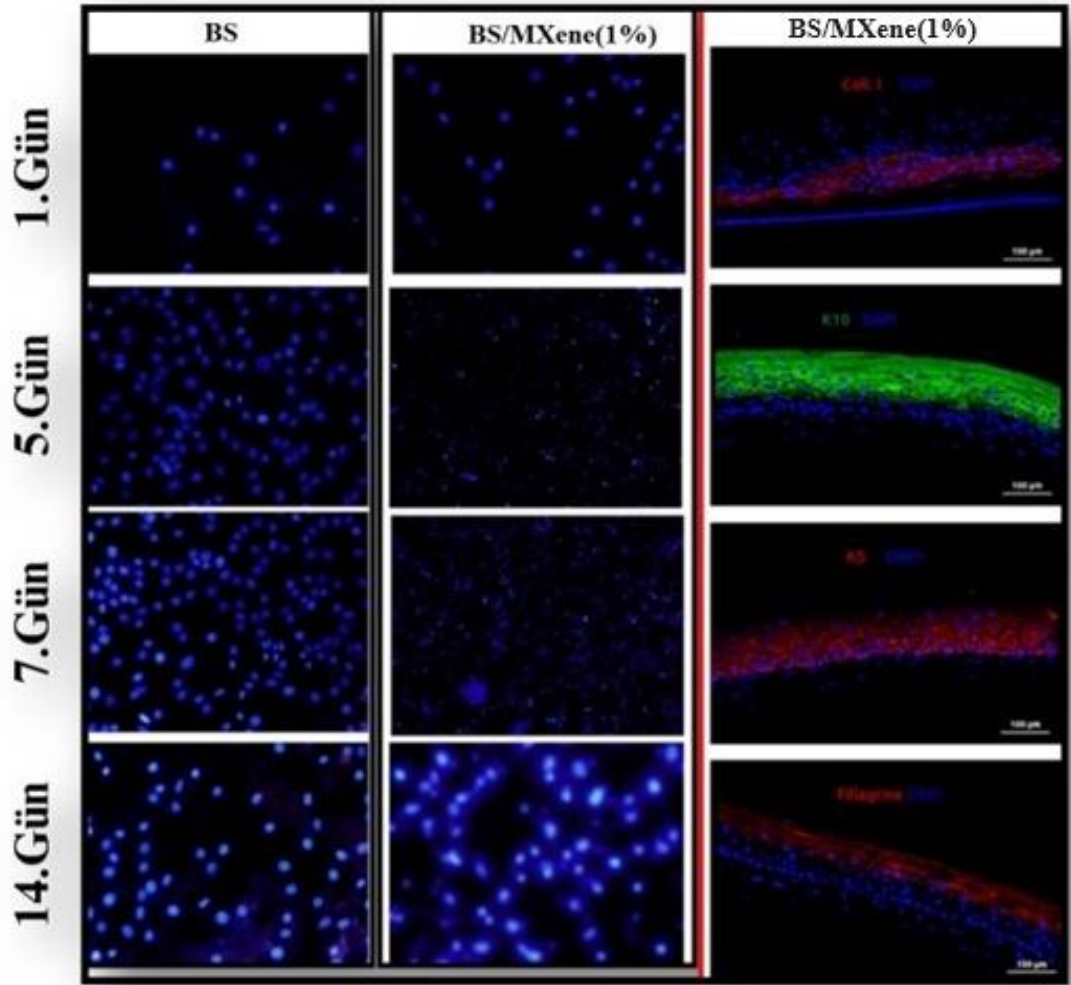
Bu grafik, BS ve BS/MXene karışımlarının hücre canlılığı üzerindeki etkisini gösterir. İlk gün tüm örneklerde benzer hücre canlılığı gözlemlenirken, üçüncü günde BS/MXene (%1) örneği en yüksek hücre canlılığına sahip olmuştur. Yedinci gün verileri, BS/MXene (%1) örneğinin hücre canlılığını en fazla desteklediğini göstermektedir. MXene'nin düşük oranlarda eklenmesi, BS hidrojelinin biyoyumluluğunu ve hücre canlılığını artırmaktadır. Ancak MXene oranının %2'ye çıkarılması, hücre canlılığını olumsuz etkilemektedir.

B Grafiği (Hücre Tutunma):

Hücre tutunma yüzdeleri, BS ve MXene karışımlarının hücrelerin yüzeye tutunma kabiliyetini nasıl etkilediğini gösterir. BS/MXene (%1) örneği, en yüksek hücre tutunma oranına sahiptir ve bu, hidrojel hücre tutunması için uygun bir yüzey sunduğunu göstermektedir. TCP ve BS örnekleri daha düşük hücre tutunma oranlarına sahipken, BS/MXene (%2) örneği de nispeten daha düşük bir hücre tutunma yüzdesi göstermektedir. Bu durum, MXene'nin düşük oranlarda eklenmesinin hücre tutunmasını artırdığını, ancak yüksek oranlarda eklenmesinin bu avantajı ortadan kaldırdığını göstermektedir.

Bu veriler, BS/MXene hidrojelinin biyomedikal uygulamalarda, özellikle hücre kültürü ve doku mühendisliği gibi alanlarda potansiyel olarak kullanılabilceğini göstermektedir. MXene'nin doğru oranlarda eklenmesi, hidrojelin biyoyumluluk ve hücre destekleme özelliklerini artırmaktadır.

HÜCRE YAPIŞMA VE YAYILMA DAVRANIŞI ÇALIŞMALARI



Şekil 15 NIH3T3 hücrelerinin rBS tabanlı hidrojel üzerinde 24 saat kültür sonrası LSCM görüntüleri. (a–f) şekillerinde altı farklı grup gösterilmektedir: sırasıyla, Rbs hidrojel ve MXene içeriği %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 olan rBS/MXene hidrojel. Ölçek çubukları tüm görüntüler için 100 µm'dir.

Sol Sütun (BS)

Bu sütun, saf BS numuneleri üzerinde NIH3T3 hücrelerinin çeşitli günlerdeki büyümesini gösteriyor. Her resim, farklı zaman noktalarında (1. gün, 5. gün, 7. gün ve 14. gün) alınan görüntüleri içeriyor. Görsellerde hücre çekirdekleri DAPI boyası ile mavi olarak işaretlenmiş.

Orta Sütun (BS/MXene (1%))

Bu sütun, %1 oranında MXene eklenmiş BS/MXene kompozitlerinde hücrelerin büyümesini gösteriyor. Benzer şekilde, farklı zaman noktalarında (1. gün, 5. gün, 7. gün ve 14. gün) alınan görüntüler mevcut. Burada da hücre çekirdekleri DAPI boyası ile mavi olarak işaretlenmiş.

Sağ Sütun (BS/MXene (1%) - Marker Staining)

Bu sütunda, %1 oranında MXene içeren BS/MXene kompozitlerinde belirli protein belirteçleri ile yapılan boyamaların görüntüleri bulunuyor. Her görüntüde farklı bir protein (Collagen I, K10, K5, Filaggrin) gösterilmiş ve hücre çekirdekleri yine DAPI boyası ile mavi olarak işaretlenmiş. Bu proteinler, hücrelerin farklılaşma ve matriks oluşumu gibi özelliklerini incelemek için kullanılmış:

Collagen I: Kollajen tip I, genellikle ekstraselüler matriks ve bağ dokusu ile ilişkilidir. Kırmızı renkte boyanmış.

K10: Keratin 10, epidermal hücre farklılaşmasının bir belirteçidir. Yeşil renkte boyanmış.

K5: Keratin 5, bazal hücre katmanı ve epidermal kök hücreler ile ilişkilidir. Kırmızı renkte boyanmış.

Filaggrin: Filaggrin, epidermal farklılaşma ve keratinizasyon sürecinde önemli bir proteindir. Kırmızı renkte boyanmış.

1. Gün (BS vs. BS/MXene(1%)): Her iki grupta da hücre yoğunluğu düşük. Bu, hücrelerin kültüre yeni başladığını ve hala yüzeye adezyon ve yayılma sürecinde olduklarını gösteriyor.

5. Gün (BS vs. BS/MXene(1%)): BS grubunda hücre yoğunluğu artmış, BS/MXene(1%) grubunda ise daha düşük. MXene ilavesi hücre proliferasyonunu olumsuz etkilemiş olabilir.

7. Gün (BS vs. BS/MXene(1%)): BS grubunda hücreler daha yaygın ve yoğun görünüyor, BS/MXene(1%) grubunda ise daha seyrek. Bu, MXene'in hücre büyümesi üzerinde inhibe edici bir etkisi olabileceğini düşündürüyor.

14. Gün (BS vs. BS/MXene(1%)): BS grubunda hücre yoğunluğu maksimum seviyeye ulaşmış görünüyor, BS/MXene(1%) grubunda ise hücre yoğunluğu hala düşük. Bu durum, MXene ilavesinin uzun vadede hücre büyümesi üzerinde olumsuz etkileri olduğunu gösteriyor olabilir.

Marker Staining (BS/MXene(1%)):

Collagen I: Kollajen tip I boyaması, hücrelerin matris üretimi yeteneğini gösterir. Kollajen üretimi, doku mühendisliği ve yara iyileşmesi için önemlidir.

K10: Keratin 10 boyaması, epidermal hücrelerin farklılaşma derecesini gösterir.

K5: Keratin 5 boyaması, bazal hücre katmanının varlığını ve hücrelerin kök hücre benzeri özelliklerini gösterir.

Filaggrin: Filaggrin boyaması, epidermal hücrelerin terminal farklılaşma sürecinde olduğunu gösterir.

Bu görseller, BS ve BS/MXene(1%) kompozitlerinde NIH3T3 hücrelerinin büyüme ve farklılaşma süreçlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. MXene ilavesi, hücre proliferasyonu üzerinde olumsuz bir etki yapmış olabilir, ancak belirli proteinlerin üretimini nasıl etkilediği konusunda daha detaylı analizler gereklidir. Bu tür çalışmalar, biyomalzeme geliştirme ve hücresel yanıtların anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir.

KAYNAKÇA

- Ako, A., Geli, B.** 2010. "Bakteriyel Selülozun Özellikleri ve Gıda Sanayisinde Kullanımı". *Gıda*, 35(2), 127–134.
- Alavi, M.** 2019. "Modifications of microcrystalline cellulose (MCC), nanofibrillated cellulose (NFC), and nanocrystalline cellulose (NCC) for antimicrobial and wound healing applications". *E-Polymers*.
- An, H., Habib, T., Shah, S., Gao, H., Radovic, M., Green, M. J., Lutkenhaus, J. L.** 2018. "Surface-agnostic highly stretchable and bendable conductive MXene multilayers". *Science Advances*, 4(3).
- Baig, M. M., Gul, I. H., Baig, S. M., Shahzad, F.** 2022. "2D MXenes: Synthesis, properties, and electrochemical energy storage for supercapacitors – A review". *Journal of Electroanalytical Chemistry*.
- Bartoshuk, L. M., Duffy, V. B., Hayes, J. E., Moskowitz, H. R., Snyder, D. C. D. J., De Jonghe, B. C., ... Elias, M. F.** 2016. "Food cravings in pregnancy: Preliminary evidence for a role in excess gestational weight gain". *APPETITE*, 17(2), 1–4. Tarihinde adresinden erişildi
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195666316309333>
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28672790>
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC5537773>
<http://www.mdpi.com/2072-6643/9/7/653>
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubme>
- Bielecki, S., Krystynowicz, E. A., Marianna.** 2005. "Study on the Drug Loading and Release Potential of Bacterial Cellulose". *Cellulose*, i(2), 37–46. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22227555>
- Carey, M., Barsoum, M. W.** 2021. "MXene polymer nanocomposites: a review". *Materials Today Advances*, 9.
- Chawla, P. R., Bajaj, I. B., Survase, S. A., Singhal, R. S.** 2009. "Microbial cellulose: Fermentative production and applications". *Food Technology and*

Biotechnology.

- Chen, C., Ding, W., Zhang, H., Zhang, L., Huang, Y., Fan, M., ... Sun, D.** 2022. "Bacterial cellulose-based biomaterials: From fabrication to application". Carbohydrate Polymers.
- Chen, C., Xi, Y., Weng, Y.** 2022. "Recent Advances in Cellulose-Based Hydrogels for Tissue Engineering Applications". Polymers.
- Choi, S. M., Rao, K. M., Zo, S. M., Shin, E. J., Han, S. S.** 2022. "Bacterial Cellulose and Its Applications". Polymers.
- Cui, Y., Zhu, J., Tong, H., Zou, R.** 2023. "Advanced perspectives on MXene composite nanomaterials: Types synthetic methods, thermal energy utilization and 3D-printed techniques". iScience.
- Czaja, W. K., Young, D. J., Kawecki, M., Brown, R. M.** 2007. "The future prospects of microbial cellulose in biomedical applications". Biomacromolecules.
- Durand, H., Smyth, M., Bras, J.** 2021. "Nanocellulose: A New Biopolymer for Biomedical Application". İçinde *Biopolymers for Biomedical and Biotechnological Applications* (ss. 129–179).
- Forouzandeh, P., Pillai, S. C.** 2020. "Two-dimensional (2D) electrode materials for supercapacitors". İçinde *Materials Today: Proceedings* (C. 41, ss. 498–505).
- Ghidiu, M., Lukatskaya, M. R., Zhao, M. Q., Gogotsi, Y., Barsoum, M. W.** 2015. "Conductive two-dimensional titanium carbide “clay” with high volumetric capacitance". *Nature*, 516(7529), 78–81.
- Gorgieva, S., Trček, J.** 2019. "Bacterial cellulose: Production, modification and perspectives in biomedical applications". Nanomaterials.
- He, S., Zhu, Q., Soomro, R. A., Xu, B.** 2020. "MXene derivatives for energy storage applications". Sustainable Energy and Fuels.
- Hu, Q., Wang, H., Wu, Q., Ye, X., Zhou, A., Sun, D., ... He, J.** 2014. "Two-dimensional Sc₂C: A reversible and high-capacity hydrogen storage material

predicted by first-principles calculations". *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10606–10612.

Huang, L., Ding, L., Wang, H. 2021. "MXene-Based Membranes for Separation Applications". *Small Science*.

Iguchi, M., Yamanaka, S., Budhiono, A. 2000. "Bacterial cellulose - a masterpiece of nature's arts". *Journal of Materials Science*, 35(2), 261–270.

Iqbal, A., Hong, J., Ko, T. Y., Koo, C. M. 2021. "Improving oxidation stability of 2D MXenes: synthesis, storage media, and conditions". *Nano Convergence*.

Jaya Prakash, N., Kandasubramanian, B. 2021. "Nanocomposites of MXene for industrial applications". *Journal of Alloys and Compounds*.

Jozala, A. F., de Lencastre-Novaes, L. C., Lopes, A. M., de Carvalho Santos-Ebinuma, V., Mazzola, P. G., Pessoa-Jr, A., ... Chaud, M. V. 2016. "Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview". *Applied Microbiology and Biotechnology*.

Khazaei, M., Arai, M., Sasaki, T., Chung, C. Y., Venkataramanan, N. S., Estili, M., ... Kawazoe, Y. 2013. "Novel electronic and magnetic properties of two-dimensional transition metal carbides and nitrides". *Advanced Functional Materials*, 23(17), 2185–2192.

Kingley, A., Tadej, M., Colbourn, A., Kerr, A., Aslan, C. B. 2009. "Suprasorb® X +PHMB: Antimicrobial and HydroBalance action in a new wound dressing". *Wounds UK*.

Li, L., Liu, X., Wang, J., Yang, Y., Cao, Y., Wang, W. 2022. "Corrigendum to "New application of MXene in polymer composites toward remarkable antidripping performance for flame retardancy" [*Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 127 (2019) 105649](S1359835X19303987)(10.1016/j.compositesa.2019.105649)". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.

Lim, K. R. G., Shekhirev, M., Wyatt, B. C., Anasori, B., Gogotsi, Y., Seh, Z. W. 2022. "Fundamentals of MXene synthesis". *Nature Synthesis*.

- Lipatov, A., Lu, H., Alhabeab, M., Anasori, B., Gruverman, A., Gogotsi, Y., Sinitskii, A.** 2023. "Elastic properties of 2D Ti₃C₂T_x mxene monolayers and bilayers". İçinde *MXenes: From Discovery to Applications of Two-Dimensional Metal Carbides and Nitrides* (ss. 207–225).
- Liu, D., Meng, Q., Hu, J.** 2023. "Bacterial Nanocellulose Hydrogel: A Promising Alternative Material for the Fabrication of Engineered Vascular Grafts". *Polymers*.
- Liu, Z., Amani, M., Najmaei, S., Xu, Q., Zou, X., Zhou, W., ... Lou, J.** 2014. "Strain and structure heterogeneity in MoS₂ atomic layers grown by chemical vapour deposition". *Nature Communications*, 5.
- Ma, P., Fang, D., Liu, Y., Shang, Y., Shi, Y., Yang, H. Y.** 2021. "MXene-Based Materials for Electrochemical Sodium-Ion Storage". *Advanced Science*.
- Mallakpour, S., Behranvand, V., Hussain, C. M.** 2021. "MXenes-based materials: Structure, synthesis, and various applications". *Ceramics International*.
- Mandia, A. K., Koshi, N. A., Muralidharan, B., Lee, S. C., Bhattacharjee, S.** 2022. "Electrical and magneto-transport in the 2D semiconducting MXene Ti₂CO₂". *Journal of Materials Chemistry C*, 10(23), 9062–9072.
- Mao, L., Hu, S., Gao, Y., Wang, L., Zhao, W., Fu, L., ... Yang, G.** 2020. "Biodegradable and Electroactive Regenerated Bacterial Cellulose/MXene (Ti₃C₂T_x) Composite Hydrogel as Wound Dressing for Accelerating Skin Wound Healing under Electrical Stimulation". *Advanced Healthcare Materials*, 9(19).
- Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., Presser, V., Lu, J., Hultman, L., ... Barsoum, M. W.** 2012. "Two-dimensional transition metal carbides". *ACS Nano*, 6(2), 1322–1331.
- Naguib, M., Mochalin, V. N., Barsoum, M. W., Gogotsi, Y.** 2014. "25th anniversary article: MXenes: A new family of two-dimensional materials". *Advanced Materials*, 26(7), 992–1005.
- Nashim, A., Parida, K.** 2022. "A Glimpse on the plethora of applications of

prodigious material MXene". Sustainable Materials and Technologies.

Pang, M., Huang, Y., Meng, F., Zhuang, Y., Liu, H., Du, M., ... Cai, Y. 2020.

"Application of bacterial cellulose in skin and bone tissue engineering".

European Polymer Journal.

Picheth, G. F., Pirich, C. L., Sierakowski, M. R., Woehl, M. A., Sakakibara, C.

N., de Souza, C. F., ... de Freitas, R. A. 2017. "Bacterial cellulose in biomedical applications: A review". International Journal of Biological Macromolecules.

Pouramini, Z., Mousavi, S. M., Babapoor, A., Hashemi, S. A., Pynadathu

Rumjit, N., Garg, S., ... Chiang, W. H. 2023. "Recent Advances in MXene-Based Nanocomposites for Wastewater Purification and Water Treatment: A Review". Water (Switzerland).

Rasool, K., Helal, M., Ali, A., Ren, C. E., Gogotsi, Y., Mahmoud, K. A. 2016.

"Antibacterial Activity of Ti₃C₂T_x MXene". ACS Nano, 10(3), 3674–3684.

Safarkhani, M., Far, B. F., Huh, Y. S., Rabiee, N. 2023. "Thermally Conductive

MXene". ACS Biomaterials Science and Engineering.

Shah, J., Brown, R. M. 2005. "Towards electronic paper displays made from

microbial cellulose". Applied Microbiology and Biotechnology.

Shahzad, F., Zaidi, S. A., Naqvi, R. A. 2022. "2D Transition Metal Carbides

(MXene) for Electrochemical Sensing: A Review". Critical Reviews in Analytical Chemistry.

Shu, W., Wang, Y., Zhang, X., Li, C., Le, H., Chang, F. 2021. "Functional

Hydrogel Dressings for Treatment of Burn Wounds". Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.

Sui, J., Chen, X., Li, Y., Peng, W., Zhang, F., Fan, X. 2021. "MXene derivatives:

Synthesis and applications in energy conversion and storage". RSC Advances.

Sutherland, I. W. 1998. "Novel and established applications of microbial

polysaccharides". Trends in Biotechnology.

- Torres, F., Commeaux, S., Troncoso, O.** 2012. "Biocompatibility of Bacterial Cellulose Based Biomaterials". *Journal of Functional Biomaterials*, 3(4), 864–878.
- Wang, C., Shou, H., Chen, S., Wei, S., Lin, Y., Zhang, P., ... Song, L.** 2021. "Mxene Synthesis: HCl-Based Hydrothermal Etching Strategy toward Fluoride-Free MXenes (Adv. Mater. 27/2021)". *Advanced Materials*, 33(27).
- Wang, J., Tavakoli, J., Tang, Y.** 2019. "Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review". *Carbohydrate Polymers*.
- Wang, Z.** 2021. "A Review on MXene: Synthesis, Properties and Applications on Alkali Metal Ion Batteries". İçinde *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (C. 714).
- Xiang, J., Wang, X., Ding, M., Tang, X., Zhang, S., Zhang, X., Xie, Z.** 2022. "The role of lateral size of MXene nanosheets in membrane filtration of dyeing wastewater: Membrane characteristic and performance". *Chemosphere*, 294.
- Xuan, J., Wang, Z., Chen, Y., Liang, D., Cheng, L., Yang, X., ... Geng, F.** 2016. "Organic-Base-Driven Intercalation and Delamination for the Production of Functionalized Titanium Carbide Nanosheets with Superior Photothermal Therapeutic Performance". *Angewandte Chemie - International Edition*, 55(47), 14569–14574.
- Yıldırım, F. F., Yavas, A., Avinc, O.** 2020. "Bacteria Working to Create Sustainable Textile Materials and Textile Colorants Leading to Sustainable Textile Design" (ss. 109–126).
- Zamhuri, A., Lim, G. P., Ma, N. L., Tee, K. S., Soon, C. F.** 2021. "MXene in the lens of biomedical engineering: synthesis, applications and future outlook". *BioMedical Engineering Online*.
- Zhang, C., Li, J., Liu, C., Liu, X., Wang, J., Li, S., ... Zhang, L.** 2013. "Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion". *Bioresource Technology*, 149, 353–358.

- Zhang, J., Seyedin, S., Qin, S., Wang, Z., Moradi, S., Yang, F., ... Razal, J. M.** 2019. "MXene Hybrid Fibers: Highly Conductive Ti₃C₂T_x MXene Hybrid Fibers for Flexible and Elastic Fiber-Shaped Supercapacitors (Small 8/2019)". *Small*, 15(8).
- Zhang, P., Li, J., Yang, D., Soomro, R. A., Xu, B.** 2023. "Flexible Carbon Dots-Intercalated MXene Film Electrode with Outstanding Volumetric Performance for Supercapacitors". *Advanced Functional Materials*, 33(1).
- Zhou, C., Zhao, X., Xiong, Y., Tang, Y., Ma, X., Tao, Q., ... Xu, W.** 2022. "A review of etching methods of MXene and applications of MXene conductive hydrogels". *European Polymer Journal*.