



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

**ELEKTRO EĞİRME İLE ÜRETİLEN
PMMA/MXENE/KİTOSAN KONTAK LENS
KOMPOZİT FİBERLERİN ANTİBAKTERİYEL VE
HÜCRESEL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BERFİN GÜRBÜZ

İSTANBUL, 2024



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

**ELEKTRO EĞİRME İLE ÜRETİLEN
PMMA/MXENE/KİTOSAN KONTAK LENS
KOMPOZİT FİBERLERİN ANTİBAKTERİYEL VE
HÜCRESEL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BERFİN GÜRBÜZ
(220231001)**

(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 220231001 numaralı Berfin GÜRBÜZ'ün hazırladığı “Kas Hasarı Rehabilitasyonlarında Robotik Eldivenlerin Biyolojik Özelliklerini Artıran Fonksiyonel Biyo-Elektronik Membran Tasarımı ve Geliştirilmesi” konulu Yüksek Lisans/Doktora/Sanatta Yeterlik tezi ile ilgili Tez Savunma Sınavı, 02/07/2024 Salı günü saat 16:00’da yapılmış, sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin **Kabulüne Oy Çoğunluğu/Oy Birliği** ile karar verilmiştir.

Tez adı değişikliği yapılması halinde: Tez adının ELEKTROEĞİRME İLE ÜRETİLEN PMMA/MXENE/KİTOSAN KONTAK LENS KOMPOZİT FİBERLERİN ANTİBAKTERİYEL VE HÜCRESEL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ şeklinde değiştirilmesi uygundur.

Jüri Üyesi	Karar
1. Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇİFTÇİ (Danışman)	KABUL
2. Dr. Öğr. Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ	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.

Berfin Gürbüz

TEŐEKKÖR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında bana destek olan ve katkıda bulunan herkese içtenlikle teşekkür ederim. Özellikle danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Fatih ÇİFTÇİ 'ye, bu süreçte bana rehberlik ettiği, bilgi ve tecrübelerini cömertçe paylaştığı için sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Onun değerli katkıları olmadan bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı.

Kendime de teşekkür etmek istiyorum. Bu süreçte gösterdiğim azim ve sabır için kendimi kutluyorum. "Sabır, başarının anahtarıdır" demiştir Peygamber Efendimiz Hz. Muhammed (sav). Bu sözün doğruluğunu bir kez daha anladım.

Berfin Gürbüz

ELEKTRO EĞİRME İLE ÜRETİLEN PMMA/MXENE/KİTOSAN KONTAK LENS KOMPOZİT FİBERLERİN ANTİBAKTERİYEL VE HÜCRESEL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Berfin Gürbüz

ÖZET

Bu çalışmada, elektro-eğirme yöntemi kullanılarak elde edilen MXene malzemesi içeren PMMA / Kitosan nanoliflerinin yüzey özellikleri araştırılmış ve bu nanoliflerin biyosensör olarak biyomedikal uygulamalarda kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Farklı PMMA/Kitosan/MXene konsantrasyonları kullanılarak üretilen nanolifler incelenmiştir. Hazırlanan PMMA/Kitosan/MXene çözeltileri petri kaplarına dökülerek kurutulmuştur. Oluşturulan nanoliflerin lif çaplarının ortalamaları, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, nanolif yüzey özellikleri çaplarına göre değişiklik göstermiştir. Üretilen kontak lenslerin üzerinde viskozite ve elektriksel iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Zararlı organizmalara karşı koruyucu etkiler, hücre testleri ve kontak lenslerin dayanıklılığını sürdürmek için mekanik testler gerçekleştirilmiştir.

Biyoelektronik alanında, MXene malzemeleri dikkat çekici iletkenlik ve biyolojik sistemlerle uyumluluk özellikleri sergileyerek, sinir arayüzleri ve biyosensörlerin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. MXene'ler ayrıca doku mühendisliğinde de kritik bir rol oynar; mekanik dayanıklılık ve biyoyumluluğun benzersiz kombinasyonu, hücre tutunması, çoğalması ve farklılaşmasını teşvik eden iskele materyalleri oluşturarak rejeneratif tıpta ilerlemelere olanak tanır. Giyilebilir teknolojide MXene'ler, esnek ve iletken malzemelere katkıda bulunarak gelişmiş bileşenlerin giyilebilir cihazlara entegrasyonunu sağlar.

Bu çalışmanın ilk bölümünde, giyilebilir kontak lenslerin tasarımı ve çeşitliliği ele alınmıştır. İkinci bölümde, kontak lens kalsifikasyonları, kontak lenslerde kullanılan biyomalzemeler ve bunların uygulamaları incelenmiştir. Üçüncü bölümde,

biyosensör uygulamaları ele alınmıştır. Dördüncü ve beşinci bölümlerde ise kontak lenslerin teknolojik pazarlaması ve geleceği hakkında geniş bilgi ve tartışmalar sunulmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışmada MXene malzemesi kullanılarak elektro-eğirme yöntemi ile kontak lens üretimi çalışması, nanolif yüzey özelliklerinin ve çaplarının biyosensör ve diğer biyomedikal uygulamalardaki potansiyel kullanımını değerlendirmekte ve bu alandaki teknolojik yeniliklere katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektro Eğirme, Nanofiber, Kontak Lens, MXene, PMMA



INVESTIGATION OF THE ANTIBACTERIAL AND CELLULAR BEHAVIOR OF PMMA/MXENE/CHITOSAN CONTACT LENS COMPOSITE FIBERS PRODUCED BY ELECTROSPINNING

Berfin Gürbüz

ABSTRACT

In this study, the surface properties of PMMA/Chitosan nanofibers containing MXene materials obtained by the electrospinning method were investigated, and the potential use of these nanofibers in biomedical applications as biosensors was evaluated. Nanofibers produced using different PMMA/Chitosan/MXene concentrations were examined. The prepared PMMA/Chitosan/MXene solutions were poured into petri dishes and dried. The average fiber diameters of the nanofibers were determined using Scanning Electron Microscopy (SEM). According to the obtained results, the surface properties of the nanofibers varied according to their diameters. Viscosity and electrical conductivity tests were performed on the produced contact lenses. Protective effects against harmful organisms, cell tests, and mechanical tests were conducted to maintain the durability of the contact lenses.

In the field of bioelectronics, MXene materials play a significant role in the development of nerve interfaces and biosensors by exhibiting remarkable conductivity and compatibility with biological systems. MXenes also play a critical role in tissue engineering; the unique combination of mechanical durability and biocompatibility allows for the creation of scaffold materials that promote cell adhesion, proliferation, and differentiation, enabling advancements in regenerative medicine. In wearable technology, MXenes contribute to flexible and conductive materials, enabling the integration of advanced components into wearable devices.

The first part of this study addresses the design and variety of wearable contact lenses. The second part examines contact lens calcifications, the biomaterials used in contact lenses, and their applications. The third part discusses biosensor applications. The fourth and fifth parts provide extensive information and discussions on the technological marketing and future of contact lenses.

In conclusion, in the study of contact lens production using the electrospinning method with MXene material evaluates the potential use of nanofiber surface properties and diameters in biosensors and other biomedical applications, contributing to technological innovations in this field.

Keywords: Electrospinning, Nanofiber, Contact Lens, MXene, PMMA

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tezini hazırlarken destek ve katkı sağlayan herkese içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Öncelikle, tezimin her aşamasında yol gösterici olan ve bilimsel çalışmalarına büyük katkıda bulunan değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Fatih ÇİFTÇİ 'ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisi, akademik yolculuğumda bana rehberlik ederek, ufku genişletmiş ve bu çalışmanın başarıya ulaşmasını sağlamıştır.

Sevgili babam Mehmet ve annem Hanife'ye, bana verdikleri sonsuz sevgi, destek ve sabırları için minnettarım. Her zaman yanımda oldukları ve beni her durumda destekledikleri için onlara ne kadar teşekkür etsem azdır. Onların verdiği motivasyon ve güç, bu tez çalışmasının arkasındaki en büyük itici güç oldu.

Ablam Nilüfer'e ve kardeşim Ayşe'ye, her zaman yanımda oldukları ve bana verdikleri moral desteği için teşekkür ediyorum. Onların varlığı, zor zamanlarda bana güç ve cesaret verdi.

Arkadaşlarım Dilara Gülsüm ÖZDEMİR'e ve Betül Meryem ARPAÇAY'a, bu süreçte bana verdikleri destek ve gösterdikleri dostluk için teşekkür ediyorum. Onların varlığı, zor zamanlarda moral bulmamı sağladı ve çalışmalarımı daha kolay hale getirdi.

Son olarak, en büyük teşekkürümü sevgili nişanlım Musa Batuhan ŞAHİN'e sunmak istiyorum. Onun sevgi dolu desteği, sabrı ve anlayışı olmadan bu süreçte ilerlemem mümkün olmazdı. Bana olan inancı ve verdiği motivasyon, bu tez çalışmasının başarıya ulaşmasında en büyük etken oldu. Hayatımda olduğu için ona minnettarım.

Bu tez çalışmasının, bana destek olan ve katkıda bulunan herkese layık olmasını umuyorum.

Saygılarımla,

Temmuz, 2024

Berfin GÜRBÜZ

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
ÖN SÖZ.....	ix
SEMBOLLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
TABLO LİSTESİ	xvi
KISALTMALAR	xvii
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM.....	4
1. GİYİLEBİLİR KONTAK LENS TEKNOLOJİSİ	4
1.1. SAĞLIKTA NANOTEKNOLOJİ ÇALIŞMALARI	5
1.2. KONTAK LENS ÇEŞİTLERİ VE KULLANILAN BİYOMALZEMELER...	6
İKİNCİ BÖLÜM	10
2. KONTAK LENS TASARIMI İÇİN KULLANILAN MALZEMELER VE ELEKTRO- EĞİRME TEKNOLOJİSİ	10
2.1. PMMA.....	10
2.2. FLOROSİLİKON AKRİLAT (FSA)	12
2.3. POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)	12
2.4. Yumuşak Kontak Lens Malzemeleri	13
2.4.1. Hidrojel Bazlı	14
2.4.2. Polivinil Alkol (PVA)	15
Tablo 2.1. Polivinil Alkol Özellikleri	17
2.4.3. Silikon Hidrojel Bazlı	17
2.4.4. MPC	19
2.4.5. Hyaluronik Asit Modifiye Hidrojeller	20
2.4.6. Protein İtici Kaplamalar	20
2.4.7. Biyodan İlham Alan Polimerler	21
2.4.8. Polidimetilsiloksan (PDMS)	22
2.4.9. Hibrit Kontak Lensler	23
2.4.10. Nanomalzeme Bazlı (Nano Kolloidler)	23
2.5. MXENE.....	25
2.5.1. MXene Sentezleme Yöntemi	27
2.5.1.1. Hidroflorik Asit Aşındırma	30
2.5.1.2. Florür Tuzları ile Aşındırma	30
2.5.1.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD).....	31

2.5.1.4. Alkali Aşındırma.....	31
2.5.1.5. Erimiş Tuz Aşındırma.....	32
2.5.2. MXenlerin İnterkalasyonu ve Delaminasyonu	32
2.6. KİTOSAN (KS).....	34
2.7. ELEKTRO EĞİRME TEKNOLOJİSİ	35
2.7.1. Elektro-eğirme Yöntemini Etkileyen Parametreler	40
2.7.1.1. Çözelti Özellikleri	40
2.7.1.1.1. Konsantrasyon	40
2.7.1.1.2. Viskozite.....	40
2.7.1.1.3. Moleküler Ağırlık	41
2.7.1.1.4. Yüzey Gerilimi	41
2.7.1.2. İşlem (Proses) Parametreleri	41
2.7.1.2.1. Enjektör Ucu ve Toplayıcı Plaka Arasındaki Mesafe	41
2.7.1.2.2. Uygulama Voltajı.....	41
2.7.1.3. Çevre Koşulları	42
2.8. Nanofiber Üretim Yöntemleri	42
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	43
3. MATERYAL VE METOT	43
3.1. MXene Üretimi ve Hazırlanışı	43
3.2. ELEKTRO EĞİRME İLE NANOFİBER ÜRETİMİ.....	43
3.3. KOMPOZİT FİBER KONTAK LENS MALZEMESİNİN KARAKTERİZASYONLARI	44
3.3.1. Viskozite Tayini	44
3.3.2. Yüzey Gerilimi Tayini	45
3.3.3. Elektrik İletkenliği.....	45
3.3.4. Mekanik Testler	45
3.3.5. Lif Morfolojisi (SEM).....	45
3.3.6. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Işın Spektrometresi (FT-IR) Analizi .	45
3.3.7. X-ışını Kırınım (XRD) Analizi.....	46
3.3.8. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	46
3.3.9. TEM- Geçirgen Elektron Mikroskobu Analizi.....	46
3.3.10. Termal Analiz (TGA)	47
3.3.11. Karanlık IV	47
3.3.12. Antibakteriyel Çalışma	48
3.3.13. İstatiksel Analizler	49
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	50
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	50
4.1. MEKANİK TESTLER	51
4.2. ELEKTRİKSEL ANALİZLER.....	51
4.3. SEM ANALİZİ.....	57
4.4. FTIR	58

4.5. AFM ANALİZİ	60
4.6. XRD ANALİZ BULGULARI.....	60
4.7. XPS SPEKTRUMU SONUÇLARI.....	61
4.8. BET ANALİZİ SONUÇLARI	62
4.9. ANTİMİKROBİYAL AKTİVİTE ANALİZLERİ	62
4.10. TERMAL FOTOVOLTAİK (TPV)- TERMAL FOTOVOLTAİK KOMPOZİT (TPC) ANALİZİ	65
SONUÇ.....	68
KAYNAKÇA	69



SEMBOLLER

C	: Dokunun kapasitansı
H	: Isı miktarı
M_x, M_y, M_{xy}	: Moment Bileşenleri
N_x, N_y, N_{xy}	: Normal Kuvvet Bileşenleri
q	: Faz yükü
t	: Zaman
u,v	: Yer değiştirme vektörü bileşenleri
w	: Açısal hız
XC	: Kapasitif reaktans
XL	: Endüktif reaktans
α	: Asal gerilme doğrultusundan sapma açısı
ρ	: Yoğunluk
σ_x, σ_y, σ_{xy}	: Kabuk iç gerilmeleri

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektro-Eğirme Yöntemi Şematik Gösterimi	37
Şekil 2.2 : Elektro-Eğirme ile Nanofiber Oluşumu	38
Şekil 3.1 : Atomik Kuvvet Mikroskobu	45
Şekil 3.2 : Morfolojik Analiz için TEM Makinesi	46
Şekil 4.1 : (a) PMMA, PMMA/MXene (% 1) ve PMMA/MXene (% 1)/KS nanolif filmlerinin gerilme-gerinme eğrileri, (b) bunların çekme dayanımı ve kırılma uzaması	50
Şekil 4.2 : Numunelerin (a) JS (mA.cm ²), (b) VOC (V), (c) FF (%) ve (d) PCE (%) parametrelerinin kutu grafikleri	51
Şekil 4.3 : En iyi PSC'lerin J-V eğrileri (a) Kontrol, (b) PMMA ve (c-e) PMMA: hem geri hem de ileri yönler için sırasıyla MX (% 0,3, 1,5 ve % 3)	52
Şekil 4.4 : Sırasıyla (a) Kontrol, b) PMMA ve (c-e) PMMA: MX (% 0,3, 1,5 ve % 3,0) tabanlı cihazların voltaj eğrilerine karşı akım ve voltaj ve diferansiyel direnç	52
Şekil 4.5 : Kapasitans-karanlıkta, oda sıcaklığında ve 50 mV AC uyarının altında gerçekleştirilen voltaj eğrileri. a) 10, 55 ve 100 KHz'de kontrol cihazı. b) Kontrol, PMMA, PMMA: % MX-1, PMMA:% MX-5 ve PMMA:% MX-10 cihazları 100 KHz'lik sabit bir frekanstadır	53
Şekil 4.6 : (a) Kapasitans-frekans spektrumları ve (b) spektrumların diferansiyel formu. (c) Şekil 4.6 Tabloda gösterilen düşük frekans değerlerinin derin kusur durumlarıyla ilişkili olduğu oda sıcaklığında kusur yoğunluğu spektrumları.	53
Şekil 4.7 : Kontrol, PMMA ve PMMA bazlı PSC'ler için Photo-CELIV ölçümlerinden Δj eğrileri	54
Şekil 4.8 : Çi Kontrol, PMMA ve PMMA bazlı cihazların karanlık I-V (akım-gerilim) eğrileri, ilgili V_{tfl} değerlerini gösteriyor.....	55
Şekil 4.9 : A. PMMA, B. PMMA için EDS spektrumu, C. PMMA TEM görüntüsü, D. PMMA:MX-% 0,3, E. MXene (% 0,3) ve F. MX-% 3 fiber içindeki TEM görüntüsü	56
Şekil 4.10 : (a) Saf kitosan nanoliflerinin FTIR spektrumları ve (b) % 0.75 Ti ₃ C ₂ Tz/KS nanoliflerinin XRD desenleri.	57
Şekil 4.11 : (a) PMMA:MX- % 0.3 VE (b) PMMA:MX- % 3.0 AFM mikrografı....	58
Şekil 4.12 : Ti ₃ AlC ₂ MAX fazı ve Ti ₃ C ₂ Tx MXene'nin XRD desenleri.....	59

Şekil 4.13 : Yüksek çözünürlüklü XPS spektrumları: (a) O 1s, (b) N 1s ve (c) Br 3d spektrumları yalnız perovskit ile PMMA içeren ve PMMA % geçiş tabakaları olan perovskitten alınmıştır.....	59
Şekil 4.14 : (a) TPV ve (b) TPC eğrileri; Kontrol, PMMA ve PMMA:MX bazlı	63



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 : Kontak Lens Çeşitleri ve Kullanılan Biyomalzemeler	9
Tablo 2.1 : Polivinil Alkol Özellikleri.....	17
Tablo 4.1 : Cihazların şarj transfer direnci (R_{ct}), rekombinasyon direnci (R_{rec}), dahili potansiyel (V_{bi}) ve kontrolün 1 HZ değerlerinde ($C1Hz$) kapasitans, PMMA and PMMA:MX based PSCs.....	54
Tablo 4.2 : PMMA, KS ve MXene (Ti_3C_2Tz /KS) için FTIR pikleri	57
Tablo 4.3 : PMMA/MXene/KS algılama malzemelerinin çeşitli işlemlerle elde edilen BET yüzey alanı, gözenek boyutu ve gözenek hacmi.	60
Tablo 4.4 : Test edilen nanofiber filmlerin antimikrobiyal etkinliğinin değerlendirilmesi, S1: PMMA/KS; S2: PMMAA/MXene/KS; ve S3: PMMA/MXene olarak kodlanmıştır. Polimerize ve polimerize edilmemiş formlar kullanılarak agar kuyu ve disk difüzyon yöntemleriyle sırasıyla inhibisyon bölgelerinin ($mm \pm SD$) kaydedilmesi.....	60
Tablo 4.5 : PMMA/MXene nanofiber filmlerinin polimerize edilmemiş (20, 40, 60, 80 ve 100 mg/ml) formlarının çoklu ilaca dirençli patojenlere karşı minimum inhibitör konsantrasyonunun (MIC) tespiti, inhibitör oransal faktörün (%) ölçülmesiyle yapılmıştır	61
Tablo 4.6 : PMMA/MXene/KS nanofiber filmlerinin polimerize edilmemiş (20, 40, 60, 80 ve 100 mg/ml) formlarının çoklu ilaca dirençli patojenlere karşı minimum inhibitör konsantrasyonunun (MIC) belirlenmesi, inhibitör oransal faktörün (%) hesaplanmasıyla yapılmıştır.....	62
Tablo 4.7 : Açık perovskite, PMMA ve PMMA filmlerinin ETL öncü çözeltisi (PCBM içinde CB) ile temas açısı (CA) ölçümleri	64
Tablo 4.8 : 1 güneş simüle ışınlandırması (72 mW/cm^2) altında PSC'lerin TPV ve TPC eğrilerinin uyarlanmış parametreleri. τ ve t_e , sırasıyla TPV ve TPC eğrilerinden elde edilen yeniden birleşme ve çıkarma yüklerine karşılık gelir	64
Tablo 4.9 : Perovskite/PCBM, perovskite/PMMA/PCBM ve perovskite/PMMA/PCBM filmlerinin TRPL (Zamanla Işık Salınımı) eğrilerinin uyarlanmış parametreleri.....	65

KISALTMALAR

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
CNT	Karbon Nanotüp
DMF	Dimetilformamid
FSA	Flor Silikon Akrilat
FSC	Esnek Süper Kapasitörler
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HFIM	Heksafloroizopropil Metakrilatın
KS	Kitosan
MA	Metakrilik Asit
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
PDA	Polidopamin
PDM	Polidimetilsiloksan
PET	Polietilen Tereftalat
PMMA	Poli Metil Metakrilat
PVA	Polivinil alkol
RGP	Sert Gaz Geçirgen
TEM	İletim Elektron Mikroskobu
TGA	Termogravimetrik Analiz
THF	Tetrahidrofuran
TRİS	Trimetil Siloksi Silan

GİRİŞ

Günümüzde, insanların ihtiyaçlarına yönelik olarak nanoteknoloji ve biyoteknoloji çalışmalarıyla geliştirilen veya yeni oluşturulan malzemelere olan ilgi artmaktadır. Nanoteknoloji, nano boyutlardaki malzemelerin üretilmesi, geliştirilmesi ve incelenmesi anlamına gelmektedir. Bu teknoloji ile malzemelerin nano boyutta çalışarak mekanik, fiziksel, kimyasal ve elektriksel dayanıklılıkları değiştirilebilir ve iyileştirilebilir. Nano malzemelerin geliştirilmesi ve kullanım alanlarının sağladığı avantajlar, nanofiber, nanotel ve nanotüp gibi nanoyapıların nanoteknoloji alanında ilgi çekici konular arasında yer almasına neden olmuştur.

Nanofiberlerin üretiminde elektro eğirme, nano-kalıp, kimyasal buhar biriktirme (CVD), çizme, lazer buharlaştırma, kendiliğinden tutunma, eriyik püskürtme ve faz ayırma gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır(C. Y. Xu et al., 2004). Çapı bir mikron ve altında olan fiberler, polimer çözeltisi veya polimer eriyiğinden çeşitli yöntemlerle elde edilmektedir ve bu fiberlere “nanofiber” adı verilmektedir. Günümüzde nanofiber üretiminde en çok kullanılan yöntemlerden biri elektro eğirme tekniğidir. Bu teknik, diğer yöntemlere kıyasla dolu ve boşluklu iç yapılı, sürekli, düzenli çapta ve polimer, metal oksitler veya seramikler gibi birçok farklı malzemeden nanofiber üretimine olanak tanıdığı için oldukça avantajlıdır (B. UNAL, 2017)

Çeşitli teknikler kullanılarak polimer çözeltisi veya polimer eriyiğinden elde edilen, çapı bir mikron ve altındaki liflere “nanofiber” adı verilmektedir. Mevcut durumda, nanofiberlerin üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerden biri elektro eğirme yöntemidir. Diğer tekniklere kıyasla bu yöntem; dolu ve boşluklu iç yapıya sahip, sürekli, düzenli çapta ve polimer, metal oksitler veya seramikler gibi birçok farklı malzemeden nanofiber üretimine olanak tanıdığı için oldukça avantajlıdır (B. UNAL, 2017)

Kontak lens, kırma kusurunu düzeltmek için kullanılan yaygın bir yapay cihaz olup, ön yüzeyi korneanın en ön yüzeyinin yerini alır. Kontak lens kullanımı, artan bir şekilde yaygınlaşmakta ve kırma kusuru onarımı, miyop kontrolü, restoratif nedenler

ve kozmetik amaçlar gibi çeşitli endikasyonlarla kullanılmaktadır. Kozmetik kontak lensler, diğer adıyla dairesel veya dekoratif lensler, başlangıçta iris ve kornea şekil bozuklukları olan hastalar için geliştirilmiş, ancak şimdi bir kişinin görünümünü değiştirmek veya geliştirmek için de kullanılmaktadır (Waghmare & Jeria, 2022a).

Kontak lensler, gözün dış tabakası olan korneaya yerleştirilen, şeffaf yarım küre şeklindeki cihazlardır (Roth, 1995). Görme düzeltme prosedürlerinin yanı sıra, kontak lensler glokom, yaşa bağlı makula dejenerasyonu (AMD) ve kuru göz gibi çeşitli hastalıkları tedavi etmek için kullanılabilir. Bu cihazlar, sert ve yumuşak ontakt lensler olmak üzere iki türe ayrılabilir. Alternatif olarak, Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) bunları hidrofilik (-filcon) veya hidrofobik (-falcon) lensler olarak da sınıflandırır (Carvalho et al., 2015; Mutlu, Shams Es-haghi, et al., 2019).

İlk görme düzeltme denemeleri, Leonardo Da Vinci'nin 1508 yılında hastanın başını su dolu bir kaseye daldırarak görüşünü değiştirmeye çalıştığı zamana kadar uzanmaktadır. Cam lensler 1800'lerde tanıtılmış olmasına rağmen, malzeme geliştirmede gerçek ilerleme, 1930'ların başlarında polimer bazlı malzemelerin (örneğin, poli-metil metakrilat (PMMA)) kullanımıyla sağlanmıştır. Bunu, hafif, yüksek oksijen geçirgenliği ve dayanıklılığı nedeniyle dünya çapında hızla kabul gören poli-hidroksietil metakrilat (PHEMA) hidrojellerin geliştirilmesi takip etti (WICHTERLE & LÍM, 1960). Bu da kontak lenslerin genişletilmiş kullanımına olanak tanıdı.

Üç tür kontak lens; sert lensler, gaz geçirgen sert lensler ve yumuşak lensler, üretimlerinde kullanılan malzeme türüne göre ayırt edilebilir. Birçok ülkede, 15 ila 25 yaş arası yetişkin gruplar arasında kontak lens kullanım oranı % 40,5 olup, bu grupta ağırlıklı olarak kadınlar yer almaktadır (Zainodin et al., 2021). Küresel olarak yaklaşık 125 milyon kontak lens kullanıcısı vardır ve satış büyümesine dayalı olarak yıllık % 6'lık bir artış gözlemlenmektedir (Forister et al., 2009; Zainodin et al., 2021). Hastalar kırma kusurlarını düzeltmek için sürekli kontak lens taktıkları sürece, hijyenik olmayan uygulamalar, gece kullanımı ve kontak lens solüsyonuna bağlı komplikasyonlar oftalmik uygulamalarda endişe kaynağı olmaya devam edecektir (Waghmare & Jeria, 2022b). Kontak lenslerin artan oksijen geçirgenliği, korneal hücrelere mikrobiyal bağlanmanın başlangıçta azalması ve yüzeysel epitel hücrelerinin artan dökülmesi ile ilişkilendirilmiştir, ancak mikrobiyal keratit (MK)

önlemesinde etkili olduğu gösterilmemiştir (Ladage et al., 2001; Stapleton et al., 2008). MK, kontak lens kullanıcıları arasında korkulan bir komplikasyon olup, gece kontak lens kullanımı ile yılda yaklaşık her 500 kullanıcıdan birinde MK gelişeceği tahmin edilmektedir (Stapleton et al., 2008). Her zaman kabul gören risk faktörleri modifiye edilebilir veya edilemez risk faktörleri olarak kategorize edilebilir. Birçok iklim ve kültürde, lens tedarik kalıpları, kullanıcı davranışları, kontak lens reçeteleri ve doğal mikrobiyota çeşitlilik göstermektedir. Bu çalışmalar ayrıca kontak lenslerle ilişkili mikrobiyal keratit için risk faktörlerini özetlemekte ve hastalık yükü üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir (C. H. L. Lim et al., 2016). Biyosensörler insan açısından önemli olan çeşitli analitleri nitel ve nicel olarak belirlemek için kullanım kolaylığı olan, yüksek hassasiyet ve taşınabilirliğe sahip, az numune gerektiren analitik cihazlardır.

Son derece oksijen geçirebilen silikon hidrojel kontak lenslerin ortaya çıkışı, hipoksik komplikasyonların sıklığında bir azalmaya neden olmuştur (Stapleton, 1992). Kornea oksijen gereksinimleri bireyler arasında farklılık gösterir. Damar içermeyen kornea, oksijeni doğrudan gözyaşı filmi aracılığıyla alır. Kornea ayrıca besin maddeleri (glikoz ve diğerleri) için prekorneal gözyaşı filmine ve atık ürünlerin taşınmasına da bağımlıdır. Bu nedenle, kontak lenslerin aşırı kullanımı bu süreci bozmaktadır. Daha önce bildirilen geri dönüşsüz komplikasyonlar arasında polimegetizm, korneal vaskülarizasyon ve pleomorfizm yer almaktadır (Stapleton, 1992; Stapleton & Carnt, 2012). Hipoksi komplikasyonlarını azaltmak için sert gaz geçirgen lensler ve silikon hidrojel kontak lensler önerilmelidir (Sweeney, 2013).

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİYİLEBİLİR KONTAK LENS TEKNOLOJİSİ

1508'de Leonardo da Vinci ilk olarak doğrudan göz yüzeyine düzeltici bir lens yerleştirme fikrine sahipti (C.H. Dohlman, 1968; Sinha & Dada Kumar, n.d.). 1637'de René Descartes, sıvı dolu bir cam tüpün kornea ile doğrudan temas ettiği başka bir fikir önerdi. 1887'de Alman fizyolog Adolf Eugen Fick ilk başarılı kontak lensi tasarladı (Jeremy E., n.d.). Camla üflenen skleral lensler, poli metil metakrilat (PMMA) geliştirildiği 1938 yılına kadar tek kontak lens şekli olarak kaldı ve Mullen ve Obring, skleral lensleri üretmek için plazmayı kullandılar. Obring Pleksiglas serisini 1940 yılında New York'ta geliştirmiştir (Sinha & Dada Kumar, n.d.).

1961'de Çek kimyager Otto Wichterle, yumuşak kontak lensleri icat etti (Guzman-Aranguéz et al., 2016; La Porta Weber et al., 2016). 1970 yılında, sert gaz geçirgen kontak lensler geliştirildi ve küçük çapları (yaklaşık 9 mm) ve gaz geçirgenliği avantajları nedeniyle geniş kabul gördü. 1979 yılında silikon hidrojel malzemeler geliştirildi (Kojima, 2018). 1999 yılında, ilk silikon hidrojeller piyasaya sürüldü ve bu yeni malzemeler son derece yüksek oksijen geçirgenliği ve konfor performansı sergiledi (Sinha & Dada Kumar, n.d.).

Özel malzemelerin gelişimini etkileyen faktörler belgelenmiştir (Sharma et al., 2000a). Gözle temas eden bir mercek kullanarak görmeyi iyileştirmeye yönelik erken girişimlerin anlatıları, birkaç izole gözlemle sınırlıdır (Keay et al., 2006). Camdan lens imalat teknikleri yeterince gelişene kadar pratik başarı sağlanamamıştır (Papas et al., 2013). PMMA, 1930'ların sonlarında camın yerini almıştır. Bu malzeme daha dayanıklı, daha kolay imal edilebilir ve bazı yazarlar tarafından daha iyi oküler uyumluluk gösterdiği iddia edilmiştir (Namrata et al., n.d.). Aynı dönem içinde, skleralden kornea kontak lenslerine geçişte de vurgu değişikliği olmuş ve bu durum malzeme tasarımı ve geliştirilmesine farklı talepler getirmiştir.

Şu anda dünya çapında 125 milyondan fazla insan tarafından kullanılan kontak lenslerle yapılan oftalmik tedavilerden daha fazlası talep edilmektedir (Bartlett et al.,

1993a). Kontak lens malzemesinin iyileştirilmesi, hızla gelişen bir disiplindir(Sharma et al., 2000a).

1.1. SAĞLIKTA NANOTEKNOLOJİ ÇALIŞMALARI

Nanomalzemelere dayalı nanoteknoloji, insan yaşamının tüm sektörlerini etkileyen yeni bir teknoloji çağını başlatmıştır: Elektronik ve bilgisayarlar, mobil telefonlar, gıda ve tarım endüstrisi, kozmetikler, boyalar ve tabii ki sağlık sektörü. 2009 yılında Tüketici Ürünleri Envanteri, dünya genelinde 485 şirket tarafından üretilen nanoteknolojiye dayalı 1015 ürünü listelemiştir (Url-1). Nanoteknolojinin sağlık üzerindeki potansiyel etkisi muazzamdır ve ‘Nano-tıp’ olarak adlandırılan yeni bir dönemin birçok yönünü kapsamaktadır (Allhoff, 2009).

Nanoteknoloji, nano ölçekli malzemelerin üretimi, geliştirilmesi ve incelenmesidir. Nanoteknoloji sayesinde, giyilebilir teknoloji, moleküler gıda çalışmaları, vücuttaki hasar ve hastalıkları tespit edip onarabilen sistemler, daha hızlı bilgisayarlar ve savunma sanayii gibi birçok alanda geliştirilmiş özelliklere sahip ürünler ortaya çıkmıştır (Ramarkrishna ve diğerleri, 2005; Miller ve diğerleri, 2006). Biyoteknoloji gibi, nanobilim de tıp, fizik, kimya, elektronik ve malzeme bilimi gibi alanları kapsayan multidisipliner bir şekilde çalışır (Ramarkrishna ve diğerleri, 2005; Miller ve diğerleri, 2006).

Nanoteknoloji araştırmalarıyla üretilen yüzeyler, normal liflerle yapılan yüzeylere kıyasla daha yüksek hücre yapışkanlığına sahiptir (Gündüz, 2014). Bunun nedeni, yüzey kütlesi oranıdır. Nanoteknoloji sayesinde nanoliflerle üretilen yüzeyler, geniş yüzey alanları ve gözenekli yapıları sayesinde doku iskeleleri olarak kullanıldıklarında hücrelerin daha kolay yapışmasını sağlar (Can ve Duran, 2009).

Son yıllarda biyoteknoloji ve elektroniğin kesişimi, giyilebilir sağlık cihazları alanında dönüştürücü yeniliklere yol açmıştır(Mutlu, Shams Es-haghi, et al., 2019). Bunlar arasında akıllı biyoelektronik kontak lensler, en son teknolojiyi günlük göz bakımının pratikliği ile harmanlayan umut verici bir sınır olarak ortaya çıkmıştır. Bu gözden geçirme, akıllı biyoelektronik kontak lenslerin evrimini, yeteneklerini ve beklentilerini araştırarak, onları kişiselleştirilmiş ve erişilebilir sağlık çözümlerinin ön saflarında konumlandıran gelişmelerin karmaşık örtüsünü çözüyor. Karmaşık yapısı ve fizyolojik göstergeleri ile insan gözü, genel sağlığımıza eşsiz bir pencere sunuyor.

Akıllı biyoelektronik kontak lensler, çeşitli tıbbi durumları izlemek, teşhis etmek ve hatta tedavi etmek için biyosensörleri, mikroelektronikleri ve kablosuz bağlantıyı entegre ederek bu doğal potansiyelden yararlanır. Diyabetli bireyler için sürekli glikoz izlemesinden glokom yönetimi için gerçek zamanlı göz içi basıncı izlemesine kadar, bu lensler geleneksel görme düzeltmesini aşarak proaktif sağlık yönetimi için vazgeçilmez araçlar haline gelir. Biyoelektroaktif, minyatür elektronikler ve biyoyoumlu malzemeler alemlerine girerken, bu inceleme akıllı biyoelektrik kontak lenslerin manzarasında gerçekleştirilmektedir. Oküler ortamlarla sorunsuz entegrasyon sağlamada, kullanıcı konforunu sağlamada ve veri doğruluğunu optimize etmede üstesinden gelinen zorlukları ve elde edilen atılımları araştırıyoruz. Ayrıca, bu lenslerin özellikle uzaktan hasta izleme ve erken hastalık tespitinde sağlık hizmetlerine erişilebilirlik üzerindeki potansiyel etkisini tartışılmaktadır (Fink, 2022).

Akıllı kontak lenslerde nanoteknoloji, biyomühendislik ve elektroniğin yakınsaması, kişiselleştirilmiş ve göze batmayan sağlık hizmetlerinde yeni bir çağın habercisidir. Bu gözden geçirme, mevcut araştırma durumunu, teknolojik yetenekleri ve öngörülen uygulamaları inceleyerek, akıllı biyoelektrik kontak lenslerin gelişen manzarasını ve giyilebilir sağlık teknolojilerinin geleceğini şekillendirmedeki rollerini kapsamlı bir şekilde anlamayı amaçlamaktadır.

1.2. KONTAK LENS ÇEŞİTLERİ VE KULLANILAN BİYOMALZEMELER

Sert ve yumuşak bazlı kontak lens malzemeleri ve bunların PMMA, florosilikon akrilat (FSA), hidrojel bazlı malzemeler, protein itici kaplama malzemeleri, biyodan ilham alan polimerler, PET, MPC, PDM'LER gibi alt kategorileri açıklanmış ve çalışmalar gösterilmiştir(Honda, 2000; van der Worp et al., 2014). Kontak lens kavramı da Vinci'nin bu fikri ilk önerdiği 1508 yılına kadar uzanıyor. Bu lensler, aşınma süresi, konfor, dayanıklılık, pratiklik ve görsel kararlılığı kapsayan, kullanıcıların farklı ihtiyaçlarından etkilenen malzeme seçimi ile geniş ölçüde sert ve yumuşak tiplere ayrılır. Kişiselleştirilmiş kontak lens arayışı 1930'larda manzaraya hâkim cam lenslerle başladı. 1940'larda PMMA piyasaya sürülmesi, 1948'de Tuohey tarafından ilk sert kontak lensin yaratılmasına yol açan önemli bir gelişmeyi işaret etti (Fonn et al., 1984; Kantarci et al., 1997; McDermott & Chandler, 1989). PMMA 'nın övgüye değer optik özelliklerine rağmen, sınırlı oksijen

geçirgenliği uzun süreli aşınma için zorluklar neden olmuştur. 1970'lerin sonlarında PMMA'nın metakriloksipropiltris (trimetil siloksi silan) (TRİS)(N.-P.-D. Tran & Yang, 2019a; Weeks et al., 2012) gibi metakrilat fonksiyonel siloksanlarla kopolimerizasyonunu içeren sert gaz geçirgen (RGP) (Mandathara et al., 2013; X.-H. Zhang & Li, 2020) lenslerin ortaya çıkışı, bu sorunu çözerek oksijen geçirgenliğini önemli ölçüde artırdı. Hidrojel lensler 1960'larda ve 1970'lerde ortaya çıktı ve silikon hidrojellerin kontak lensler alanında önemli bir malzeme haline gelmesinin önünü açtı.

Azalan ıslanabilirliğe karşı koymak için, metakrilik asit (MA) sıklıkla bu polimerlere dahil edilir ve RGP lenslerin hem günlük hem de uzun süreli kullanım için uygulamalarını genişletir. Son gelişmeler arasında heksafloroizopropil metakrilatın (HFIM) RGP lens malzemelerine entegrasyonu, mekanik özelliklerin ve oksijen geçirgenliğinin 30-160 varile yükseltilmesi yer alıyor. Kontak lens malzemelerinin devam eden evrimi, malzeme bilimcilerin kullanıcı taleplerini karşılama konusundaki kararlılığının altını çizerek, kullanım konforu, uzun ömür, pratiklik ve görsel performans arasında bir denge kuruyor.

Doğal bazlı malzemelerden yapılan kontak lensler, kullanılan spesifik malzemeye (Aziza et al., 2022; Itoi & Itoi, 2022; Nosch et al., 2023) bağlı olarak hem esnek (yumuşak) hem de sert formlarda mevcuttur. Hidrojel malzemeler kullanan yumuşak lensler, daha fazla konfor için doğadan ilham alan unsurlar içerir. Bu lensler esnektir ve rahat bir kullanım deneyimi sağlayan su emici bileşenler içerir. Benzer şekilde doğal bazlı malzemeler kullanan silikon hidrojel lensler de kullanıcılara konforlu ve biyouyumlu bir seçenek sunuyor. Bu lensler, daha fazla konfor ve uyumluluk için gözün doğal özelliklerine uyum sağlamayı amaçlar. Tersine, sert gaz geçirgen (RGP) lensler geleneksel olarak sentetik malzemeler kullanır; Bununla birlikte, devam eden araştırmalar doğadan ilham alan veya biyomimetik elementlerin entegrasyonunu araştırmaktadır (Barnett & Mannis, 2011; McMahon, 2022a; Shaker et al., 2024; X.-H. Zhang & Li, 2020). Amaç, konforu artırarak ve göze daha biyouyumlu bir arayüz oluşturarak kullanıcı deneyimini iyileştirmektir. Doğal bazlı kontak lenslerin sürekli gelişimi, kullanıcıların tercihlerine ve ihtiyaçlarına göre uyarlanmış çok çeşitli seçenekler sunmaya odaklanır. Bu yenilik, kontak lens kullananların konforunu, uyumunu ve genel deneyimini geliştirmeye yönelik devam eden bir taahhüdü yansıtmaktadır.

Başlangıçta kontak lensler, astigmatizme ve kornea düzensizlikleri gibi endişeleri gidermek için camdan yapılmıştır. Bununla birlikte, şeffaf bir polimer olan PMMA'ye geçiş, oksijen ve su akışında sınırlamalar getirerek ve ardından göz sağlığı sorunlarına yol açtı. Bu zorlukların üstesinden gelmek için araştırmacılar, bir metakrilat iskeletini bir siloksan grubuyla birleştirerek, artan sertlik ve hava geçirgenliği ile karakterize edilen lenslerle sonuçlanan yeni bir lens dönemi başlattılar. Bu ilerlemelere rağmen, SAM lensleri (Schafer et al., 2018), yüksek lipofilikliklerine atfedilen zayıf yüzey ıslatma ile ilgili sorunlarla karşılaştı. Gelişmiş konfor arayışında, SAM'e flor tanıtıldı ve FSA lenslerine yol açtı. PMMA, FSA, PET katı kontak lens tipleridir (Grosvenor et al., 1989). Modern sert kontak lensler alanında, oksijen geçirgenliğini artırmak için PMMA içeriğinde önemli bir azalma olmuştur. Hidrojel teknolojisi kontak lenslerin manzarasını etkilemiş olsa da sert lensler ameliyat sonrası tedavilerde hala çok önemli bir rol oynamaktadır. Spesifik olarak, açıklanmayan bileşimlere sahip sert gaz geçirgen lenslerin korneayı yeniden şekillendirmede etkili olduğu kanıtlanmıştır- bu, doğal plastisiteleri nedeniyle yumuşak lenslerin yeteneklerinin ötesinde bir başarıdır. Bu araştırma, RGP kontak lenslerin yüzey özelliklerini değiştirmek için UV lazer ve oksijen plazmasının kullanımını incelemektedir. RGP lensler, oksijen geçirgenliği ve yırtılma döviz kuru açısından yumuşak lenslerden daha iyidir, ancak aşınma sırasında ıslanabilirliklerini optimize etmek zordur. Bu çalışmada Boston XO malzemelerinden imal edilen RGP lenslerin yüzeyi lazer desenlendirme ve oksijen plazma işlemi ile modifiye edilmiştir. Değiştirilen lenslerin analizi, temas açılarının ölçülmesini içeriyordu. Bulgular, lens malzemesinin lazer desenleme ile temas açısında önemli bir azalma gösterirken, oksijen plazmasının eklenmesi yüzey ıslanabilirliğini daha da artırdı. Hem UV lazer hem de oksijen plazması ile işlenen yüzey, yalnızca oksijen plazması ile işlenen ve işlenmemiş yüzeye kıyasla daha hidrofilik özellikler gösterdi. Bu çalışma, RGP lenslerin kenarlarında UV lazer ve oksijen plazmasının kombine tedavisi ile umut vaat edildiğini göstermektedir (Gogri & Bhombal, 2020; Martin, 2009).

Tablo 1.1 Kontak Lens Çeşitleri ve Kullanılan Biyomalzemeler

KONTAK LENS ÇEŞİDİ	AÇIKLAMA	KULLANILAN BİYOMALZEMELER
Sert Gaz Geçirgen Lensler	Küçük Çaplı, Yüksek Oksijen Geçirgenliği Olan Lensler.	Polimetil Metakrilat (PMMA), Silikon Akrlatlar, Fluoropolimerler
Yumuşak Lensler	Yüksek Su İçeriği ve Esneklik Sağlayan, Konforlu Lensler	Hidrojel, Silikon Hidrojel
Sert Lensler (Skleral Lensler)	Göz Yüzeyinin Tamamını Kaplayan, Özellikle Ciddi Korneal Problemlerde Kullanılan Lensler.	PMMA, Silikon Akrlatlar
Korneal Lensler	Sade Korneayı Kaplayan Lensler, Çeşitli Malzemelerden Yapılabilir.	PMMA, Silikon Akrlatlar, Luoropolimerler, Hidrojel
Günlük Kullanım Lensler	Bir Günlük Kullanımdan Sonra Atılan Lensler, Enfeksiyon Riskini Azaltır.	Silikon Hidrojel, Hidrojel
Uzun Süreli Kullanımlık Lensler	Bir Haftadan Birkaç Aya Kadar Kullanılabilen Lensler, Sık Temizlenmesi ve Bakımı Gereklidir.	Silikon Hidrojel, Hidrojel
Renkli ve Kozmetik Lensler	Göz Rengini Değiştiren veya Belirginleştiren Lensler,	Hidrojel, Silikon Hidrojel
Tedavi Edici Lensler	Korneal Yaralanmalar veya Hastalıkların Tedavisinde Kullanılan Lensler	Hidrojel, Silikon Hidrojel

İKİNCİ BÖLÜM

2. KONTAK LENS TASARIMI İÇİN KULLANILAN MALZEMELER VE ELEKTRO- EĞİRME TEKNOLOJİSİ

Kontak lens malzemeleri (Sharma et al., 2000b) tipik olarak polimer veya silikon hidrojele dayanır ve son lensi üretmek için ek üretim teknolojileri kullanılır. Bu işlemler, artan kontak lens taleplerini ve giderek artan sayıda kontak lens kullanıcısını karşılamak için yeterli değildir (Bartlett et al., 1993b). Yeni kontak lenslerin geliştirilmesinde kullanılan malzeme bilimine vurgu yapılarak kontak lens malzemelerine ileri bir bakış açısı sunulmuştur. (Bartlett et al., 1993b). Kontak lens malzemeleri için gelecekteki eğilimler, yeni veya geliştirilmiş işlevsellik sağlamak için klasik kontak lens malzemesi yapısını aşmak, kapsüllemek veya değiştirmektir. Ayrıca, bazı temel malzeme özellikleri tartışılmakta ve ortaya çıkan biyomalzemelere ilişkin görünüm sunulmaktadır.

Kontak lens materyalleri ve lens tipleri, kontak lens ve gözyaşı filmi komplikasyonlarının tedavisi ve anormal oküler durumlar için miyop düzeltmesi ve kontak lens es ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Fonn et al., 1981). Bu alandaki güncel konular minisklral lensler, keratokonus, kornea çapraz bağlanması ve pediatrik, kozmetik ve protez kontak lenslerdir. Ayrıca sklral lens takma, sagittal değerler, yumuşak torik yer değiştirme, ön köşe gücü, ortokeratoloji ve sert lens tasarımı için simülasyon programları tartışılmıştır.

2.1. PMMA

Kontak lenslerin tarihi, cam kullanmanın zorluklarından kaynaklanan sorunları ele alan PMMA'NIN piyasaya sürülmesiyle başladı (McMahon, 2022b; Thean & McNab, 2004). PMMA, optik netlik, üretim kolaylığı ve kolay sterilizasyon gibi avantajları nedeniyle sert kontak lenslerde popülerlik kazanmıştır. Bununla birlikte, oksijen taşınmasında dezavantajları olduğu için, daha fazla oksijen geçirgenliğine

sahip malzemelerin araştırılması gerekir. Bu nedenle PMMA, onu alt tabaka ve örtü olarak kullanan akıllı lenslerin geliştirilmesine odaklanmıştır. PMMA lensler için önemli bir gelişme, nanofotonik lenslerin araştırılmasıdır (Tomić et al., 2014). PMMA, kontak lenslerin göz üzerindeki etkilerinin incelenmesi için referans materyal olarak kullanılır. Bu çalışmalar PMMA lenslerin astigmatizma, şaşılık ve blefaroptoz gibi göz rahatsızlıkları üzerindeki etkisini araştırmaktadır. PMMA dışındaki malzemelerin araştırılması, kontak lens teknolojisinin dayanıklılığını ve oksijen geçirgenliğini iyileştirmeyi, göz sağlığı ve kullanıcı konforu gereksinimlerini karşılamayı amaçlamaktadır. PMMA'nın tıp alanına dahil edilmesi, İkinci Dünya Savaşı sırasındaki bir olaydan kaynaklandı. Pilot Gordon Cleaver, uçağına binmeden önce gözlüklerini unuttuğu için Winchester şehri üzerinde uçarken makineli tüfek ateşine maruz kaldı ve gözlerine PMMA akrilik kaplama parçaları gömüldü. Cleaver sağ gözündeki hasar nedeniyle görüşünü kaybederken, vücudunun sağ gözündeki parçalara tolerans göstermesi dikkat çekiciydi. Bu olay, bir göz doktoru olan Harold Ridley'in PMMA'nın yapay lensler için kullanılabileceği fikrine yol açtı ve oftalmik teknolojide ilerlemelere yol açtı.

Sonuç olarak, kontak lens teknolojisi PMMA kullanımıyla başlamış olsa da, daha fazla oksijen geçirgenliği ve kullanıcı konforu sağlayan malzeme arayışıyla gelişmiştir. Ayrıca PMMA'nın tıp alanına dahil edilmesi göz sağlığındaki ilerlemelere katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte, sürekli gelişen ihtiyaçları karşılamak için lens malzemelerinin daha da geliştirilmesi ve sürekli araştırma yapılması gerekmektedir. Örneğin, bu araştırmada şaşılık sorununu hedef alan oftalmik prizmatik kontak lens için yeni bir tasarım sunulmuştur. Şu anda şaşılığı düzeltmek için tasarlanmış kontak lens eksikliği var. Önerilen lens, poli metil metakrilat kullanılarak üretilir ve COMSOL Multiphysics Işın Optik modülü kullanılarak modellenir (Asgharzadeh Shishavan et al., 2016; Koruga et al., 2013a). Göz yüzeyine Fresnel lensler uygulandığında ışığın retinaya yeterince odaklanmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ışığa odaklanmayı iyileştirmek için alternatif çözümler araştırılmış, ancak bazı sorunlarla karşılaşmıştır. Işığın bir kısmı etkili bir şekilde odaklanamadı ve dağılamadı ve PMMA'nın doğal dağılım özellikleri renk sapması sorununa neden oldu. Bu sorunların üstesinden gelmek için önerilen yaklaşım, meta yüzey nanofotonik lensi kullanan bir ışın optiği çözümüne dönüşecektir. Bu uyarlanabilir lens, prizmatik bir

lensin davranışını taklit etmek için tasarlanmıştır ve ışığın retinaya odaklanmasını optimize etmeyi ve şaşılık düzeltme yeteneğini geliştirmeyi amaçlar. Bu yenilikçi yaklaşım, oftalmik düzeltici teknolojilerde olumlu bir ilerleme sunmaktadır(Sarac et al., 2024).

2.2. FLOROSİLİKON AKRİLAT (FSA)

RGP kontak lenslerin kullanımının genç bireylerde miyopinin ilerlemesini yavaşlatmada etkili olduğu kanıtlanmıştır. Spesifik olarak, FSA RGP kontak lensler, son yıllarda artan oksijen geçirgenlikleri nedeniyle popülerlik kazanmıştır (Mosuela et al., 2018). Bununla birlikte, FSA lens yüzeylerinin hidrofobik yapısı zayıf ıslanabilirliğe yol açarak yüzeyde lipidlerin ve proteinlerin kolayca birikmesine neden olur. Bu sınırlama, yaygın klinik uygulamasını engellemektedir. Bu sorunu çözmek için, FSA lenslerinin yüzey hidrofilikliğini arttırmak için yüzey modifikasyonu zorunlu hale gelir. Hidrofilikliğı iyileştirerek gözyaşı sıvısı daha kolay yayılarak lipid ve protein birikimini azaltabilir. Bu değişiklik, hastalara daha iyi görme keskinliği, daha fazla konfor ve genel olarak daha iyi bir deneyim sağlamayı amaçlamaktadır. FSA RGP kontak lenslerde yüzey hidrofilikliğinin artırılması, düşük sıcaklıkta azot plazmasının kullanılmasıyla sağlandı. Azotun yüzeye başarılı entegrasyonu, X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizi ile doğrulandı. Dahası, azot plazma işlemi, NCO, F ve silikat gibi yeni bağların oluşturulmasını kolaylaştırdı, böylece yüzeyin geliştirilmiş hidrofilik özelliklerine katkıda bulundu. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) bulguları, orta güçlü nitrojen plazmanın yüzeyi kısmen düzleştirebileceğini, daha yüksek güçlü plazmanın ise aşındırmayı indüklemeye potansiyeline sahip olduğunu ortaya koydu.

2.3. POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)

PET, plastik şişe imalatındaki yaygınlığı ile tanınan bir homopolimer olarak öne çıkmaktadır (Fromel & Pester, 2022; Keum et al., 2020; Mohammadi et al., 2014). Bu tip plastik, nispeten düşük bir cam geçiş sıcaklığı ile birleştiğinde mükemmel kimyasal ve ısı direnci sergiler. PET'in elverişli özellikleri, onu karmaşık yapılara sahip çeşitli filmlere kolayca ısıyla şekillendirilebilir hale getirir. PET filmlerin şeffaflığı, onları akıllı kontak lenslerde alt tabaka veya örtü olarak kullanıma uygun

hale getirir. Bu avantajlara rağmen, PET filmler, gaz geçirgenliğinden yoksun ve geleneksel hidrojel malzemelere kıyasla özellikle daha sert olan zorluklar sunar. Uzun süreli aşınma rahatsızlığı ve kornea şişmesine neden olabilir. Bu sorunları ele almak ve PET'in genel biyouyumluluğunu, gaz geçirgenliğini ve hidrofiliğini arttırmak için, akıllı kontak lenslerin imalatında PET-PDM'lerde Polidimetilsiloksan (PDM'LER) ile bir kombinasyon kullanılabilir. Bu modifikasyon, malzemeyi uzun süreli ve rahat kullanım için optimize etmeyi, sertlik ve sınırlı gaz geçirgenliği ile ilgili potansiyel sorunları azaltmayı amaçlamaktadır.

Benzer araştırmalarda, elektrokimyasal glikoz reaksiyonlarını kolaylaştırmak için düşük elektrik direncine sahip üç elektrotlu akıllı bir glikoz sensörü tasarlandı. Çalışma elektrodu (WE) ve karşı elektrot (CE) platin (Pt) ile kaplanmış ve bir polietilen tereftalat (PET) substratı üzerinde yapıştırıcı görevi gören bir Cr tabakası ile kullanılmıştır. Referans elektrot (RE), gümüş / gümüş klorür (Ag / AgCl) ile kaplandı ve sıvı ortamdaki amperometrik elektrokimyasal glikoz sensörünün doğruluğunu artırmak için sabit bir voltajı korudu. Glikoz seviyelerini ölçmek için, çalışma elektroduna (WE) glikoz oksidaz (GOx), sığır serum albümini (BSA), poli (vinil alkol) (PVA) ve kitosan içeren bir çözelti uygulandı ve kurutulduktan sonra çapraz bağlama için glutaraldehit eklendi. Diyabetik tavşanlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, normal tavşanlara kıyasla hem gözyaşı hem de kan şekeri seviyelerinin yükseldiğini göstermiştir. Bu bulgular gözyaşı glikoz seviyelerinin ölçülmesinin diyabetik hastalıkların teşhisinde kan şekeri ölçümlerine alternatif olabileceğini düşündürmektedir (Keum et al., 2020).

2.4. Yumuşak Kontak Lens Malzemeleri

Yumuşak kontak lens malzemeleri arasında Hidrojel bazlı; PVA, silikon hidrojel, MPC, Hyaluronik asit modifiye hidrojel bazlı protein itici kaplamalar, PDM'LER ve biyodan ilham alan kontak lensler yumuşak kontak lens malzemeleri, 2-hidroksietil metakrilat, N-vinil-2-vinil gibi hidrofilik monomerlerin polimerizasyonu ve çapraz bağlanması yoluyla oluşturulur. Pirolidon ve bunların kombinasyonları (Chatterjee et al., 2020). Bu hidrofilik monomerlerden türetilen elde edilen polimerler, dikkate değer hidrofilik özelliklere sahiptir ve polimerik matrisleri içinde önemli miktarda suyu emebilir. Bu doğal su emme özelliği, bu polimerleri hidrojel olarak

sınıflandırır. Bu hidrojeller optik berraklık sergilerler ve önemli su içerikleri nedeniyle yumuşak kontak lenslerin üretimi için oldukça uygun malzemeler olduklarını kanıtlarlar. Bununla birlikte, hidrojellerdeki yüksek su içeriği, nispeten düşük fiziksel güçlerine katkıda bulunur ve bu da onları yırtılmaya duyarlı hale getirir. Optik şeffaflıklarına ve su emici özelliklerine rağmen zorluk, su emme ile yumuşak kontak lenslerin yapısal bütünlüğünü koruma arasında bir denge bulmakta yatmaktadır. Çalışmalardan biri, gözyaşlarında gerçek zamanlı kortizol konsantrasyonu tespiti için tasarlanmış bir akıllı telefon arayüzü ve akıllı bir kontak lens içeren bir pilot denemedir. Yeni bir kortizol sensörü kullanan bu teknoloji, hacimli harici ekipmana bağımlılığı azaltarak mobil sağlık sistemlerinde kullanım için daha pratik bir çözüm sunar. Sensör, grafen alan etkili transistörlerle donatılmıştır ve 10 pg / ml'lik düşük algılama sınırına sahiptir. Şeffaf antenler ve kablosuz iletişim devreleri ile sensör, kullanıcının görüşünü engellemeden bir akıllı telefon üzerinden uzaktan çalıştırılabilir. Lensin biyolojik uyumluluğu ve güvenilirliği testlerle doğrulanmıştır. İnsan pilot denemesi, lensi invazif olmayan bir mobil sağlık çözümü olarak göstermektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, gerçek dünya senaryolarında kortizol seviyelerini izlemek için pratik ve kullanıcı dostu araçların geliştirilmesinde önemli bir adımdır (Goda & Ishihara, 2006).

2.4.1. Hidrojel Bazlı

HEMA ve türevleri gibi polimerik malzemeler, yüksek su içeriği ve uygun oksijen geçirgenliği ile karakterize hidrojeller oluşturur (Y. Chen et al., 2020; Kidane et al., 1998; McArthur et al., 2001; N.-P.-D. Tran & Yang, 2019b). Bu hidrojeller mükemmel ıslatma özellikleri sergilerken ve uzun süreli aşınmaya uygun olsalar da silikon bazlı lenslerde görülen oksijen geçirgenliğinin gerisinde kalırlar. Önemli bir pazar payına sahip olan HEMA türevli hidrojeller, çeşitli monomerlerle kopolimerizasyon yoluyla üretilir. NVP ve MAA gibi komonomerlerin dahil edilmesi, su içeriğini artırarak hidrojellerin ıslatma özelliklerinin arttırılmasında önemli bir rol oynar. Mekanik özellikler, EGDMA gibi çapraz bağlama ajanları eklenerek daha da rafine edilebilir. Çapraz bağların varlığı, su içeriğini ve oksijen geçirgenliğini etkileyen çok önemli bir faktördür. Bu nedenle, bir hidrojel lensin tasarımı, optimum

su içeriğine ulaşmak ile çapraz bağlantıların etkisini yönetmek arasında hassas bir denge gerektirir.

Benzer çalışmalarda, oftalmik ilaç formülasyonlarının mikroemülsiyon damlaları içinde kapsüllenmesini içeren araştırmalar yapılmıştır. Daha sonra, bu ilaç yüklü mikroemülsiyon damlaları, p-HEMA hidrojel­leri içinde dağıldı ve bunlar daha sonra tasvir edildiği gibi gözlere yerleştirildi (Gulsen & Chauhan, 2005). Araştırmalarının sonuçları, mikroemülsiyonlarla yüklü p-HEMA jellerinin şeffaflığını gösterdi. Bu jeller, 8 günden daha uzun bir süre boyunca sürekli ilaç salınımı sergiledi ve hem partikül büyüklüğü hem de ilaç yüklemesi kontrol edilerek dağıtım oranları değiştirilebilirdi. Ek olarak, bulguları, bu sistemin, uzun lens aşınmasıyla ilişkili yaygın göz sorunlarını ele alarak ve potansiyel olarak oküler durumlar için terapötik faydalar sağlayarak yağlama sağlama potansiyeline sahip olduğunu öne sürdü. Bununla birlikte, mikroemülsiyon yüklü hidrojellerin oluşturulmasında yer alan imalat işlemlerinin iki aşamalı bir yaklaşım gerektirmesi dikkat çekicidir: ilk olarak, mikroemülsiyon damlalarının hazırlanması ve ardından bunların hidrojel­ler içinde sıkışması (Gulsen & Chauhan, 2005).

2.4.2. Polivinil Alkol (PVA)

PVA hidrojel­leri, hidrofilik ve biyouyumlu özellikleriyle dikkat çeken kontak lens malzemeleri için zorlayıcı bir seçim olarak ortaya çıkmıştır (Hyon et al., 1994; D. Liu et al., 2023; Zhao et al., 2021). 1990'ların başında keşfedilen PVA hidrojel­leri, modifikasyonlara gerek kalmadan bile daha düşük protein emilim oranları ile öne çıkıyor. Bununla birlikte, Nelfilcon A lensinin piyasaya sürülmesiyle 1990'ların sonlarında pazar önemlerinde bir artış yaşandı (Bühler et al., 1999; Phan, Walther, et al., 2019). PVA hidrojel­lerinin sentezi, özellikle çevre dostu bir çözücü olan suyun kullanımını içerir. Ayrıca, fonksiyonel grupların tanıtılması, PVA hidrojel­lerinin özelliklerini daha da artırarak çapraz bağlanmayı kolaylaştırabilir. Özellikle Nelfilcon A lensi, kontak lens pazarında PVA hidrojel­lerinin artan önemini vurgulayarak bir dönüm noktası oldu (Ali & Byrne, 2009; Phan, Subbaraman, et al., 2019). PVA uygulamalarındaki son gelişmeler, daha rahat lenslerin geliştirilmesi ve renkli pigmentlerin dahil edilmesi de dahil olmak üzere geleneksel kullanımın ötesine uzanmaktadır. PVA hidrojel­lerinin çok yönlülüğü, özellikle kornea replasmanı gibi

alanlarda oftalmik uygulamalarda da umut vaat etmektedir. Çevreye duyarlı sentez, devam eden yeniliklerle birleştğinde, PVA hidrojellerini kontak lens malzemelerinin gelişen manzarasında dikkate değer bir oyuncu olarak konumlandırıyor. Malzeme bilimindeki gelişmeler araştırmacıları fotonik kristal gömülü hidrojel kontak lensler oluşturmaya yönlendirdi. Kitosan (KS) ve polivinil alkol (PVA) hidrojellerinden türetilen bu lensler toksik olmayan ve yenilikçi olacak şekilde tasarlanmıştır. Kontak lensler ve keratoprotez gibi uygulamalar için PVA hidrojellerinin kullanımı başlangıçta 1980'lerin sonlarında ve 1990'ların başlarında Kyoto Üniversitesi'nden araştırmacılar tarafından araştırıldı. Özellikle Kita ve ark. (Kita et al., 1990) çözücü karışımları kullanılarak şeffaf bir PVA hidrojeli oluşturmak için bir yöntem geliştirdi. Aynı zamanda, incelenen potansiyel yumuşak kontak lens uygulamaları için PVA hidrojel malzemesinin bir değerlendirmesini gerçekleştirdi. Bulguları, uygun mekanik mukavemete ve oksijen geçirgenliğine sahip olmasının yanı sıra, PVA hidrojelinin düşük protein emilimi, yüksek su içeriği ve şeffaflık sergilediğini göstermiştir.

Bu ilerlemelere dayanarak, 1998'de Novartis, Nelfilcon A olarak bilinen yumuşak kontak lensler için PVA bazlı hidrojeller geliştirmeyi amaçlayan bir teknoloji için patent aldı. Bu yenilik, pva'nın kimyasal modifikasyonunu, özellikle poli (vinil alkol) kısmen asetalize edilmiş N-((formil metil) akrilamid), kalıplarda UV ışınlaması yoluyla çapraz bağlanmayı kolaylaştırmak için. Bu işlem malzemenin özelliklerini geliştirir ve yumuşak kontak lens uygulamalarına uygunluğunu sağlar (Mühlebach et al., 1997). Özetle, Japon araştırmacıların öncü çalışmaları, PVA hidrojellerinin geliştirilmesinin temelini attı ve ardından Müller'in yumuşak kontak lensler için dikkate değer bir malzeme olan Nelfilcon A'nın patentli teknolojisine yol açan ilerlemeleri. Bu hidrojeller, mekanik mukavemet, oksijen geçirgenliği, düşük protein emilimi, yüksek su içeriği ve şeffaflığın bir kombinasyonunu sergiler ve bu da onları çeşitli oftalmik uygulamalar için vaat eder.

Tablo 2.1. Polivinil Alkol Özellikleri

Genel özellikler	Beyaz toz, granül
Koku	Kokusuz
Yoğunluk	1.19-1.31 g/cm ³
Kaynama noktası	> 70 °C
Erime noktası	190 °C
Çözünürlük (Suda)	Tamamen Çözünür

2.4.3. Silikon Hidrojel Bazlı

Silikon hidrojeller, silikon kauçuğa benzer yapısal elementler içeren bir büyük organik molekül sınıfını temsil eder (G.-Z. Chen et al., 2014a; Kuriaki et al., 1985; Zekman & Sarnat, 1972). Formülasyonları, silikon içeren monomerlerin ve hidrofilik monomerlerin bir karışımının polimerleştirilmesini içerir. Geleneksel hidrojel merceklerden ayrılan silikon hidrojeller, su ve siloksan kanallarından oluşan çift kanallı bir yapıya sahiptir. Bu benzersiz tasarım, kontak lenslerin oksijen geçirgenliğini önemli ölçüde artırır. Silikon hidrojeller, oksijen geçirgenliği, şeffaflık, biyouyumluluk ve oksidatif ve termal strese dayanıklılık gibi temel özelliklere sahiptir. Sonuç olarak hem oftalmik hem de biyomedikal alanlarda yaygın uygulamalar bulurlar (G.-Z. Chen et al., 2014a).

Silikon hidrojellerin ilerlemesi, lenslerin yüzey özelliklerini geliştirmek için plazma yüzey işlemi gibi tekniklerin kullanılmasını içerir. Bu yenilikçi yaklaşım, geleneksel hidrojellerle ilişkili sınırlamaları başarıyla aşarak daha iyi konfor ve göz sağlığı için etkili bir çözüm sunar. Bu merceklerin içindeki silikon bileşeni, oksijen çözünme ve çözünen difüzyon özelliklerini arttırmada önemli bir rol oynar. Bu geliştirme, sulu ortamlardan bile verimli oksijen emilimini sağlar ve kornea dokusuna etkili bir şekilde verilmesini kolaylaştırır. Geçmiş çalışmalarda polidimetilsiloksan

(PDMS) ve tetraetil ortosilikattan (TEOS) türetilen silikon nanopartiküllerin (snp'ler) sentezi. Snp'ler, dinamik ışık saçılımı (DLS), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterizasyon için analiz edildi. Snp'ler daha sonra bir kompozit oluşturmak üzere 2-hidroksietilmetakrilat (HEMA) ve 1-vinil-2-pirolidinon (NVP) ile karıştırıldı ve hidrojel kontak lenslerde kullanılmak üzere polimerize edildi. Elde edilen hidrojeller, denge suyu içeriği (EWC), temas açısı ve oksijen geçirgenliği (Dk) gibi faktörler üzerinde değerlendirildi. SİNP ilavesinin oksijen geçirgenliğini arttırdığı ve SiNP içeriği arttıkça bu artışın daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Bu birleşme ewc'yi etkilemedi ve % 1.2 SİNP içeren hidrojel lens, % 73 EWC'Yİ korurken 71 barrer'de en the potyüyüksek oksijen geçirgenliğini elde etti. Bu çalışma, minimum miktarda snp'nin entegre edilmesinin, geleneksel hidrojel lenslerin oksijen geçirgenliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Bu yöntem, oksijen geçirgenliği iyileştirilmiş, daha fazla konfor ve göz sağlığı sağlayan kontak lens üretiminde umut vaat etmektedir (N.-P.-D. Tran & Yang, 2020).

Giyilebilir IoT cihazlarının, özellikle akıllı kontak lenslerin (scl'ler) yaygın entegrasyonu ve ticarileştirilmesi, elektrik gücü sağlamada önemli bir engelle karşı karşıyadır. Bu çalışma, tek taraflı bir mikro işleme prosedürü ile yarı saydam, kendinden destekli ve esnek monokristal silikon güneş pillerinin tasarlanması, üretilmesi ve karakterize edilmesinde başarılı bir çaba göstermektedir. Optik, mekanik ve elektriksel simülasyonları içeren kapsamlı bir yaklaşım, pratik ölçümlerle birleştiğinde, bu gelişmiş güneş pillerinin sınırlı ve esnek bir SCL platformuna entegrasyon için uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Kalınlığı 15 μm olan bu silikon güneş pilleri, herhangi bir mekanik veya elektriksel bozulmaya maruz kalmadan kubbe şeklindeki kontak lensin ($\text{ROC} = 8 \text{ mm}$) eğrilğine sorunsuz bir şekilde uyar. Bir dizi mikro deliğe sahip fotovoltaiik cihaz, AM1.5 güneş koşullarında % 25 görünür ışık şeffaflığında 504 mV'luk VOC , 6,48 mA cm^{-2} 'lik JSc ve maksimum 1,67 mW cm^{-2} güç yoğunluğu gibi etkileyici özellikler sergiler. Özellikle cihaz, düşük yoğunluklu iç mekân ışık koşullarında bile sırasıyla % 50 ve % 25 şeffaf güneş pilleri için maksimum 25 ve 42 $\mu\text{W cm}^{-2}$ güç çıkışı sergiliyor. Bu atılım, güç sorununa umut verici bir çözüm sunarak, akıllı kontak lenslerde esnek ve yarı saydam güneş pillerinin verimli ve pratik bir şekilde uygulanmasının önünü açıyor (Pourshaban et al., 2022)

2.4.4. MPC

MPC veya 2-metakriloiloksietil fosforilkolin, biyolojik etkisizliği ile bilinen bir fosforilkolin grubuna sahip organik bir maddedir (Ishihara et al., 2021; Olivieri et al., 2021; Shimizu et al., 2010). Bu özellik mpc'yi protein adsorpsiyonuna, hücre yapışmasına ve kan pıhtılaşmasına karşı dirençli hale getirerek çeşitli biyomedikal uygulamalarda oldukça rağbet görmesini sağlar. MPC polimerinin kullanımı, yumuşak kontak lensler, implant edilebilir kan pompaları, yapay kalça eklemleri ve teşhis sistemleri dahil olmak üzere çok sayıda biyomedikal cihaza ve klinik tedaviye kadar uzanır. Bir çalışmada araştırmacılar, MPC ve bis(trimetilsililoksi) metilsililpropil gliserol metakrilat dahil ederek bir silikon hidrojel sentezlediler. Elde edilen silikon hidrojel, geleneksel yumuşak kontak lens malzemelerine kıyasla iyi elastikiyet, yüksek optik şeffaflık, yüksek oksijen geçirgenliği ve protein adsorpsiyonu için azaltılmış kapasite gibi uygun özellikler sergiledi. Bu, mpc'nin kontak lenslerin ve diğer biyomedikal cihazların performansını ve biyouyumluluğunu geliştirmedeki potansiyelinin altını çizer. Shimizu ve diğ. çapraz bağlı bir polidimetilsiloksan (PDMS) matrisi içinde az miktarda çapraz bağlanan monomer ile 2-metakriloiloksietil fosforilkolinin (MPC) kopolimerize edilmesiyle yüzeyde iç içe geçen bir ağ yapısının oluşumunu başarıyla sağladı. Bu tabakanın kalınlığı mikroskopik kızılötesi spektroskopi kullanılarak yaklaşık 400 µm olarak belirlenmiştir. Oksijen geçirgenliği geleneksel hidrojel kontak lenslere göre daha yüksek olmasına rağmen, işlenmemiş yüzeylerin aksine artan MPC polimer içeriği ile azalma eğilimi göstermiştir. Bu gözlem, yüzeyde kalın bir hidrofilik polimer tabakasının varlığının, gözyaşı sıvısındaki oksijenin bu tabakayı geçmesi gerektiğinden, silikon bazlı malzemenin özelliklerinin etkin bir şekilde gösterilmesini engellediğini ima eder. Bunu ele almak için, poli(MPC) ve poli(bütül metakrilat, BMA) segmentlerinden oluşan amfifilik blok tipi kopolimerlerin moleküler fiksasyonu için şişme-şişme işlemi uygulanabilir. Bu modifikasyon, MPC polimer içeriğinin neden olduğu potansiyel düşüşü azaltırken oksijen geçirgenliğini arttırmayı amaçlamaktadır (Y. Chen et al., 2020).

2.4.5. Hyaluronik Asit Modifiye Hidrojeller

Bu tip kontak lensler doğal CL tipine aittir. Hyaluronik asit (HA), doku mühendisliğindeki önemli rolüyle ödüllendirilen, doğal olarak oluşan bir hidrofilik biyopolimer olarak öne çıkmaktadır (Chang et al., 2021; Dattilo et al., 2023; Weeks et al., 2013). Yüksek biyouyumluluğu, amino asit ve hidroksil gruplarının varlığından kaynaklanmaktadır. Bu özelliklerden yararlanan HA, göz bakımı alanında paha biçilmez olduğunu kanıtlayarak yağlayıcı solüsyonların ve kontak lenslerin geliştirilmesine katkıda bulunuyor. En önemlisi, yüzey morfolojisini koruyan HA modifikasyonları, 12 saate kadar uzun süreli aşınmadan sonra bile kontak lenslerin uzun ömürlü olmasını sağlar. Bunun ötesinde HA, kuru göz problemlerini gidermekten lens materyallerini değiştirmeye ve ilaç verme mekanizmalarını kolaylaştırmaya kadar çok çeşitli oftalmik tedavilere giriyor. Hyaluronik asit, kuru göz semptomlarını hafifletmek için genellikle göz damlalarına dahil edilir ve bu yaklaşım, tıklama reaksiyonları yoluyla silikon hidrojel kontak lenslerin yüzey modifikasyonuna genişletilebilir. Örneğin, proteoglikanlar ve kayganlaştırıcı, kayganlığı arttırmak için silikon hidrojel substratlar üzerinde hareketsiz hale getirilebilir. Bir çalışmada, poli (HEMA-co-TRİS) üzerine, müsinöz bir glikoprotein olan proteoglikan 4, aktif ester kimyası kullanılarak bağlandı ve modifiye edilmemiş substrata kıyasla hidrofiliklikte ve protein adsorpsiyonuna karşı dirençte önemli gelişmelere yol açtı. Son teknoloji araştırmalar, hyaluronik asit ve rekombinant insan proteoglikanı 4'ün birlikte immobilizasyonu ile örneklenen doğal moleküller kullanılarak gelişmiş yüzey modifikasyonlarını araştırmıştır (Kodjikian et al., 2008a). Bu yenilikçi yaklaşım kornea dokusunu taklit eder ve her iki doğal molekülden de sinerjik etkiler yaratması beklenir. Bu iyi araştırılmış sistem, biyouyumluluklarını ve oküler dokularla etkileşimlerini geliştirerek silikon hidrojel kontak lenslerin performansını artırma vaadinde bulunuyor.

2.4.6. Protein İtici Kaplamalar

Kontak lensler genellikle proteinler gözyaşı sıvısında biriktikçe zorluklarla karşılaşır ve bu da mikrobiyal bağlanmayı ve biyofilm gelişimini kolaylaştıran bir protein tabakasının oluşumuna yol açar. Protein emilimi hem mikrobiyal hücre yapışması hem de kullanıcının rahatlığı için önemli sorunlar oluşturur. Bunu ele almak

için, düz yüzeylerde protein adsorpsiyonunu incelemek için hidrojel tabakaları kullanılarak deneyler yapıldı. Poli (etilen glikol) (PEG), 2-Metakriloiloksietil Fosforilkolin (MPC) ve poli (vinil alkol) (PVA) dahil olmak üzere bazı polimerler, protein adsorpsiyonunu azaltma ve lens takmanın uzun süreli konforunu artırma yetenekleri açısından araştırıldı. Bu polimerler, protein adsorpsiyonunda bir azalma göstererek, daha iyi bir aşınma deneyimine katkıda bulundu. Benzer bir çalışmada, gözyaşı filminde doğal olarak bulunan bir polisakkarit olan hyaluronik asit (HA), proteine dirençli özellikleri nedeniyle lenslere dahil edildi. HA'nın lenslere dahil edilmesi, protein adsorpsiyonunu en aza indirmeye, mikrobiyal bağlanma ile ilgili zorlukları çözmeye ve kullanıcı konforunu daha da artırmaya hizmet eder. Hidrofobik malzeme polidimetilsiloksanı (PDMS) hidrofilik ve anyonik yüklü fonksiyonel polisakkaritlerle (PS) kaplayarak yenilikçi bir biyo yüzey oluşturmak için iki aşamalı basit bir işlem tasarlanmıştır. Çeşitli yüzey analitik teknikleri, polisakkaritlerin polietilen (PEI) modifiye yüzeyler üzerinde başarılı bir şekilde birikmesini ve tamamen kaplanmasını doğruladı. Sülfatlanmış fukoidandan oluşan yüzeyler, protein emilimine karşı olağanüstü direnç göstererek insan plazmasına ve *Staphylococcus aureus*'a karşı daha fazla dayanıklılık gösterdi. Bu üstün performans, karboksile hyaluronik asit (HA) yüzeylere ve kontrol modifiye edilmemiş PDMS yüzeylerine kıyasla belirgindi (Mohan et al., 2019)

2.4.7. Biyodan İlham Alan Polimerler

Lenslerin biyolojik kontaminasyonunu etkileyen iki kritik faktör, kullanım süresi ve bireysel hastalara özgü gözyaşı kimyasıdır. Tek kullanımlık SCL'lerin yükselmesiyle birlikte, aşınma süresi konusunda daha fazla inceleme yapılmaktadır; Bununla birlikte, malzemelerin antibiyofouling özellikleri üzerine araştırmalar sınırlı kalmaktadır (Bruinsma et al., 2001; Zhao et al., 2021). Sürekli aşınmış ve uzun süreli kullanılan scl'lerin yüzeyindeki enflamatuar yanıtı ele almak çok önemlidir. Yüzey özelliklerinden etkilenen nötrofil yapışması ve aktivasyonu, enflamatuar yanıtta rol oynar ve bakteriyel yapışmayı engelleyen malzemelere olan ihtiyacı vurgular (Kodjikian et al., 2008b). SCL materyalleri üzerindeki bakteriyel yapışma, potansiyel olarak kornea ülserasyonuna yol açan mikrobiyal keratite doğru ilk adımı işaret eder (Carnt et al., 2017; Moriyama & Hofling-Lima, 2008). Bu nedenle, SCL malzemeleri,

uzun süreli ve sürekli kullanıma elverişli biyoyumluluk ve polimer özelliklerinin yanı sıra antibiyofouling (anti biyolojik kirlilik) özellikleri sergilemelidir. Biyolojik yapılardan ilham alan malzemeler, kirlenmenin önlenmesi ve artan biyoyumluluk için etkili çözümler sunar. Monomerlerden ve polimerlerden türetilen bu malzemeler, hücre zarlarının yapısına göre tasarlanmıştır. Fosfolipit molekülleri ve glikoproteinleri içeren hücre zarı, nano ölçekli biyomalzemeler oluşturmak için ideal bir model görevi görür. Sentetik fosfolipit monomerleri ve polimerleri, hidrofobik alkil zincirleri ve hidrofilik polar grupları içeren fosfatidilkolinin kimyasal yapısını taklit eder. Ishihara ve diğerleri. (Goda et al., 2010; Goda & Ishihara, 2006) işbirlikçiler, metakrilat ve 2-metakriloyloksietil fosforilkolin (MPC) olarak bilinen bir fosforilkolin baş grubunu içeren bir fosfolipid monomerini başarıyla geliştirdiler. MPC polimerleri, biyodan ilham alan fosfolipid polimer kimyasında ve endüstrisinde çok önemli bir unsur olarak ortaya çıkmış ve çeşitli yüzey modifikasyon tekniklerinde uygulama bulmuştur. Protein adsorpsiyonunun azaltılmasının arkasındaki mekanizma, fosfolipit polimer kaplama yüzeyinin su yapısına bağlıdır. Fosfolipit polimerin hem bağlı hem de serbest su molekülleri bakımından zengin yüzeyi, spesifik olmayan protein adsorpsiyonuna direnerek biyomolekül stabilizasyonuna katkıda bulunur. Bu özelliklerden yararlanan MPC polimeri, kontak lenslerde uzun süreli aşınma için oksijen geçirgenliğini ve biyoyumluluğu arttırmada değerli olduğunu kanıtlar. Sonuç olarak, MPC polimeri ister hidrojel malzeme ister yüzey modifikasyon polimeri olsun, yeni nesil kontak lens biyomalzemelerine dahil edilmek için umut verici bir adaydır.

2.4.8. Polidimetilsiloksan (PDMS)

PDMS, elastik, şeffaf, biyoyumlu ve hava geçirgen bir polimer organosilikon bileşiği türüdür (J.-S. Chen et al., 2017). Biyoyumluluk, biyolojik dokularla yakın temas gerektiren senaryolarda kullanılmasını sağlayan pdms'nin önemli bir özelliğidir. PDMS, en yaygın kullanılan silikon bazlı polimerdir. Mevcut akıllı kontak lensler genellikle substrat veya kapak malzemesi olarak PDMS kullanılarak üretilir. Kontak lens malzemesi olarak PDMS, sensörü sadece kavisli korneanın üzerine uyumlu bir şekilde yerleştirmekle kalmaz, aynı zamanda kullanıcının normal görüşünü de korur. Benzer bir çalışmada, HEMA bazlı hidrojellerin oksijen geçirgenliğini arttırmak için benzersiz bir strateji kullanılmıştır. Pdms'yi doğrudan polimer zincirine entegre etmek

yerine, bir sentez yöntemi, poli (dimetilsiloksan) dialkanolün (PDMS diol) hidroliz ve yoğunlaşma yoluyla tetraetil ortosilikat (TEOS) ile reaksiyona sokulmasını içerir ve sol-jel işlemi yoluyla silikon nanopartiküllerin (sınp'ler) oluşmasına neden olur. Daha sonra, bu sınp'ler HEMA ve 1-vinil-2-pirolidinondan (NVP) oluşan hidrojelere dahil edilir. Üretilen hidrojeller, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Raman spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM), dinamik ışık saçılımı (DLS), denge suyu içeriği (EWC), oksijen geçirgenliği (Dk), optik saydamlık, mekanik mukavemet ve temas açısı ölçümleri. Yenilik, HEMA hidrojellerinin hidrofilik ve ıslanabilir özelliklerini korurken oksijen geçirgenliğini arttırmayı amaçlayan geleneksel PDMS birleşmesinden ayrılan silikon nanopartiküllerin Kullanımında Yatmaktadır (N.-P.-D. Tran & Yang, 2020).

2.4.9. Hibrit Kontak Lensler

Hibrit kontak lensler, silikon hidrojelden oluşan çevresel bir bağlantı bölgesi ile çevrelenmiş, sert gaz geçirgen (RGP) malzemeden üretilmiş merkezi bir optik bölgeye sahiptir. 14,5 mm çapındaki bu lensler, yumuşak lenslerle ilişkili konforun ve RGP lenslerin sağladığı üstün optiklerin bir karışımını sunar. 2019 itibariyle sınırlı sayıda şirket tarafından tanıtılmalarına rağmen, hibrit lensler yaygın bir popülerlik kazanmadı. Fungal keratit, görme kaybına neden olabilen ve gelişmekte olan ülkelerde sıklıkla ihmal edilen bir göz hastalığıdır. Geleneksel tedaviler etkisiz olabilirken, göz içi enjeksiyonları yan etkilere neden olabilir. Bu nedenle araştırmacılar, kuaternize kitosan, gümüş nanopartiküller ve grafen oksit içeren hibrit hidrojel ile aşılanmış bir kontak lens geliştirdiler. Bu karışım hem antibakteriyel hem de antifungal özelliklere sahiptir. Hidrojel, çapraz bağlanan grafen oksit ve kuaternize kitosan ile güçlendirilir. Kontak lens özellikle antifungal ilaç vorikonazolü barındırabilir ve zamanla serbest bırakabilir. Deneyler, vorikonazol emdirilmiş kontak lenslerin mantar enfeksiyonlarıyla etkili bir şekilde savaştığını ve enfekte farelerde tedavi sonuçlarını iyileştirdiğini göstermiştir. Bu bulgular, hidrojel bazlı bir ilaç dağıtım sisteminin kontak lenslerde mantar keratitini etkili bir şekilde yönetmek için umut verici bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamaktadır (Huang et al., 2016).

2.4.10. Nanomalzeme Bazlı (Nano Kolloidler)

Bu bölümde, petekleri andıran kafes yapılarını kapsayan bir karbon bazlı nanomalzemeler (cnm'ler) spektrumu araştırılmıştır (G.-Z. Chen et al., 2014b; Sarac et al., 2024). Anahtar örnekler ther arasında karbon nanotüpler (cnt'ler), grafen (ilgili malzemelerin yanı sıra grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksit (rGO) ve grafit bulunur. Karbon bazlı nanomalzemeler, düşük toksisite, yüksek termal ve kimyasal stabilite, olağanüstü elektriksel iletkenlik ve etkileyici mekanik özellikler ile karakterize edilen dikkate değer özellikler sergiler. Karbon nanomalzemelerin kontak lenslere entegrasyonu, artan mekanik mukavemet, elektriksel iletkenlik, artan oksijen geçirgenliği, antibakteriyel özellikler, gelişmiş kullanım konforu ve özelleştirilebilir optik özellikler dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar (Koruga et al., 2013b). Bu faydalar, kontak lenslerin dayanıklılığını ve esnekliğini güçlendirmeye, fizyolojik parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesini kolaylaştırmaya, hipoksi ile ilgili sorunları önlemeye, enfeksiyon risklerini azaltmaya ve görme düzeltmesini iyileştirmeye katkıda bulunur. Bununla birlikte, biyoyumluluk, üretim süreçleri ve uzun vadeli güvenlik gibi hususlara dikkat edilmesini gerektiren zorluklar devam etmektedir. Sonuç olarak, devam eden araştırmalar, karbon nano bazlı kontak lenslerin sunduğu potansiyel avantajları kapsamlı bir şekilde anlamaya ve bunlardan yararlanmaya adanmıştır. Organik-inorganik nanomalzemeler olarak bilinen hem organik hem de inorganik bileşenleri karıştıran malzemeler, kontak lenslerde gelişmiş özellikler sağlar. Örneğin silikon hidrojeller, organik hidrojel malzemelerini inorganik silikonla birleştirilerek iyileştirilmiş oksijen geçirgenliğinin yanı sıra daha fazla konfor sunar. Nanokompozit hidrojeller ise inorganik nanoparçacıkları organik polimer matrisine entegre ederek mekanik özellikleri yükseltir. Bu entegrasyon sadece gücü arttırmakla kalmaz, aynı zamanda esnekliği de korur. Polimer-nanoparçacık kompozitleri alanında, inorganik nanoparçacıkların dahil edilmesi, enfeksiyon riskini azaltan antibakteriyel özellikler sunar. Ayrıca, organik ve inorganik elementler birleştirilerek üretilen hibrit malzemeler, ilaç dağıtımı gibi özel uygulamalar için uyarlanabilir.

2.5. MXENE

Esneklik, iletkenlik ve dayanıklılık gibi benzersiz özellik kombinasyonlarıyla MXenler, giyilebilir malzemelerde geniş bir uygulama yelpazesi için önemli umut vaat etmektedir. Araştırmacılar, MXenleri kumaşlara ve diğer giyilebilir yüzeylere dahil ederek algılama, enerji depolama ve termal yönetim gibi işlevleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Örneğin, MXene kaplı tekstiller, kalp atış hızı ve vücut ısı gibi fizyolojik parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesini sağlayarak sağlık ve fitness takibi için gelişmiş akıllı giysilerin önünü açabilir. Ek olarak, MXene bazlı kaplamalar, giyilebilir elektroniklerin dayanıklılığını ve iletkenliğini artırarak çeşitli çevre koşullarında güvenilir performans sağlayabilir. Ayrıca, MXene'in hafif yapısı, onları giyilebilir cihazlara entegre etmek, hantallığı en aza indirmek ve kullanıcı konforunu en üst düzeye çıkarmak için ideal kılar. Bu alandaki araştırmalar gelişmeye devam ettikçe, MXene, tüketici elektroniğinden tıbbi cihazlara kadar çeşitli uygulamalar için yenilikçi çözümler sunarak giyilebilir teknoloji alanında devrim yaratmaya hazırlanıyor. Benzer bir çalışmada, giyilebilir sağlık hizmetlerinin izlenmesi için tasarlanmış, $138,8 \text{ kPa}^{-1}$ 'e kadar yüksek hassasiyet ve hızlı yanıt ve geri kazanım hızları sunan sağlam ve esnek bir MXene / polidopamin (PDA) kompozit film tabanlı basınç sensörü sunulmaktadır (GÜRBÜZ & ÇİFTÇİ Fatih, 2024). Sensör, sağlıkla ilgili çeşitli fizyolojik sinyallerin gerçek zamanlı ve hassas ölçümlerini taşınabilir ve giyilebilir bir biçimde yapabilme yeteneğini gösterir. Uygulamalar, sağlık uyarı sistemlerini, doğru nabız algılamayı, ses tanımayı, yüz ifadesi analizini ve akıllı kontrol işlevlerini kapsar (Han et al., 2023).

Taşınabilir MXene tabanlı araştırmalar alanında, yerinde yetiştirilen TiO_2 ve kısa peptitlerle birleştirilmiş $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ kullanılarak yenilikçi bir nano platform kablosuz maske tanıtıldı. Bu entegrasyon, ışık destekli yanıt kalibrasyonunu kolaylaştıran TiO_2 –MXene arayüzleri ile aseton duyarlılığını ve seçiciliğini artırmaktadır. Gelişmiş giyilebilir nefes izleme için, kompakt ve esnek bir algılama etiketi, piyasada bulunan bir yüz maskesine sorunsuz bir şekilde entegre edilerek uygun nefes alkol konsantrasyonu (BrAC) tespiti ve kablosuz veri iletimi sağlar. Hiyerarşik olarak tasarlanmış filtreleme algılama kalibrasyon iletim sistemi, nefeste $0,31 \text{ ppm'ye}$ (milyonda parça) kadar düşük BrAC seviyelerinin algılanmasını sağlar. Vücut içi

solunum testleri, yüz maskesinin lipid metabolizmasını dinamik olarak izlemedeki etkinliğini doğrulayarak diyet yapanlar, sporcular ve fitness meraklıları için diyet ve egzersiz aktivitelerini düzenlemede değerli bilgiler sunar. Önerilen giyilebilir platform, günlük lipid metabolizması yönetimi ve nefes analizi için yeni olanaklar sunarak, sağlıklarını ve refahlarını optimize etmek isteyen bireyler için çok yönlü bir araç sağlar (X. Li et al., 2023).

Esnek süper kapasitörler (FSC'ler), giyilebilir elektronikler için taşınabilir güç kaynakları olarak büyük ilgi görmüştür. Giyilebilir Fsc'lerde elektrotların ve elektrolitlerin biyouyumluluğu çok önemli olsa da bu yönlerle ilgili araştırmalar hala erken aşamalarında. Aktif elektrot malzemesi olarak MXene Ti_3C_2 nano tabakalar ve polipirol-karboksimetilselüloz nanosfer bileşimi ($Ti_3C_2 @ PPy-CMC$) kullanan ve elektrolit görevi gören ter içeren giyilebilir bir FSC geliştirilmiş (GÜRBÜZ & ÇİFTÇİ Fatih, 2024). İncelenen makalede, $Ti_3C_2@PPy-CMC$ FSC'nin elektrokimyasal performansı, olağanüstü özgül kapasitans, güç yoğunluğu, döngü stabilitesi ve bükülme stabilitesini ortaya çıkaran yapay bir ter çözeltisi kullanılarak sistematik olarak değerlendirilmiş (GÜRBÜZ & ÇİFTÇİ Fatih, 2024). $Ti_3C_2@PPy-CMC$ kompozitinin sergilediği olağanüstü elektrokimyasal performans, giyilebilir enerji depolama cihazlarındaki potansiyel yeteneklerinin ve biyouyumluluğunun altını çizerek giyilebilir elektronik alanındaki gelişmelerin önünü açmaktadır (Vaghasiya et al., 2022).

MXene'ler, kontak lenslerde kullanılmak üzere umut vadeden malzemeler arasında yer almaktadır. MXene'lerin özellikleri, kontak lenslerin performansını ve işlevselliğini artırmak için ideal bir tercih olduğunu yapılan araştırmalarda göstermektedir.

Elektronik Kontak Lensler: MXene'lerin yüksek elektriksel iletkenliği, elektronik kontak lenslerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu lensler, göz hareketlerini takip eden veya göz içi basıncı ölçen sensörlerle donatılarak, glokom gibi göz hastalıklarının erken teşhisi ve takibi mümkün olabilmektedir.

Antimikrobiyal Özellikler: MXene'lerin yüzeyi, antibakteriyel özellikler kazandırılarak lenslerin enfeksiyon riskini azaltabilmektedir. Özellikle silikon hidrojel lenslerde, MXene kaplamalar sayesinde bakteriyel büyüme engellenebilir ve göz sağlığı korunabilmektedir.

Geliştirilmiş Oksijen Geçirgenliği: MXene'lerin yüksek oksijen geçirgenliği, kontak lenslerin uzun süreli kullanımında bile göz sağlığını korumasını sağlar. Bu, kontak lens kullanıcıları için daha fazla konfor ve güvenlik sunar.

Gözyaşı Analizi: MXene'ler, gözyaşı sıvısındaki biyomolekülleri algılayabilen sensörler olarak kullanılması için araştırmalar yapılmaktadır. Bu sayede, kontak lensler aracılığıyla diyabet veya kuru göz gibi durumların teşhisi ve takibi yapılabilir.

Konfor ve Biyoyumluluk: MXene'lerin mekanik dayanıklılığı ve esnekliği, kontak lenslerin konforunu artırabilmektedir. Ayrıca, yüzey modifikasyonları ile biyoyumluluk özellikleri geliştirilebilir, bu da lenslerin gözle daha uyumlu hale gelmesini sağlar. MXene'ler, yüksek oksijen geçirgenliği ve elektriksel iletkenlik gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu araştırmada da bu özellikler kullanılarak, kontak lenslerin performansını artırılmış ve daha işlevsel hale getirilmiştir. MXene'ler, göz sağlığını izlemek için sensör olarak kullanılabilir. Bu, göz hastalıklarının erken teşhisi ve takibi için önemli bir avantajdır. MXene'lerin esnekliği ve mekanik dayanıklılığı, kontak lenslerin konforunu artırır ve uzun süreli kullanıma uygun hale getirir. MXene kaplamalar, bakteriyel enfeksiyon riskini azaltarak göz sağlığını korur.

Nanoteknolojinin sunduğu yenilikçi malzemelerden biri olan MXene'ler, kontak lens teknolojisinde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Yüksek performans özellikleri, gelişmiş sağlık izleme yetenekleri ve artan konfor ile MXene'ler, kontak lenslerin geleceğinde önemli bir rol oynayabilir. Gelecekte, MXene tabanlı kontak lenslerin daha yaygın kullanımı ile göz sağlığının korunması ve iyileştirilmesi mümkün olacaktır.

2.5.1. MXene Sentezleme Yöntemi

MAX fazdan pul pul döküldükten sonra, MXene her zaman F, OH ve O grupları gibi yüzey grupları ile sonlandırılır. Kuru veya sulu ortamda depolandıktan sonra F sonlandırmalarının yerini OH grupları alacağı için O- ve / veya OH ile sonlandırılmış MXene türlerinin en kararlı olduğu öne sürülmüştür (Jin et al., 2023; H. Liu et al., 2022; Peng et al., 2019).

2011 yılında MXenlerin ilk keşfinden bu yana, iki boyutlu (2B) metal karbürler / nitrürler olan MXenler, 2B katmanlı nanoyapıları, geniş özgül yüzey alanları, ultra yüksek iletkenlikleri, hidrofiliklikleri, fonksiyonel yüzey gruplarının bağlanabilirliği

ve mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle ilgi kaynağı olmaya devam etmektedir (Amrillah et al., 2022; Deysher et al., 2020; Iqbal et al., 2020; Murali et al., 2021). MAX faz bileşikleri ailesi $Mn+1AX_n$ üçlü karbürler ve $n = 1, 2$ veya 3 olan nitrürlerdir. MAX fazda M, A ve X geçiş metalini, A grubu elemanı ve çoğunlukla (IIIA ve IVA grubu elemanları) temsil eder ve X sırasıyla C ve/veya N elemanlarını temsil eder. M Sc, Ti, V, Cr, Mn, Mo vb. içerir. Geçiş metalleri olarak. Grup A, IIIA-VA elementlerini içerir Al, Si, Ga, Ge, süre X oluşur C, N veya bunların bir kombinasyonu. Şu anda, 50'den fazlası M₂AX (Ti₂AlC, Ti₂AlN, V₂GeC, vb.) Olarak bilinen toplam 70'ten fazla maksimum faz vardır.) fazlar, beş M₃AX₂ (Ti₃SiC₂, Ti₃GeC₂, Ti₃AlC₂, Ti₃SnC₂, Ta₃AlC₂) faz ve dört M₄AX₃ (Nb₄AlC₃, V₄AlC₃, Ti₄GaC₃) faz (Deysher et al., 2020). Araştırmacılar ayrıca OH gruplarının yüksek sıcaklık işlemleri ve / veya metal adsorpsiyon işlemleri yoluyla O sonlandırmalarına dönüştürülebileceğini buldular. Ek olarak, O-sonlandırılmış MXene, Mg, Ca, Al veya diğer metallerle temas ettiğinde MXene ayrışabilir (Wei, Soomro, et al., 2021; K. Xie et al., 2023; X. Xie & Zhang, 2020). İlk tahminler, yüzey gruplarının üç komşu C atomu arasındaki oyuk bölgelere yerleştirilme olasılığının daha yüksek olduğunu gösterdi. Bununla birlikte, daha sonraki çalışmalar, yüzey gruplarının konumlarının ve yönelimlerinin beklenenden daha karmaşık olduğunu göstermiştir. Bu malzeme Gelecekteki modellemesi, sistemin karmaşık yapısını daha doğru yansıtmak için belirli MXenler içindeki farklı yüzey gruplarının bir arada bulunmasını ve rastgele adsorpsiyonunu barındırmak için gereklidir. Van der Waals kuvvetleri ve / veya hidrojen bağı gibi ara katman etkileşimleri de dikkate alınmalıdır, çünkü gerçekte çok katmanlı istifleme sıklıkla meydana gelir (Bae et al., 2021; Khazaei et al., 2017, 2019; X. Tang et al., 2018; Y. Tang et al., 2022).

Seramikler gibi maksimum fazlar sert ve elastik olarak serttir, hafiftir, yüksek erime noktalarına, yüksek mukavemete ve yüksek sıcaklıkta düşük genleşme katsayısına sahip korozyona dayanıklıdır ve iyi direnç gösterir. Bu nedenle maksimum fazlar çok çeşitli uygulamalarda kullanışlıdır. Yanmalı motorlarda, roketlerde ve ısıtma elemanlarında bileşenler olarak faydalı dökme yapısal malzemeler olarak yüksek basınç ve sıcaklıkta sinterleme ile sentezlenebilir veya fiziksel buhar biriktirme (tek tek atomik katmanların püskürtülmesi) ile yüzey kaplamaları için ince filmler halinde biriktirilebilirler. Bu yüzey kaplamaları kesici takımlar, elektrik anahtarları ve

difüzyon bariyerleri gibi uygulamalarda kullanılır (Chirica et al., 2021; Khazaei et al., 2018; Zhou et al., 2021).

MXene malzemeleri olarak adlandırılan geçiş metali karbürleri, nitrürleri veya karbonitritleri, öncelikle geniş uygulama yelpazeleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Noor et al., 2023; Tran et al., 2023; Won et al., 2023)(Noor et al., 2023; Tran et al., 2023; Won et al., 2023). Başlangıçta Naguib et al tarafından yapılan bir çalışmada tanıtıldı (Naguib et al., 2021). Bu yapılar, maksimum fazların seçici aşındırılmasıyla sentezlenir ve genel kimyasal formülü takip eder. $M_n + 1xN$ ($n = 1-3$), burada M bir geçiş metalini temsil eder (örneğin, Sc, Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta) ve X karbonu ifade eder (C) veya azot (N) atomları. Araştırmalarında (Naguib et al., 2021) oda asit sıcaklığında sulu hidroflorik kullanılarak, P63 / mmc uzay grubu içinde yer alan katmanlı altıgen üçlü karbür Ti_3AlC_2 'den Al atomlarının seçici aşındırılmasıyla sentezlenen geçiş metali karbür (MXene) yapısı olarak Ti_3C_2 kullanıldı. Nispeten sınırlı atomik katman sayıları göz önüne alındığında, tek bir MXene yığınının kalınlığı genellikle 1 nm'nin altında kalırken, mxenlerin yanal boyutları, ilgili malzemelerin hazırlama metodolojisine bağlı olarak nanometreden mikrometreye değişir. Ek olarak, mxenler genellikle -O (oksijen), -OH (hidroksil) veya -F (flor) gibi yüzey fonksiyonel gruplarının bolluğunu kapsar. Hem karmaşık metal atom katmanlarının hem de çok yönlü fonksiyonel grupların varlığında, MXene yapıları, geçiş metali karbürlerin / nitrürlerin metalik iletkenliğini, hidroksil / oksijen / flor ile sonlandırılmış yüzeylerde bulunan hidrofilik özelliklerle ustaca birleştirir. Esasen, "iletken kil" e benzer davranışlar sergilerler. Bu yapılar, sonlandırma gruplarıyla birlikte $M_n + 1X_nT_x$ olarak formüle edilir ve T, sonlandırılmış yüzey fonksiyonel gruplarını, yani -O (oksijen), -OH (hidroksil) ve -F'yi (flor) temsil eder. Sonuç olarak, bu malzemeler geçiş metallerinin elektriksel iletkenlik gibi üstün özelliklerini miras alırken, karbon, nitrür ve karbonitrür gibi geniş kategorilerdeki fonksiyonel sonlandırma grupları aracılığıyla hidrofilik özelliklerin ortaya çıkmasını da kolaylaştırırlar (Shimada et al., 2022; Y. Zhang et al., 2022).

Mxenlerin 2011 yılında keşfedilmesinden sonra, MAX fazları kazımak için çeşitli kimyasal ve fiziksel yöntemlerle sentezleri yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Mxenlerin farklı yapılarını ve benzersiz özelliklerini elde etmek için farklı sentez stratejileri geliştirilmiştir. MAX fazda bulunan MX bağları genellikle yüksek bağ

mukavemetine sahip kovalent ve iyonik bağlardır. Bununla birlikte, M-A bağları genellikle metalik bağlardır ve daha zayıf bir bağ mukavemetine sahiptir. Bu nedenle, aşındırma olarak uygun aşındırıcılar kullanılarak "A" katmanlarının MAX fazda seçici olarak çıkarılması mümkündür. Erken (GÜRBÜZ & ÇİFTÇİ Fatih, 2024) çalışmalarında, Ti_3AlC_2 'den Al katmanlarını çıkarmak için HF kullanıldı. O zamandan beri, doğrudan veya dolaylı HF bazlı sentezlerin yanı sıra alkali ve erimiş tuz aşındırma yöntemleri gibi birçok işlem geliştirilmiştir. MXenlerin sentez yöntemleri ve karşılaştırmaları metot ve yöntem başlığı altında detaylı olarak anlatılmıştır.

2.5.1.1. Hidroflorik Asit Aşındırma

Hidroflorik asit (HF) aşındırma, Al bazlı MAX fazdan MXene elde etmek için yaygın olarak kullanılır (Naguib et al., 2021). İlk olarak, ağırlıkça %50 HF asit kullanılarak Al tabakasının MAX fazdan kazınmasıyla MXENLER elde edildi. MAX faz tozunu belirli bir konsantrasyonda HF sulu çözeltisine batırdıktan ve oda sıcaklığında belirli bir süre karıştırdıktan sonra, elde edilen katılar santrifüjleme veya filtreleme ile süpernatandan ayrılır ve daha sonra süspansiyon zayıf asidik olana kadar deiyonize su ile yıkanır ($pH = 4-6$). Son olarak, katılar MXene tozu elde etmek için kurutulur. MAX fazlar reaksiyona göre HF tarafından kazınır. Elde edilen MXene tabakaları, izopropil amin, tetra propil amonyum hidroksit (TPAOH) veya tetra-bütill-amonyum hidroksit (TBAOH) gibi kimyasallarla delamine edilir ve ardından sonikasyon, mxen ara tabaka mesafesini artırır. HF aşındırmanın avantajları, Al tabakasının seçici aşındırılmasında etkili olması ve MXene katmanlarının hızlı ve kolay bir şekilde ayrılmasına izin vermesidir. HF'nin güçlü aşındırıcı özellikleri, aşındırma koşulları iyi kontrol edilmezse kazınmış MXene'yi aşındırabilir ve MXene yüzeyine zarar verebilir. HF aynı zamanda zararlı bir maddedir ve HF aşındırma yönteminin uygulanmasını sınırlar (Cockreham et al., 2022; Gong et al., 2022).

2.5.1.2. Florür Tuzları ile Aşındırma

HF'nin tehlikeleri nedeniyle aşındırma işleminde HF yerine HCl asidi ve florür tuzları (Denklem 1) arasında bir reaksiyon kullanarak HF asidini yerinde sentezleyerek aşındırma için daha güvenli bir yol önerdi (Ghidiu et al., 2014). Önceden hazırlanmış

bir HCl asit ve LiF tuzu çözeltisine MAX tozu ekleyerek iki boyutlu MXene elde ettiler. Bu yöntem, daha tehlikeli hf'yi doğrudan eklemek yerine hcl'yi LiF, NaF ve KF gibi florür tuzlarıyla reaksiyona sokarak daha güvenli bir HF üretmeyi amaçlar.



Florür tuzu aşındırmanın bir başka faydası da florür tuzu iyonlarının MXene'lerde yerinde interkalasyonudur. Sonuç olarak, MXenlerin ara katman mesafesi, HF ile kazınmış mxenlerinkinden daha büyüktür. Bu, daha hızlı iyon interkalasyon kinetiğine izin verir ve yedekli kapasitif aktif bölgeler sunar. Ayrıca mutlak asitlerin (HCl, H₂SO₄) LiF ile karıştırılmasıyla yüksek kaliteli çok katmanlı MXene elde edilebilir.

2.5.1.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

CVD, genellikle 2D nanosheets üretiminde benimsenen flor içermeyen koşullar altında aşındırma yöntemlerinden biridir (C. Xu et al., 2015). CVD ile geniş alanlı, yüksek kaliteli 2D ultra ince α -Mo₂C kristalleri üretti. Karşılık gelen CVD büyüme koşullarının değiştirilmesi, α -Mo₂C'nin 2B yapısını ayarlayabilir ve yüksek sıcaklık kalınlık büyümesine katkıda bulunur ve düşük sıcaklık yanal boyuta katkıda bulunur growth. Özellikle, CVD aşındırma ile elde edilen α -Mo₂C kristalleri, ortam koşullarında süper elektriksel iletkenliğe, mükemmel termal ve kimyasal stabiliteye sahiptir. CVD büyüme yöntemi çok yönlüdür ve elde edilen MXene büyük enine boyutlar sergiler. Çok çeşitli yüksek kaliteli 2D MXenlerin üretilmesine olanak tanıyan bu çok yönlü strateji, MXenlerin gelecekteki araştırma geliştirmesi için daha fazla olanak sağlamıştır (Manawi et al., 2018; D. Wang et al., 2023).

2.5.1.4. Alkali Aşındırma

Asidik çözelti kullanılarak MXene preparasyonu için protonları ve florür iyonlarını aşındırmak önemlidir. Esas olarak toksik doğası ve süper kapasitörler gibi uygulamalarda MXENİN performansı için elverişsiz tek bağ F gruplarının varlığı

nedeniyle HF ile ilişkili zorluklar göz önüne alındığında, flor içermeyen yollar kullanılarak yeni yöntemler geliştirilmiştir(Xuan et al., 2016). Alüminyumun ağırlıkça % 20-30 HF ve tetrametilamonyum hidroksit kullanılarak maksimum fazdan ayrılmasını gerçekleştirdi. Ancak bu uygulama ile MXene verimi çok düşüktü. Alkali aşındırma işleminin, geliştirilmiş ara katman aralığı ve azaltılmış tek bağ F sonlandırmaları sağlayan bazı avantajları vardır, MXene tabakalarının sentezi için daha fazla delaminasyon gereklidir (Wei, Zhang, et al., 2021).

2.5.1.5. Erimiş Tuz Aşındırma

Günümüzde karbürler (Ti_3AlC_2) ve karbonitritler (Ti_3AlCN) en çok sentezlenen MXen malzemeleridir ve çok az sayıda nitrür MXEN de sentezlenmektedir. Kimyasal sıvı faz yöntemi kullanılarak, MXenler nitrür maksimum fazından hazırlanamaz. Genel olarak, bir malzemenin oluşum enerjisi düşükse, yapısal stabilitesi düşük olacaktır ve bir malzemenin oluşum enerjisi yüksekse, hazırlanması kolay değildir. Teorik hesaplamalar, Kalay + 1nn'nin Kalay + 1cn'den daha düşük polimerizasyon enerjisine ve daha yüksek oluşum enerjisine sahip olduğunu göstermiştir. Bu, nitrürün maksimum fazındaki MX tabakası ile Al atom tabakası arasındaki bağ kuvvetinin daha önemli olduğunu ve M-Al bağını kırmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç olduğunu gösterir. Kalay + 1Nn, düşük stabilitesi nedeniyle doğrudan HF içinde çözülebilir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, nitrür bazlı MXen'i geleneksel yöntemlerin dışında sentezlemek için erimiş tuz aşındırma yaklaşımı kullanıldı. Bu işlemde KF, NaF, LiF ve Ti_4AlN_3 gibi bir toz karışımı atıl bir atmosferde çok yüksek bir sıcaklığa ısıtılır. Florür tuzu (KF, NaF, LiF) eritilir, ti_4aln_3 'teki Al tabakası kazınır ve ürün, artık Ti_4AlN_3 , tozu ve form katmanlı metal nitrür ($Ti_4N_3T_x$) MXenini çıkarmak için TBAOH ile kaplanır. Erimiş tuz aşındırma yöntemi esas olarak sıcaklık ve atmosfer korumasına bağlıdır. Atmosfer herhangi bir koruma olmadan havada ısıtılırsa veya sıcaklık çok yüksekse, ürün kübik faz yapısı olarak elde edilebilir (L. Liu et al., 2022; X. Wang et al., 2023).

2.5.2. MXenlerin İnterkalasyonu ve Delaminasyonu

Tabakalı malzemelerin tabakalar arasında çeşitli iyonlar, moleküller ve polimerler tarafından interkalasyona ve delaminasyona interkalasyon ve delaminasyon

denir (J. Li et al., 2021; K. R. G. Lim et al., 2022). Maksimum fazdan elde edilen m xenler bir akordeon gibi istiflenir. Katman aralığını artırarak, katmanlar arasındaki kuvvetler zayıflatılarak istifleme sorunu ortadan kalkar. Tek katmanlı MXene tabakaları elde etmek için interkalasyon ve delaminasyon önemlidir. Yığılmış m xenlere kıyasla, tek veya birkaç katmanlı MXenler, yüksek yüzey alanı, daha iyi hidrofiliklik ve elektrokimyasal aktivite gibi özelliklerde daha iyidir (Rajavel et al., 2019; T. Zhang et al., 2017).

Bir interkalasyon işleminden sonra yumuşak bir sonikasyon, çok katmanlı yapıların tek veya birkaç katmana ayrılmasına yol açabilir, ancak ultra sonikasyon, MXene pullarının kusurlarını arttırır. Bununla birlikte, hidroklorik asit (HCl) içinde çözülmüş KF, NaF veya LiF gibi florür tuzları kullanıldığında, aşındırma işlemi sırasında ek sonikasyon veya interkalasyon gerekli değildir. Delaminasyon, florür tuzlarındaki katyonlar MXene katmanlarına karıştıkça aşındırma ile eşzamanlı olarak gerçekleşir (T. Zhang et al., 2017).

Çok katmanlı Ti_3C_2Tx 'i delaminasyon yöntemiyle sentezlemek için Ti_3C_2Tx katmanlarını doldurmak ve genişletmek için interkalatör olarak Li^+ iyonları kullanıldı ve karşılık gelen pul pul dökülme verimi ve kolloidal konsantrasyonun sırasıyla % 45 ve 2 mg mL⁻¹ olduğu bildirildi. Bu tipik interkalasyon-pul pul dökülme stratejilerinde ultrason kullanımı esastır (C. (John) Zhang et al., 2016). Ultrasonik tedavilerin MXenler üzerindeki olumsuz yönü, tek tabakalı MXenlerin yanal boyutunu azaltan MXenlerin bazal düzlem kusurlarının oluşmasıdır. Bu, MXene bazlı kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliğinde bir azalmaya yol açar (Hart et al., 2019). Delaminasyon yöntemlerindeki bu olumsuzluk, ultrasonik işlem gerektirmeyen ve yüksek MXene verimi sağlayan yöntemler geliştirilerek aşılabılır. MXene verimliliğini artırmaya yönelik bir çalışmada, MXene katmanları üretmek için minimum yoğun katman delaminasyonu (HAFİF) yöntemi geliştirilerek daha az kusur ve daha büyük katmanlar elde edildi (Alhabeb et al., 2017). HAFİF yöntemin delaminasyon yöntemine katkısı, çok katmanlı MXenlerin delaminasyonu için sonikasyona alternatif olarak manuel ajitasyonun kullanılmasıdır. Bu yöntem, özellikle elektronikte yüksek kaliteli büyük pullar gerektiren çalışmalar / uygulamalar için MXene malzemelerini hazırlamanın baskın bir yolu haline gelmiştir (Anasori et al., 2015; Yuan et al., 2022).

MXenler, özellikle enerji depolama uygulamaları alanında, benzersiz yapısal ve özellik özelliklerine atfedilebilecek olağanüstü yetenekler sergilerler (Hart et al., 2019). Araştırmalar, şarj ve deşarj sırasında MXene tabakaları arasındaki elektrolit katyonlarının interkalasyonunun ve deinterkalasyonunun, malzemenin yüksek kapasitansında çok önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur (Hart et al., 2019; J. Li et al., 2020; J. Xu et al., 2021). Spesifik olarak, çeşitli tuz çözeltilerine Ti_3C_2TX 'in eklenmesi genellikle interkalasyonu tetikler, bu da katyon katmanlarında değişikliklere ve ardından Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi kırınım modellerinde düşümlere yol açar. MXenlere özgü hızlı elektron taşıma özelliklerinden yararlanarak, süperkapasitör uygulamaları için mükemmel adaylar olarak kabul edilirler. Elektrokimyasal Çift Katmanlı Kapasitörler (edlc'ler) ve kukla kapasitörler farklı yük depolama mekanizmaları sergiler (C. Wang et al., 2020). Bununla birlikte, sözde kapasitörler söz konusu olduğunda, sulu çözeltilerde iyon interkalasyonu yoluyla MXene katmanları kullanılarak yük depolaması kolaylaştırılır. Bu süreçte, farklı iyonlar, MXene katmanları içinde tersine çevrilebilir şekilde iç içe geçerek, MXene yüzeyindeki elektrokimyasal olarak aktif bölgeleri işgal ederek enerji depolamasına katkıda bulunur (J. Li et al., 2021; Sobyra et al., 2021). Araştırma ilerledikçe, MXene'in yük depolama mekanizmalarının ayrıntılı olarak anlaşılması, enerji depolama cihazlarındaki optimizasyonlarını ve uygulamalarını bilgilendirmeye devam ederek, enerji depolama verimliliğini ve performansını artırmak için umut verici beklentiler sunuyor.

2.6. KİTOSAN (KS)

Kitosan (KS, Glukozamin (2-amino-2-deoksi-D-glukoz, $(C_6H_{11}NO_4)_n$)), doğal olarak oluşan bir polisakkarittir ve kitosan, kitin adı verilen bir başka doğal polisakkaritin deasetilasyonu yoluyla elde edilir. Kitin, karides ve yengeç gibi kabuklu deniz hayvanlarının dış iskeletlerinde bol miktarda bulunur. Kitosan'ın kimyasal yapısı, kısmen deasetillenen kitin polimerlerinden oluşur. Bir kitosan zinciri, β -(1→4) bağları ile bağlanmış D-glukozamin (GlcN) birimlerinden ve az miktarda N-asetil-D-glukozamin (GlcNAc) birimlerinden oluşur.

Elektrospinning, polimer çözeltilerinden veya eriyiklerinden nanofiber üretmek için kullanılan bir tekniktir. KS, biyo-uyumlu ve biyobozunur olduğu için

tıbbi ve biyomedikal uygulamalarda güvenle kullanılabilir. Anti-bakteriyel Özellikler: Doğal anti-bakteriyel özelliklere sahiptir, bu da yara örtüleri ve ilaç taşıma sistemlerinde avantaj sağlar. KS, asidik çözeltilerde çözünür ve elektrospinning işlemi için uygun viskoziteyi sağlayabilir. Amin ve hidroksil grupları sayesinde çeşitli biyomoleküllerle ve polimerlerle kolayca modifiye edilebilir. Polimetil metakrilat (PMMA), güçlü mekanik özelliklere ve iyi optik netliğe sahip bir termoplastiktir. Kitosan ve PMMA karışımları, elektrospinning ile nanofiber üretiminde çeşitli avantajlar sunar:

Mekanik Güç: PMMA, kitosan nanofiberlerine mekanik güç katar, böylece daha dayanıklı ve sağlam yapıların oluşmasını sağlar.

Çözünürlük ve Çözgen Seçimi: PMMA, organik çözücülerde çözünürken kitosan, asidik sulu çözeltilerde çözünür. Uygun çözücü sistemler seçilerek her iki polimerin karışımı sağlanabilir.

Film ve Fiber Oluşumu: Kitosan/PMMA karışımları, düzgün ve homojen nanofiber veya film yapılarının oluşmasına olanak tanır.

Biyomedikal Uygulamalar: Kitosan/PMMA nanofiberleri, yara örtüleri, doku mühendisliği iskeleleri ve ilaç taşıma sistemleri gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir.

Yüzey Özellikleri: Kitosan'ın yüzeydeki aktif amin grupları, nanofiberlerin yüzey özelliklerini iyileştirerek biyomolekül bağlanmasını ve hücre etkileşimlerini artırır.

Bu nedenlerle, KS ve PMMA kombinasyonları, elektrospinning işlemiyle üretilen nanofiberlerde önemli bir rol oynar ve çeşitli endüstriyel ve biyomedikal uygulamalar için geniş bir kullanım yelpazesi sunar.

2.7. ELEKTRO EĞİRME TEKNOLOJİSİ

Biyoteknoloji alanında kullanılan nanolifler, biyomedikal ürünlerin performansını artırma ve ürünlere fonksiyonel özellikler kazandırma potansiyeline sahiptir. Bu liflerin fonksiyonel performans kazançları, genellikle lif boyutuna yapılan optimizasyonlarla elde edilir. Optimizasyonların temel amacı, nanoliflerin boyutunu küçültmektir.

Polimerik liflerin kimyasal yapıları, morfolojisi ve nano yapıları gibi kütsel özelliklerinin yanı sıra, yüzey pürüzsüzlüğü ve yüzey enerjisi gibi yüzey özelliklerinin de dikkatlice incelenmesi ve değerdendirilmesi gerekmektedir. Bu inceleme, özellikle işlevsel ve akıllı liflerin performanslarının belirlenmesi ve istenen özelliklerde modifiye edilerek geliştirilmesi açısından önemlidir. Bu tür modifikasyonlar ve geliştirmelerde, genellikle optimum özelliklere sahip çok işlevli liflerin üretilmesi hedeflenir. Yaygın bir yöntem, istenen kütle özelliklerine sahip polimerlere, istenen yüzey özelliklerini kazandırmak için oligomerler, polimerler ve nanoparçacıklar gibi yüzey aktif malzemelerle elektrospinning ve benzeri metotlar kullanarak kaplamadır (Jalili et al., 2006; Jirsak et al., 2005; Ahadian et al., 2016; Francois et al., 2015; Goldberg et al., 2007; He et al., 2008; Leong et al., 2008; Li et al., 2013; Papenburg, 2009; Place et al., 2009; Savioli Lopes et al., 2012; Schacht, 2004; Sell et al., 2010).

Nanolif uygulamaları, sentetik ve yarı sentetik polimerik yapıların teorik mukavemet değerdelerini optimize eder. Günümüzde lif ve iplik formunda üretilen geleneksel liflerin kristalinite yüzdesine belirli sınırlamalar getirilmiştir. Örneğin, yaklaşık 1 nm kalınlığındaki normal bir C-C bağı ile çapı 5 nm olan bir lif üretildiğinde, molekül zincirleri yüksek kristalin davranışlar sergiler. Bu sayede üretilen lifin mukavemet değeri, molekül zincirlerinde bulunan C-C bağlarının mukavemeti ile ifade edilir. Ancak, geleneksel lif üretim teknikleriyle üretilen polyesterin teorik mukavemeti 120-150 GPa olmasına rağmen, üretim sonrası ölçülen mukavemet değeri yaklaşık 20 GPa'dır (Agarwal et al., 2008; Al-Enizi et al., 2018; Chakraborty et al., 2009; Eatemadi et al., 2016; H. Liu et al., 2013; M. Liu et al., 2017; Martins et al., 2008; Thenmozhi et al., 2017; Vasita & Katti, 2006; Xue et al., 2019).

Nanoteknoloji ile üretilen nanolifler, birçok avantaja sahiptir. Bunların başında, daha küçük çaplarda üretilibilmeleri sayesinde, ağırlık ve hacimlerine oranla oldukça yüksek yüzey alanına sahip olmaları gelir (Eatemadi et al., 2016; Fukumori & Ichikawa, 2006; Goldberg et al., 2007; C. H. Lee et al., 2005; Li et al., 2013; Vasita & Katti, 2006). Geniş yüzey alanına sahip nanolif yapılar, iyonları, fonksiyonel grupları ve nano boyuttaki çeşitli partikülleri tutma veya yayma kapasitesini önemli ölçüde artırır (Süpüren G., Kanat Z.E., Çay A., Kırıcı T., Gülümser T., 2007).

Biyoteknoloji alanında kullanılan nanolifler, kullanılan biyomedikal ürünlerin performansını artırarak daha verimli ve işlevsel hale getirir ve yenilikçi çözümler sunar. Nanolifler, gelecekteki biyomedikal uygulamalarda önemli bir rol oynama potansiyeline sahiptir.

Polimerik nanolifler ayrıca aşağıdaki avantajları sağlar:

Filtrasyon sırasında yüksek performans

Su tutma, buruşmama ve leke tutmama gibi özellikler

Gözenek boyutlarının kontrol edilebilmesi

Yumuşak doku

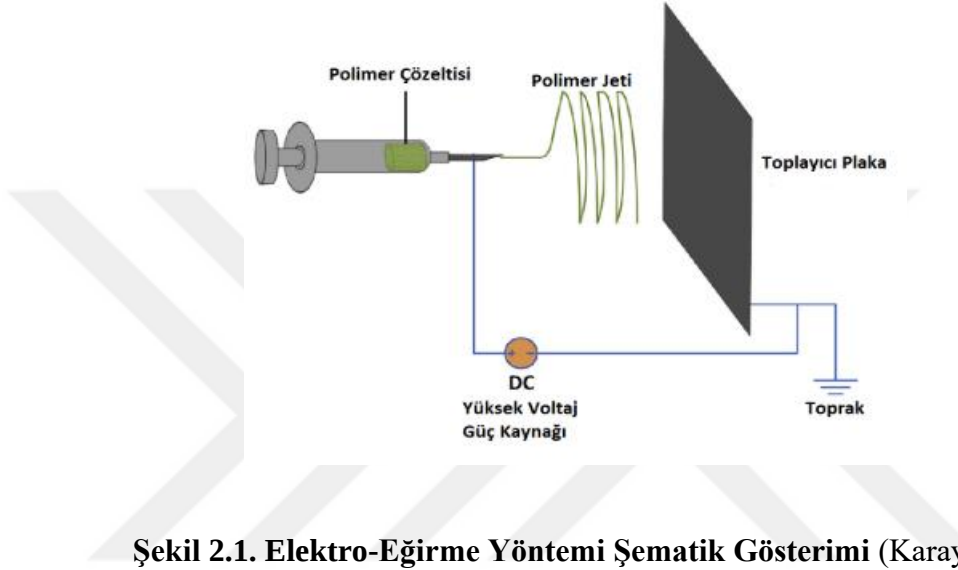
Bu çalışmada kullanılan polimerler ve polimere katkı olarak eklenen diğer aktif maddeler aşağıda açıklanmıştır:

Elektro-eğirme yöntemi, çok ince lifler üretmek için elektrostatik kuvvetin kullanıldığı bir yöntemdir ve bu yöntem 1897 yılında ortaya atılmış ancak 1934 yılında Formhals'ın patent almasıyla kabul görmüş ve kullanımı artmıştır (Hu et al., 2014; ÜNAL, 2017b).

Elektro-eğirme uygulamaları arasında ilaç verme (Pillay et al., 2013; Sill & von Recum, 2008), askeri koruyucu giysi (S. Lee & Obendorf, 2006; M. Gorji, Ali. A. A. Jeddi, 2010), filtreleme (Aussawasathien et al., 2008; Gopal et al., 2006), enzim immobilizasyonu (Shi et al., 2008), yara örtüleri (Pillay et al., 2013), kozmetik maske, nano-sensör (Kowalczyk et al., 2008), enerji ile ilgili uygulamalar ve doku mühendisliği yapı iskeleleri (Pham et al., 2006) bulunmaktadır.

Elektro-eğirme, hücre dışı matrisin doğal halini taklit ederek hücre gelişimi için uygun bir ortam oluşturan nano/mikro liflerden iskele üretebilen çok yönlü bir tekniktir (Boudriot et al., 2006). Bir polimer çözeltisinin, yüksek elektrik alan oluşturarak nano boyutlu fiber oluşturulması işlemidir. Elektro-eğirme, üretiminin hızlı olması, malzemelerin yaygın ve kolay bulunabilir olması, maliyetinin düşük olması ve oluşturulan lifin kalitesini sabit tutabilmesi özelliklerine sahip elektrohidrokinamik yöntemlerden biridir (Bhardwaj & Kundu, 2010; Chen et al., 2007; Hu et al., 2014).

Nanolif üretiminde istenilen lif özelliklerinin tümünü sağlayabilmesi ve lif inceliğinin kontrol altında tutulabilmesi elektro-eğirme ile mümkün olmaktadır. İtici elektrostatik kuvvet, yüzey gerilimini aştığında ve Taylor konisinin ucundan yüklü bir sıvı jeti püskürtüldüğünde kritik bir değere ulaşabildiği için polimerik çözeltiden nanofiberler üretilmektedir (Frenot & Chronakis, 2003).



Şekil 2.1. Elektro-Eğirme Yöntemi Şematik Gösterimi (Karayeğen, 2016).

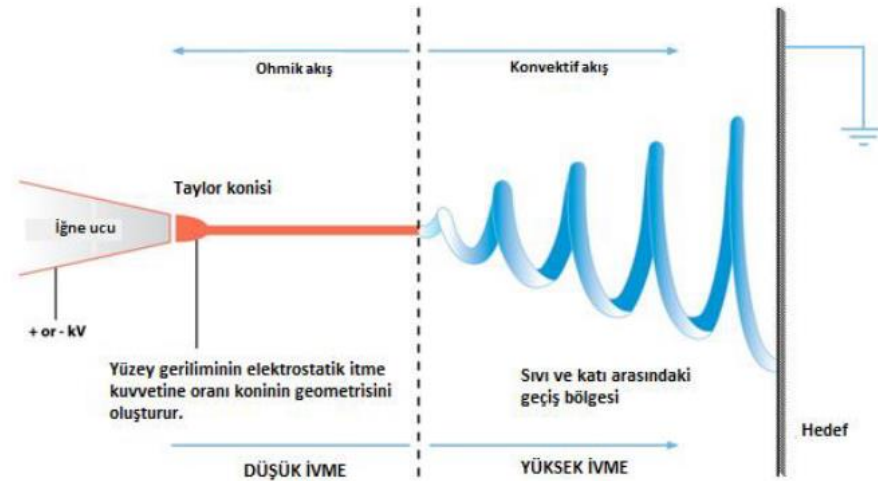
İlaç yükleme yöntemleri arasında harmanlama, koaksiyel elektro-eğirme, yüzey modifikasyonu ve emülsiyon gibi çeşitli yöntemler bulunur. İlaç yükleme yöntemleri, farklı ilaç salım mekanizmaları ve farklı lif yapısı oluşumları sağlar. Harmanlama, ilacın elektro-eğirme işleminden önce doğrudan polimer çözeltisi ile dağıtılması ya da çözülmesi yöntemlerinden biridir (Bhattacharai et al., 2019; Kaialy et al., 2014; Zhang et al., 2017). İlaç ve polimer arasındaki fizikokimyasal özelliklerin benzerliği ne kadar fazla ise çözünme sistemi o kadar iyi sonuç verir. PVA hidrofobik bir polimer olduğundan, hidrofobik ilaçlarla daha yüksek kalitede salım sağlayabilmektedir (Bhattacharai et al., 2019; Zeng et al., 2003, 2005; Zhang et al., 2017).

Ancak ilaç ile polimer arasındaki benzerlik azaldığında uyumsuzluk görülürse ilacın yükleme dozunun düşürülmesi çözünmesini kolaylaştırabilir (Kim et al., 2004a; Zhang et al., 2017). İlaç çözünürlüğü düşük olduğunda ilaç dağılımı üniform olmayabilir, yüksek çözünürlüğe sahip bir ilaçta ise ilaç performansının olumsuz

etkilenmesi gözlemlenebilir. İlaç çözünürlüğü, ilaç dispersiyonunun performansını belirler (Kim et al., 2004b).

Oluşturulan elektrik alan polimer çözeltisinde bir yük oluşturur. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, enjeksiyonun ucuna bir çözeltisi damlası yüklenir ve indüklenen yükler yüzey üzerinde eşit olarak dağılır. Sonuç olarak, elektrostatik etkileşimlerin etkisi altında, damla Taylor konisi adı verilen konik bir nesneye dönüşür (Reneker & Chun, 1996; Frenot & Chronakis, 2003; Huang et al., 2003; Reneker et al., 2000; Shin et al., 2001). Elektrik akımı elektrotlarla sağlanır, elektrotlardan biri polimer çözeltisi içeren şırınganın ucuna, diğeri ise toplayıcı plakaya bağlanır. Oluşturulan elektrik alan polimer çözeltisinde bir yük oluşturur. Elektrik alanın gerilimi kritik değerin üzerine çıktığında, Taylor konisinin ucundan yüklü bir jet fışkırır. Fışkıran yüklü jet, toplayıcı plaka üzerinde nanofiber olarak toplanır. Nanofiberlerin oluşumu çeşitli parametrelere bağlıdır; dış elektrik alan ile Taylor konisinin üzerindeki yüzey yükleri arasındaki elektrostatik etkileşimlerin gücü belirli bir eşiği aştığında, elektrostatik kuvvet polimer çözeltisinin yüzey gerilimini yenebilir ve böylece çözeltinin sürekli olarak bir sıvı jeti olarak dışarı fırlamasını sağlar.

Şekil 2.2'de elektro-eğirme yöntemi ile nanofiber oluşumu gösterilmiştir;



Şekil 2.2. Elektro-Eğirme ile Nanofiber Oluşumu (Emül, 2022)

Şekil 2.2'de gösterilen Taylor Konisi tarafından yüksek hızda oluşturulan nanofiberler, geniş bir yüzey alanı ve yüksek bir hacim oranına sahiptir. Bu özellikler,

hücre üremesi, farklılaşması, yapışması ve göçü gibi doku mühendisliğinde aranan özelliklerden dolayı tercih edilir (Emül, 2022).

2.7.1. Elektro-eğirme Yöntemini Etkileyen Parametreler

Elektro-eğirme işlemi üzerinde etkili olan parametreler, sadece işlem istikrarını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda polimer çözeltilerinin nanoliflere dönüşümünün anlaşılmasında da önemli bir rol oynar. Elektro-eğirme parametrelerinin yönetimi üç ana başlık altında incelenir: işlem parametreleri, çözelti parametreleri ve çevresel etkiler.

İşlem parametreleri arasında metal enjektör ucu ile toplayıcı plaka arasındaki elektrik alan, mesafe, akış hızı, uygulanan gerilim ve diğer değişkenler yer alır.

Çözelti parametreleri, konsantrasyon, viskozite, moleküler ağırlık, iletkenlik ve çözeltinin yüzey gerilimi gibi özellikleri kapsar.

Çevresel faktörler arasında ise sıcaklık, nem ve basınç gibi etmenler elektro-çekim işlemi üzerinde etkili olabilir (Emül, 2016).

2.7.1.1. Çözelti Özellikleri

2.7.1.1.1. Konsantrasyon

Elektro-eğirme yönteminde kullanılan polimer çözeltisinin konsantrasyonu, nanofiberlerin oluşumu için hayati öneme sahiptir. Konsantrasyonun çok düşük olması, elektro-eğirmenin elektro-püskürtme haline gelmesine ve fiberlerde parçacık oluşumuna neden olabilir (Eda vd., 2007; J. S. Lee vd., 2004a; Mohammadian ve Eatemadi, 2017). Konsantrasyonun çok yüksek olması durumunda ise, nanofiberler yerine spiral şekilli mikro bant yapıları oluşabilir (S. Lee ve Obendorf, 2006).

2.7.1.1.2. Viskozite

Viskozitenin çok yüksek olması, püskürtülen jetlerin sert olmasına ve düşük olması durumunda ise nanofiberlerin kesintili olmasına neden olur. Bu nedenle, elektro-eğirme ile nanofiber üretimi için uygun viskoziteli bir çözelti gereklidir (Larrondo ve Manley, 1981; Sukigara vd., 2003). Çözelti viskozitesi, polimerik çözeltinin konsantrasyonu ile ayarlanabilir. Çözelti parametreleri birbiriyle

bağlantılıdır ve birbirini etkiler. Düşük viskoziteli çözeltilerde yüzey gerilimi önemli bir faktördür ve sadece boncuklar veya boncuklu fiberler oluşur. Çözelti uygun viskoziteye sahip olduğunda, sürekli fiber oluşumu gözlemlenir (Koski vd., 2004; J. S. Lee vd., 2004b; Koski vd., 2004; J. S. Lee vd., 2004c).

2.7.1.1.3. Moleküler Ağırlık

Konsantrasyon sabit kaldığında ve polimerik çözeltinin molekül ağırlığı değiştirildiğinde, molekül ağırlığı azaltıldığında boncuklu yapılar oluşur. Molekül ağırlığı arttığında ise mikro fiberler oluşturulabilmektedir. Ancak, molekül ağırlığının aşırı artırılması, konsantrasyondaki gibi mikro bantların oluşmasına yol açar (Koski vd., 2004).

2.7.1.1.4. Yüzey Gerilimi

Elektro-eğirme yöntemi, yüzey gerilimini değiştirme olanağı sağlar. Konsantrasyon sabit tutulur ve yüzey gerilimi azaltıldığında daha düzgün nanofiberler elde edilebilir. Yüzey gerilimi, çözücü kütle oranı değiştirilerek ayarlanabilir (Zeng vd., 2005).

2.7.1.2. İşlem (Proses) Parametreleri

2.7.1.2.1. Enjektör Ucu ve Toplayıcı Plaka Arasındaki Mesafe

Enjektör ucu ile toplayıcı plaka arasındaki mesafe, nanofiberlerin çapı ve morfolojisini etkiler (Ki vd., 2005). Nanoliflerin fiziksel özellikleri arasında, çözücünün kuruluşunun belirleyici olduğu iyi bilinmelidir. Enjektör ile toplayıcı plaka arasındaki mesafe çok kısa ise, polimerik çözeltinin toplayıcı plakaya ulaşmadan önce kuruması için yeterli zaman olmaz ve bu, daha kalın liflerin oluşmasına neden olur. Aynı zamanda, mesafe çok uzak ise, çürümüş nanolifler oluşabilmektedir (Geng vd., 2005; J. S. Lee vd., 2004b).

2.7.1.2.2. Uygulama Voltajı

Elektro-eğirme cihazı, laboratuvar koşullarında genellikle 5-40 kV elektrik alanında çalıştırılır (Subbiah et al., 2005). Taylor konisinin oluşabilmesi için uygulanan voltaj, yüzey gerilimini aşmakta önemli bir rol oynar. Uygulanan voltaj,

nanoliflerin çapını etkiler ve uygun olmadığında nanoliflerin boncuklu bir görünüm kazanmasına neden olabilir (Haider et al., 2015).

2.7.1.3. evre Koşulları

Nem, sıcaklık ve basınç gibi çevresel faktörler, nanolif çapı ve morfolojisini etkiler. Düşük bağıl nem koşullarında, polimerik çözelti hızla buharlaştığı için kalın nanolifler oluşur; ancak yüksek bağıl nem seviyelerinde çözücü yavaş yavaş buharlaşır ve daha ince nanolifler meydana gelir. Yüksek sıcaklık, çözücünün daha hızlı buharlaşmasına neden olarak daha kalın liflerin oluşmasına yol açar (Hutmacher ve Dalton, 2011).

2.8. Nanofiber retim Yöntemleri

Kimyasal buhar çöktürme, lazer buharlaştırma, kendiliğinden birleşme, faz ayrılma, çizme yöntemi, nano-kalıp ve elektro-eğirme gibi yöntemlerle nanolifler üretilir (Süslü, 2009). Bu çalışmada elektro-eğirme yöntemi kullanılmıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. MATERYAL VE METOT

Nanofiberlerin elektro eğirilmesi için PMMA ($M_w = 350K$, Sigma-Aldrich), dimetilformamid (DMF, Merck) ve tetrahidrofuran (THF, Merck) kullanıldı. Hidroksiapatit sentezi için kalsiyum nitrat tetrahidrat ($Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, Merck KGaA, Darmstadt, Almanya), amonyum dihidrojen fosfat ($(NH_4)H_2PO_4$, Merck KGaA, Darmstadt, Almanya) ve amonyak çözeltisi (NH_4OH , % 28, Merck Co., Darmstadt, Almanya) kullanıldı. Yüzey aktif maddesi olarak sodyum tripolifosfat (STTP, Sigma-Aldrich) seçildi.

3.1. MXene Üretimi ve Hazırlanışı

$Ti_3C_2T_x$ 'in sentezi, başlangıç malzemesi olan Ti_3AlC_2 'den Al katmanlarının, aşındırıcı olarak LiF/HCl çözeltisi kullanılarak seçici bir şekilde aşındırılmasıyla gerçekleştirilir. Elde edilen çok katmanlı (ML) $Ti_3C_2T_x$ pullar, kalan reaksiyon yan ürünlerini çıkarmak için distile suyla yıkanır, santrifüjlenir ve dekante edilir, böylece belirli bir derecede kendiliğinden delaminasyon meydana gelir. ML yapının tipik bir SEM görüntüsü. ML $Ti_3C_2T_z$, su içinde koruyucu argon gazı akışı altında sonikasyon yapılarak delamine edilmiş $Ti_3C_2T_z$ veya tek katmanlı ve birkaç katman kalınlığında pulların kolloidal bir süspansiyonu elde edilir; bu yapı sırasıyla SEM ve TEM kullanılarak gözlemlenir. Elde edilen $Ti_3C_2T_x$ pul boyutları, benzer aşındırma ve delaminasyon prosedürlerini izleyen diğer çalışmalarla uyumludur.

3.2. ELEKTRO EĞİRME İLE NANOFİBER ÜRETİMİ

Nanokompozit kontak lens fiber malzemesi için uygulanan elektro eğirme proses çalışmaları, farklı voltaj ve debilerde gerçekleştirilmiştir. NL'lerin üretimi için voltajlar 10-15 kV arasında değiştirilirken, akış hızları 0,5-1 mL/saat arasında değiştirilmiştir. Tüm lifler alüminyum folyo üzerinde toplanmış, iğne ucu-kollektör mesafesi 15 cm olarak korunmuştur. Tüm PNL'ler, testlerden ve karakterizasyondan

önce solvent tortusunu çıkarmak için bir gece boyunca çeker ocak altında kurutulmuştur.

Nanofiberler, Optosense Elektrosinning Opt-100 cihazı ile elektro-eğirildi. Elektro-eğirme çözeltisi, PMMA'nın DMF ve THF (1:1 oranında ikili çözücü) içinde çözülmesiyle hazırlandı. Polimer çözeltilerine % 0,1 oranında MXene eklendi ve elektro-eğirme çözeltisine % 0.1 oranında STTP (MXene miktarının % 0.1'i kadar) ilave edildi. Hazırlanan çözeltiler, 15 numara iğne uçlarına sahip plastik şırıngalara yerleştirildi. İğne ucuyla alüminyum folyo ile kaplanmış kolektör plakası arasındaki mesafe 15 cm olarak sabitlendi. 0.5 ml/saat besleme hızında 10 kV DC gerilim uygulandı.

3.3. KOMPOZİT FİBER KONTAK LENS MALZEMESİNİN KARAKTERİZASYONLARI

Üretilen liflerin morfolojik yapıları ve lif çapları, taramalı elektron mikroskobu (SEM; JSM 6335F- JEOL ve JSM 6510LV, Japonya) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM; JEOL 2100 HRTEM) ile incelendi. 2 cm x 2 cm boyutlarında alüminyum folyolar kesildi ve iletken karbon bantlarına yapıştırıldı. Örneklerin yüzeyi, bir püskürtme kaplayıcı (Polaron SC7640, Quorum Technologies, Birleşik Krallık) ile platinle kaplandı. İncelemeler, 10 kV hızlandırma voltajında gerçekleştirildi. Lif çapları ve boyut dağılımları, hem JEOL hem de ImageJ (ABD Ulusal Sağlık Enstitüleri, Bethesda, Maryland, ABD) yazılımları kullanılarak belirlendi. Sentezlenen MXene'in faz karakterizasyonu için CuK α radyasyonu ile çalışan bir X-ışını difraktometresi (XRD, Rigaku, RINT 2200 VL) kullanıldı.

Elektro eğirme yönteminde lif oluşumunun morfolojisinde çözeltilerin sahip olduğu viskozite, yüzey gerilimi ve elektrik iletkenliği kritik öneme sahiptir. Her bir çözelti 20 mL beherlerde hazırlanarak, 10 mL'lik beher içindeki çözelti, çözelti karakterizasyonları için kullanıma hazır hale gelmiştir.

3.3.1. Viskozite Tayini

Polimerik çözeltilerin viskoziteleri (DV-E, Brookfield AMETEK, ABD), kullanılarak ölçülmüştür. Tüm ölçümler 5 -30 hız (RPM) değeri aralıklarında ortam

sıcaklığında (25°C) dört kez tekrarlanmıştır. Tüm ekipman parçaları, ölçümlerden önce kalibre edilmiştir.

3.3.2. Yüzey Gerilimi Tayini

Polimerik çözeltilerin yüzey gerilimleri DuNoge (Zuidema-W.) metodu kullanarak Sigma (Force Tensiometers, SIGMA 702) cihazı ile yapılmıştır. Her biri 10 ml olan çözeltiler beher camlarına dökülerek ölçüm için hazırlanmıştır. Yüzey gerilimi tayini plakaya uygulanan kuvvet hesabıyla ölçülmektedir. Ölçümler oda sıcaklığında (25 °C) gerçekleştirilmiştir.

3.3.3. Elektrik İletkenliği

PMMA çözeltisi elektriksel iletkenlik Cond 3110 SET 1, WTW, (Almanya) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm standartları gereği polimerik çözeltilerde kullanılacak polimer kontrol grubu olarak 23°C’de 0,010 mol/L, 0,040 mol/L ve 0,100 mol/L ölçümünde potasyum klorür çözeltilerinin iletkenlikleri sırasıyla 1359 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 5234 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 12,39 mS/cm olacak şekilde kalibre edilmiştir. Hem iletkenlik ölçüm probu hem de termometre probu çözelti içerisine daldırılarak elektrik iletkenlik değerleri mS/cm cinsinden kaydedilmiştir.

3.3.4. Mekanik Testler

3.3.5. Lif Morfolojisi (SEM)

PMMA için elektro eğirmede gerçekleşen tüm PNL numuneleri için Taramalı elektron mikroskobu (SEM, Zeiss EVO LS10) kullanılmıştır. NL numuneleri EDX (Bruker 123 eV Quantax Microanalysis System) cihazı ile elementel analizi yapılmıştır. Fiber çapı belirlemek amacıyla görüntü yazılımı (ImageJ) kullanılmıştır. Ortalama nano fiber çapını belirlemek için her bir örnek için 200 ölçüm yapılmıştır.

3.3.6. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Işın Spektrometresi (FT-IR) Analizi

PMMA çalışma içeriğinde bulunan GO için, Fourier Kızılötesi Spektroskopisi FT-IR (Perkin Elmer Spectrum 400, ATR) cihazı ile 900-3700 cm^{-1} aralığında 4 ile 32 tarama ortalaması alınarak analizi yapılmıştır.

3.3.7. X-ışını Kırınım (XRD) Analizi

PMMA çalışması içeriğinde sentezlenen MXene kristal yapısı Cu K α radyasyonlarına ($\lambda=1.54060$ Å, 45 kV ve 40 mA) sahip tarama hızı 1°/dakikada 3° ile 20° arası olan XRD (X-ışını kırınım analizi) ile karakterize edilmiştir.

3.3.8. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

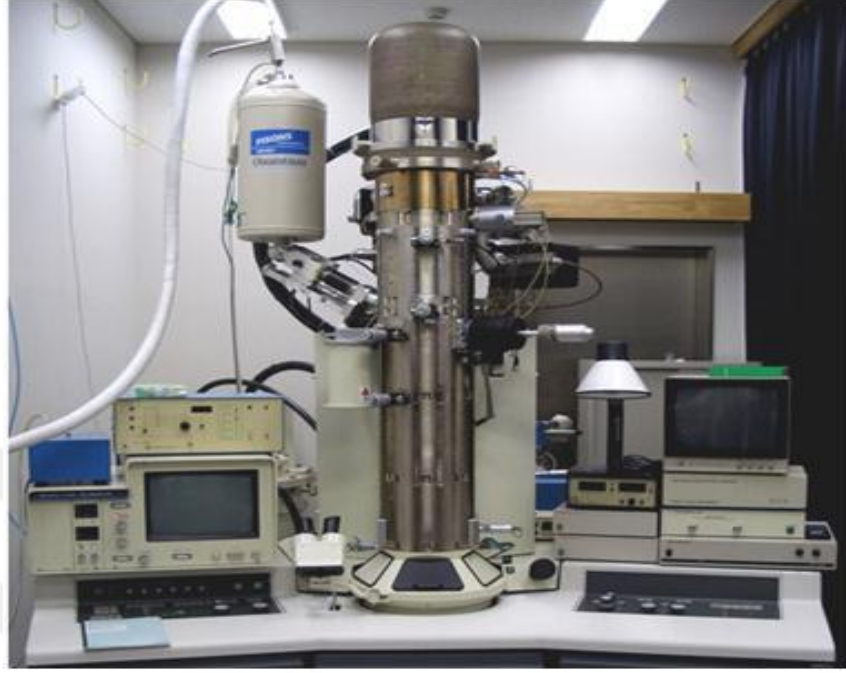
Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntüleri, dokunma modunda bir AFM (Digital Instruments Nanoscope III Atomic Force Microscope)(Şekil 3.1) ile alınmıştır. Numunelerin tarayıcı tüpünün üstüne sığıdığı ve 8 mm'den daha ince olduğu doğrulanarak kullanılmıştır. Yazılım 30mV-1V olarak ayarlanmıştır. Fiziksel yapı ve kristallik atamak için malzemelerin görüntüsü yakalanmıştır.



Şekil 3.1. Atomik Kuvvet Mikroskobu

3.3.9. TEM- Geçirgen Elektron Mikroskobu Analizi

Sentezlenen MXene'lerin şekillerini, boyutlarını ve etkileşimini araştırmak için Geçirgen Elektron Mikroskobu ile Morfolojik Analiz kullanıldı. Analiz için (Hitachi HF-2000 TEM)(Şekil 3.2), 10 miligram toz 20 ml etanol içinde dağıtıldı, ardından hazırlanan süspansiyon bir mikropipet kullanılarak karbon kaplı bakır grit üzerine yerleştirildi ve 5 dakika kurumaya bırakıldı. Hazırlanan grit, 200 kV voltaj ile görüntüleme için cihazın kolonu üzerindeki hazneye yerleştirildi.



Şekil 3.2. Morfolojik Analiz için TEM akinesi

3.3.10. Termal Analiz (TGA)

Tozların termal davranışı, 25-1000°C sıcaklık aralığında bir SDT Q600 analiz cihazı kullanılarak diferansiyel termal analiz (DTA) ve termal gravimetrik analiz (TGA) ile incelenmiştir. Isıtma hızı 10°C/dk olarak ayarlanmıştır.

3.3.11. Karanlık IV

Karanlık IV (Akım-Voltaj) Kontrol Eğrileri, özellikle yarı iletken cihazların (örneğin güneş pilleri veya diyotlar) elektriksel özelliklerini analiz etmek için kullanılır. Bu eğriler, cihazların karanlıkta, yani herhangi bir ışık veya dış uyarmı olmadan çalıştırıldıkları durumlarda nasıl davrandıklarını gösterir. Karanlıkta cihazın kapasitans ölçümünden perovskitin dielektrik sabitinin tahmini. Mott-Schottky analizinin gerçekleştirileceği frekans seçimi numunenin özelliklerine bağlı olduğunda, eğrileri 10, 55 ve 100 KHz'in altında gerçekleştirdik. Dielektrik sabitini incelemek için analizimizi 100 KHz 'e odakladık.

3.3.12. Antibakteriyel Çalışma

Kullanılan patojenler Fırat Üniversitesi, Veteriner Fakültesi'nden (Elazığ, Türkiye) temin edilmiştir. Bakteriyel çalışmalar, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, BİORGİNE Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Antimikrobiyal testler için kullanılan patojenler, gram-negatif bakteri *Escherichia coli* ve gram-pozitif bakteri *Staphylococcus aureus* ile mantar hücresi olarak *Candida albicans*'tan oluşmaktadır.

PMMA ve lif filmlerinin (Örnek kodları: S1, S2, S3 ve S4) seri dilüsyonları (20, 40, 60 ve 80 µl) hazırlanmış ve Klinik ve Laboratuvar Standartları Enstitüsü yönergelerinde belirtilen dilüsyon yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. MIC (Minimum İnhibitör Konsantrasyon), negatif kontrole kıyasla mikrobiyal büyümenin % 95'ini inhibe eden antimikrobiyal ajanların minimum konsantrasyonu olarak bilinir. Antimikrobiyal etkinlik, test edilen zarların membranları ile (AP) ve olmadan (AC) 600 nm'deki maksimum mikrobiyal absorbansı kullanarak inhibitör oransal faktörü (Af) belirlemek için (3.1)'deki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$A_f(\%) = \frac{A_C - A_P}{A_C} \times 100 \quad (3.1)$$

Kullanılan patojenlerin antibiyotik duyarlılıklarını belirlemek için Disk-difüzyon yöntemi kullanılarak ampicilin (10 µg) antibiyotiği ile test edilmiştir. PMMA ve lif filmlerinin antibakteriyel aktivitesini belirlemek için bir disk difüzyon testi gerçekleştirilmiştir. **E. coli** (ATCC 25922) ve **S. Aureus** (ATCC 25923) süspansiyonları, 18 saatlik besiyeri kültürlerinden toplanmış, 0.5 McFarland standart bulanıklık (1.5×10^8 CFU/mL) seviyesine ayarlanmış ve istenen bakteri yoğunluğuna (1:10) seyreltilmiştir. **Mueller-Hinton** agar plakaları, 0.1 mL bakteri süspansiyonu (1.5×10^6 CFU/mL) ile inoküle edilmiştir. Lifler 5 mm'lik parçalar halinde dilimlenmiş ve 2 saat UV sterilizasyonundan sonra bakteri kaplı petri kaplarına yerleştirilmiştir. Plakalar 37 °C'de 24 saat inkübe edilmiş ve disklerin etrafındaki inhibisyon bölgeleri dijital mikrometre ile ölçülmüştür. Optimum nanofiberleri seçmek için dört ayrı grup hazırlanmış ve testler üç kez gerçekleştirilmiştir. Her lif üç kez tekrarlanmıştır.

3.3.13. İstatiksel Analizler

Tüm istatistiksel analizler, GraphPad Prism sürüm 8 yazılımı (GraphPad Software Inc., San Diego, CA, ABD) kullanılarak ANOVA yöntemiyle gerçekleştirildi. Değerler; ortalama $\pm$ standart sapma (SD) olarak verildi ve aralarındaki istatistiksel farklar tek yönlü ANOVA ve Tukey'nin çoklu karşılaştırma testleri ile analiz edildi. Tüm durumlarda, $P < 0.05$ değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edildi.

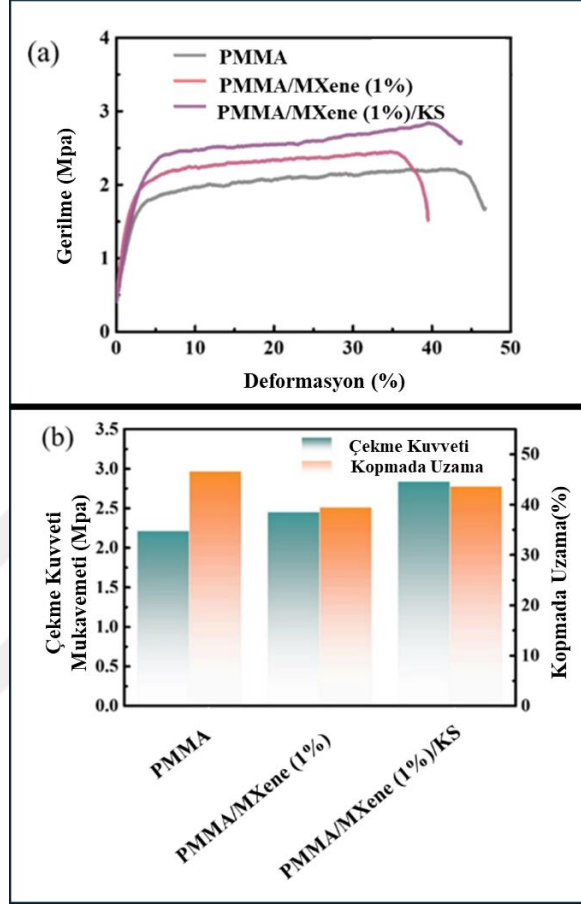


DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

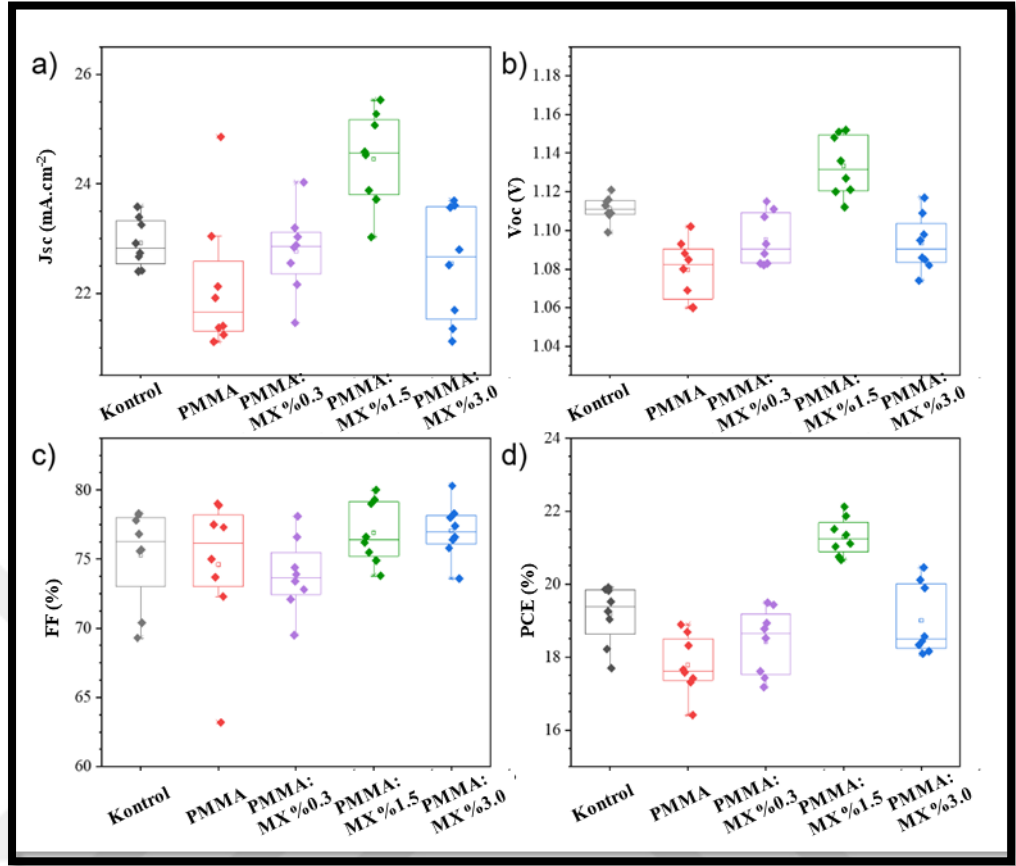
DMF genellikle PMMA elektro-eğirme için çözücü olarak kullanılır ve yardımcı olarak kullanılan THF, çözeltinin iletkenliğini artırır (Zhou vd., 2001). Bu çalışmada, DMF/THF (1:1) çözücü karışımında % 5 ağırlık ve % 10 ağırlık PMMA konsantrasyonları incelenmiştir. Farklı PMMA konsantrasyonları ile elektro-eğirilmiş PMMA liflerinin hem SEM hem de TEM görüntülerini temsil eder. Polimerlerin konsantrasyonu, elektro-eğirme sürecinde lif çapı ve kalitesinde önemli bir rol oynayabilir (Deitzel vd., 2001). Polimer konsantrasyonunun artmasıyla birlikte lif çapı artar ve boncuk oluşumu azalır (Liu vd., 2008)(Lin ve Wang, 2007). % 5 ağırlık PMMA konsantrasyonunda (5-PMMA) boncuk oluşumu gözlemlenmiştir. Öte yandan, % 10 ağırlık PMMA konsantrasyonunda (10-PMMA) boncuksuz lifler elde edilmiştir. 10-PMMA için ortalama lif çapı 140.56 ± 18.28 nm olarak ölçülmüştür. Boncukları lif boyutu hesaplamasından çıkardığımızda, 5-PMMA için ortalama lif çapı 250 ± 41 nm olarak ölçülmüştür. Bunun ana nedeni, belirli bir moleküler ağırlıkta düzgün ve pürüzsüz lifli yapı için minimum bir konsantrasyonun olmasıdır. Nanoliflerin çapını dikkate aldığımızda, daha düşük konsantrasyon, daha yüksek yüzey alanı nedeniyle doku mühendisliği ve filtrasyon uygulamaları için umut vericidir, çünkü yüzey alanı, hücre tutunumu ve kirletici partiküllerin adsorpsiyonunda önemli bir rol oynar (Saad vd., 2012), (Sunita vd., 2017), (Bzdek vd., 2020). Bu boncuklu yapı, diğer düşük yüzey gerilimli çözücüler kullanılarak, polimer çözeltisinin viskozitesini yüksek viskoziteli çözücülerle artırarak veya polimerin besleme hızını azaltarak ortadan kaldırılabilir (Patra vd., 2011).

4.1. MEKANİK TESTLER

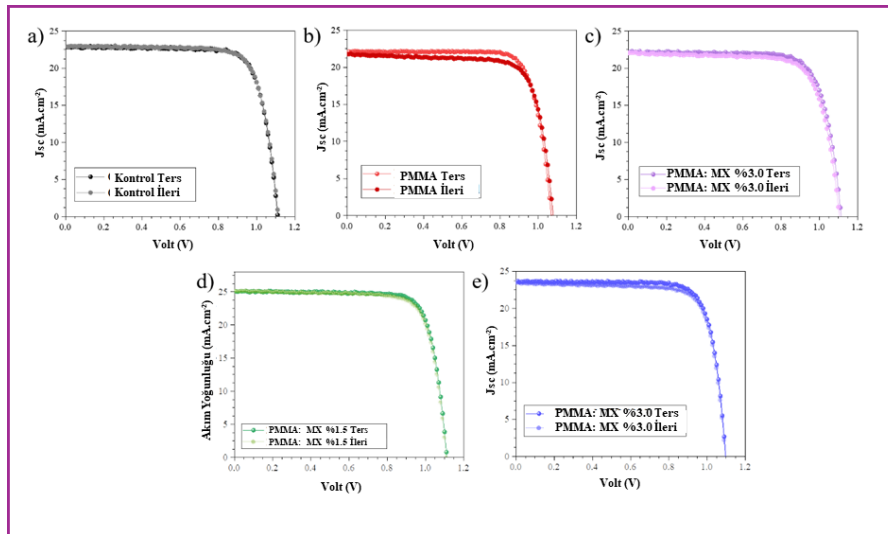


Şekil 4.1 (a) PMMA, PMMA/MXene (% 1) ve PMMA/MXene (% 1)/KS nanolif filmlerinin gerilme-gerinme eğrileri, (b) bunların çekme dayanımı ve kırılma uzaması

4.2. ELEKTRİKSEL ANALİZLER



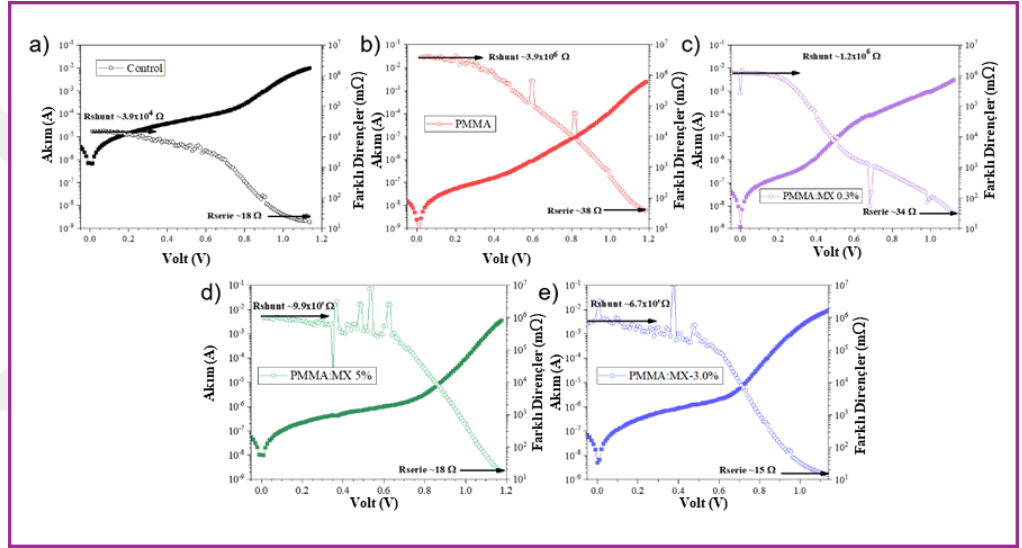
Şekil 4.2. Numunelerin (a) J_{sc} (mA.cm⁻²), (b) V_{oc} (V), (c) FF (%) ve (d) PCE (%) parametrelerinin kutu grafikleri.



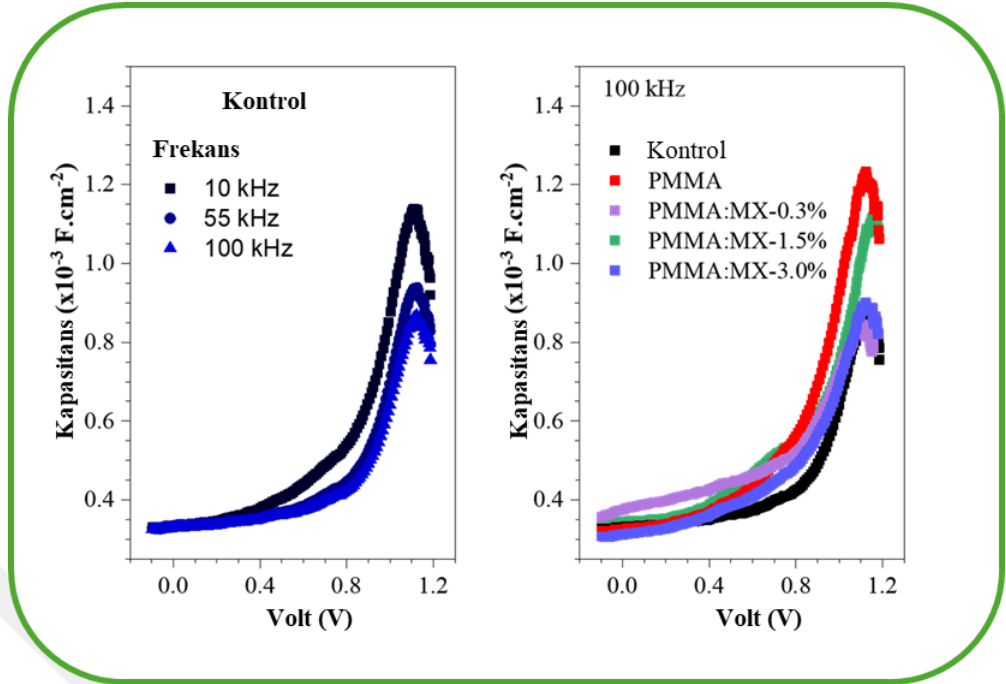
Şekil 4.3 En iyi PSC'lerin J-V eğrileri (a) Kontrol, (b) PMMA ve (c-e) PMMA: hem geri hem de ileri yönler için sırasıyla MX (% 0,3, 1,5 ve % 3).

Histerezis indeksi (HI) hesaplamaları aşağıdaki denklem kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

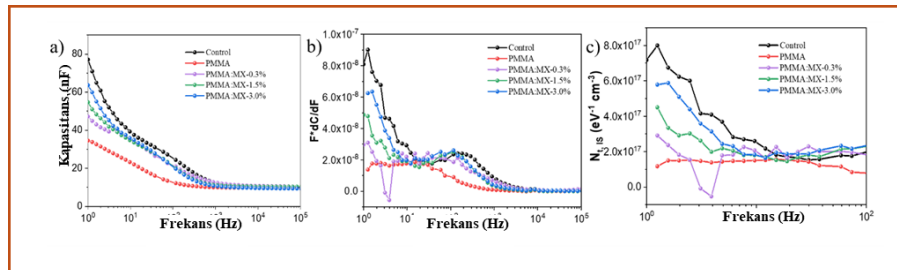
$$HI = \frac{PCE_{rev} - PCE_{for}}{PCE_{rev}} \quad (4.1)$$



Şekil 4.4 Sırasıyla (a) Kontrol, b) PMMA ve (c-e) PMMA: MX (% 0,3, 1,5 ve% 3,0) tabanlı cihazların voltaj eğrilerine karşı akım ve voltaj ve diferansiyel direnç

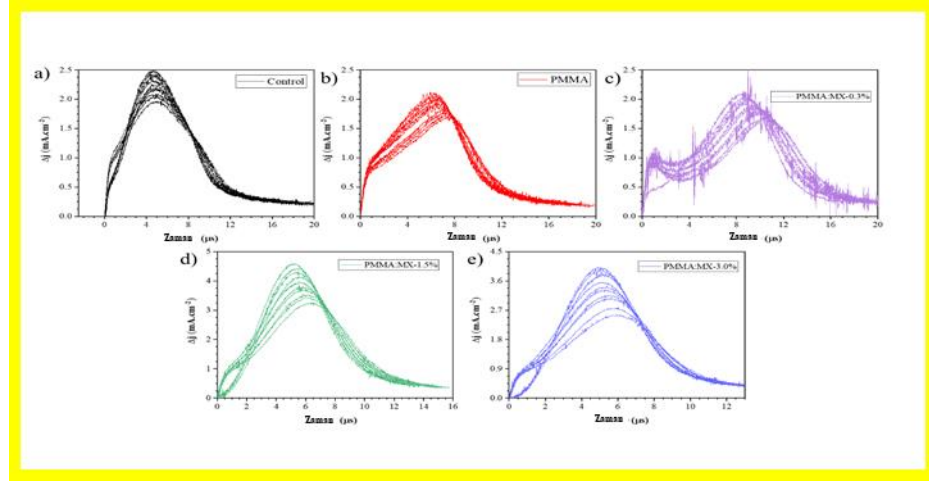


Şekil 4.5 Kapasitans-karanlıkta, oda sıcaklığında ve 50 mV AC uyarının altında gerçekleştirilen voltaj eğrileri. a) 10, 55 ve 100 KHz'de kontrol cihazı. b) Kontrol, PMMA, PMMA: % MX-1, PMMA: % MX-5 ve PMMA: % MX-10 cihazları 100 KHz'lik sabit bir frekanstadır



Şekil 4.6 (a) Kapasitans-frekans spektrumları ve (b) spektrumların diferansiyel formu. (c) Şekil 4.6 Tabloda gösterilen düşük frekans değerlerinin derin kusur durumlarıyla ilişkili olduğu oda sıcaklığında kusur yoğunluğu spektrumları.

Kontrol, PMMA ve PMMA: MX (% 0,3, % 1,5 ve % 3,0) cihazları için ölçümler karanlık koşullarda ve sıfır öngerilim gerilimi ve 50 Mv'luk bir AC sinyalinde yapıldı.



Şekil 4.7: Kontrol, PMMA ve PMMA
bazlı PSC'ler için Photo-CELIV ölçümlerinden Δj eğrileri

Tablo 4.1: Cihazların şarj transfer direnci (R_{ct}), rekombinasyon direnci (R_{rec}), dahili potansiyel (V_{bi}) ve kontrolün 1 HZ değerlerinde (C_{1Hz}) kapasitans, PMMA and PMMA:MX based PSCs.

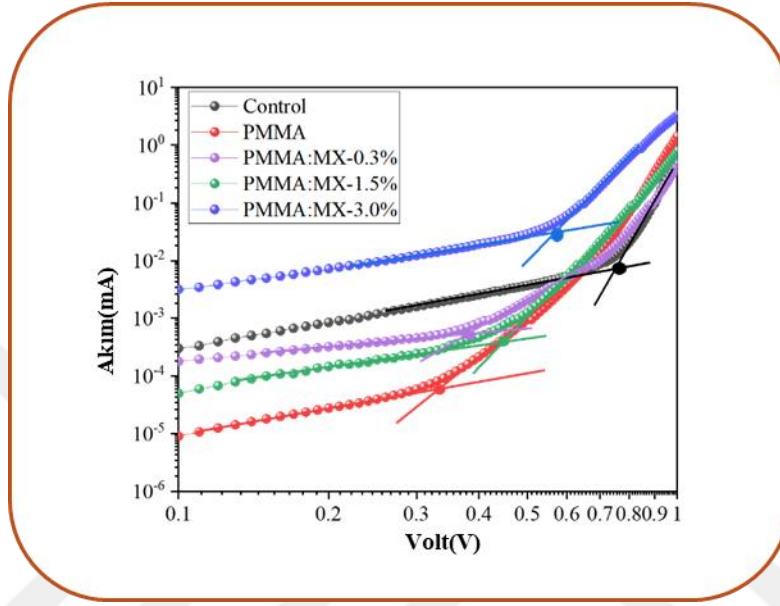
Örnek	R_{ct} (k Ω)	R_{rec} (k Ω)	V_{bi} (V)	C_{1Hz} (μ F)
Kontrol	2.47	57.80	1.14	3.56
PMMA	2.22	39.45	1.09	5.86
PMMA:MX-0.3%	0.83	21.27	1.21	7.21
PMMA:MX-1.5%	1.99	50.23	1.21	1.72
PMMA:MX-3%	1.38	20.09	1.19	3.51

Denklem (4.2)'den Nt , spec spektrumlarını hesaplamak için kapasitans spektrumlarının türevini aldık ve çıkarılan V_{bi} değerlerini kullandık.

Uygulanan AC sinyalinin (W) sınır enerjisi (E_w) ile açılmal frekansı arasındaki ilişki şu şekilde verilir:

$$E_w = k_b T \ln \frac{\omega_0}{\omega} \quad (4.2)$$

Burada ω_0 , “frekanstan kaçma girişimi” olarak adlandırılan sıcaklıktan bağımsız bir katsayıdır. Düşük frekanstan alınan tuzakların yoğunluk değerleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir. nicelenmiş değerler, derin seviyedeki kusurlarla ilgilidir.

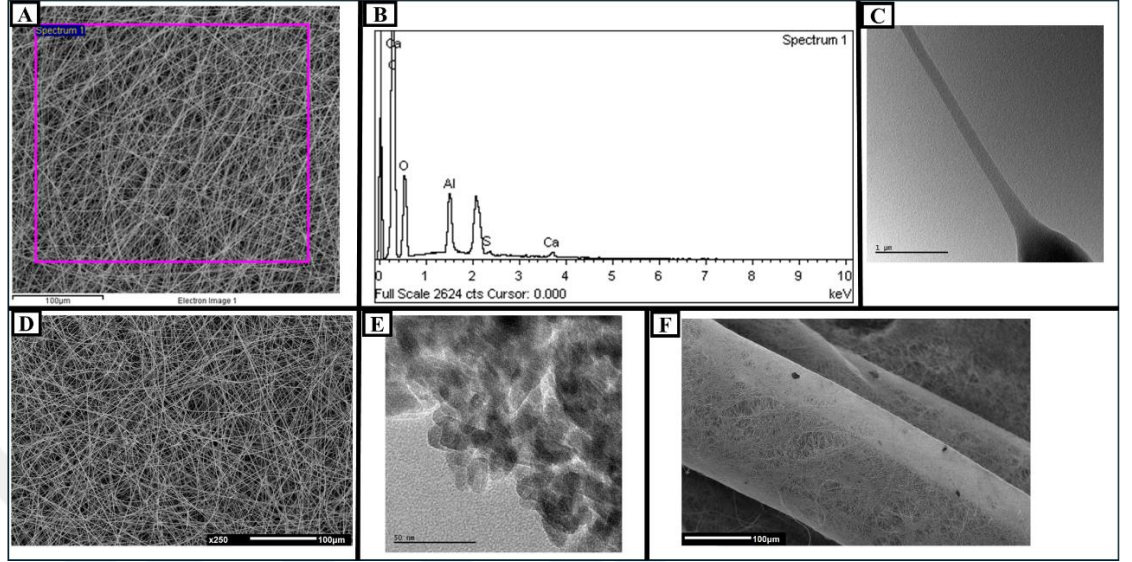


Şekil 4.8: Kontrol, PMMA ve PMMA bazlı cihazların karanlık I-V (akım-gerilim) eğrileri, ilgili V_{tfl} değerlerini gösteriyor

Karanlıkta cihazın kapasitans ölçümünden perovskitin dielektrik sabitinin tahmini. Mott-Schottky analizinin gerçekleştirileceği frekans seçimi numunenin özelliklerine bağlı olduğunda, eğrileri 10, 55 ve 100 KHz'in altında gerçekleştirdik. Dielektrik sabitini abartmak için analizimizi 100 kHz'e odakladık

- $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
- $d = 600 \text{ nm}$ (PVK kalınlığı)
- $C_g = 3.26 \times 10^{-4} \text{ F m}^{-2}$ (kontrol grafiğinden)
- $\epsilon = 21$

4.3. SEM ANALİZİ

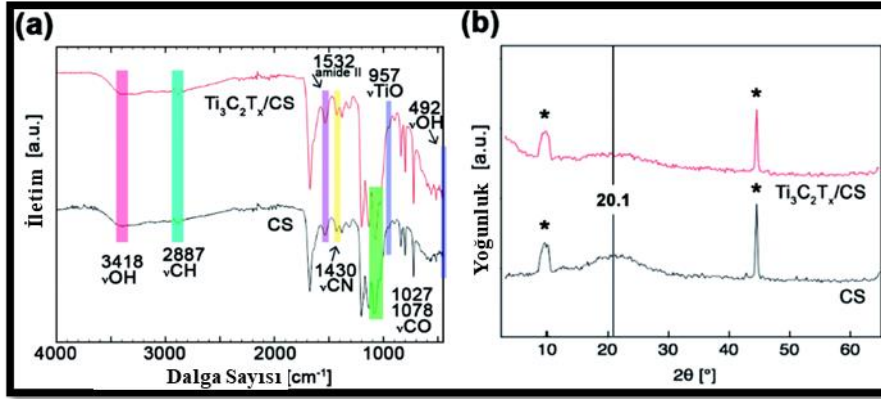


Şekil 4.9 A. PMMA, B. PMMA için EDS spektrumu, C. PMMA TEM görüntüsü, D. PMMA:MX-% 0,3, E. MXene (% 0,3) ve F. MX-% 3 fiber içindeki TEM görüntüsü

$Ti_3C_2T_z$ /KS lif morfolojisi SEM mikrografları, ortalama fiber çapı 211 ± 40 nm olan tek biçimli, silindirik fiberlere sahip eğrilmiş KS matlarını göstermektedir. Elektrospindleme parametrelerinin ince ayarı, ağırlıkça % 0, 0,05, 0,10, 0,25, 0,50 ve 0,75 $Ti_3C_2T_z$ yükleriyle tekdüze KS nano liflerinin tutarlı oluşumuna yol açtı. Bu $Ti_3C_2T_z$ konsantrasyonları, sürekli olarak tekdüze, boncuksuz nano elyaflar oluşturdukları için seçilmiştir. $Ti_3C_2T_z$ /KS nano liflerinin SEM mikrografları, nispeten tek biçimli çaplara sahip yoğun dokunmamış lif ağlarının varlığını ortaya çıkardı. Liflerde hiçbir dallanma gözlenmedi; bu, elektroegirme sırasında $Ti_3C_2T_z$ /KS çözeltisinin elektriksel kuvvetlerinin ve yüzey geriliminin uygun şekilde dengelendiğini gösterir. $Ti_3C_2T_z$ /KS nano liflerinin morfolojisi, saf KS nano liflerinkiyle görsel olarak karşılaştırılabilir nitelikteydi. Ağırlıkça % 0,05, 0,10, 0,25, 0,50 ve 0,75 $Ti_3C_2T_z$ /KS 'nin ortalama lif çapları sırasıyla 236 ± 59 , 170 ± 54 , 311 ± 144 , 279 ± 80 ve 298 ± 76 nm olmuştur.

4.4. FTIR

MXene'nin eklenmesinin kitosan nanoliflerinin çapraz bağlanmasını etkilemediğini sağlamak için, asılmış KS ve PMMA/MXene//KS lif matlarının kimyasal işlevselliği FT-IR spektroskopisi ile incelenmiştir. Tüm nanolif matlarında tipik KS bantları olan 3418 cm^{-1} (hidroksil grubu), 1203 cm^{-1} (köprü eter oksijeni), 1653 cm^{-1} (amid I grubu) ve 1532 cm^{-1} (amid II) gözlemlenmiştir. FT-IR spektrumlarındaki amin deformasyonu, düz ve kompozit lifler için başarılı bir çapraz bağlanmayı gösterir; burada glutaraldehit, kitosan ile amin işlevselliği oluşturmak için Schiff baz reaksiyonuna girer ve/veya terminal aldehitlerle karbonil grupları oluşturmak için Michael-tipi addüktler yapar. Saf ve kompozit nanoliflerin spektrumları arasındaki ihmal edilebilir farklılıklar gösterildiği gibi, MXene'nin eklenmesi kitosanın çapraz bağlanmasını etkilememiştir.



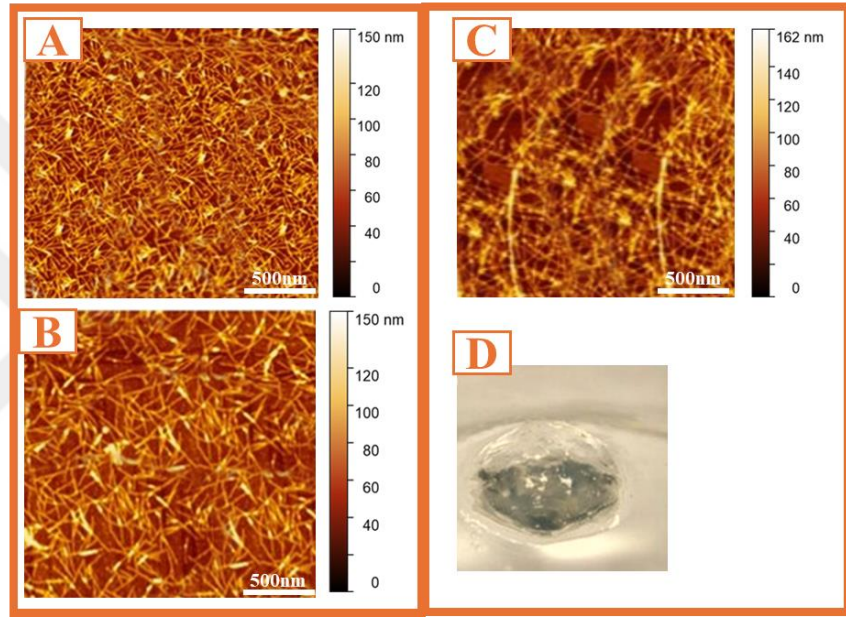
Şekil 4.10 (a) Saf kitosan nanoliflerinin FTIR spektrumları ve (b) % 0.75 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{KS}$ nanoliflerinin XRD desenleri.

Tablo 4.2 PMMA, KS ve MXene (Ti₃C₂T_z/KS) için FTIR pikleri

PMMA	KS	Ti ₃ C ₂ T _z /KS	Pikler	Referanslar
	3418	492, 3418	-OH stretching	(Pešić vd., 2021, 2022; Ul Haq vd., 2020)
	—	957	Ti–O stretching	(Kannan vd., 2020; Yang vd., 2024)
	2887	2887	C–H stretching	(Jamaluddin vd., 2022; J. Li vd., 2024; Z. Xu vd., 2024)
	1653	1653	Amide I	(Shen vd., 2019; Wan vd., 2021; S. Xu vd., 2023)
	1532	1532	Amide II	(Azeez vd., 2024; Bukhari vd., 2023; R. Wang vd., 2023)
	1430	1430	C–N stretching	(Asif vd., 2023)
	1203	1203	Bridge ether oxygen	(Iravani vd., 2022; Y. Li vd., 2024; Mayerberger vd., 2018)
	1078, 1027	1078, 1027	C–O stretching	(Lin vd., 2020; B. Wang vd., 2021; Wu vd., 2022)

4.5. AFM ANALİZİ

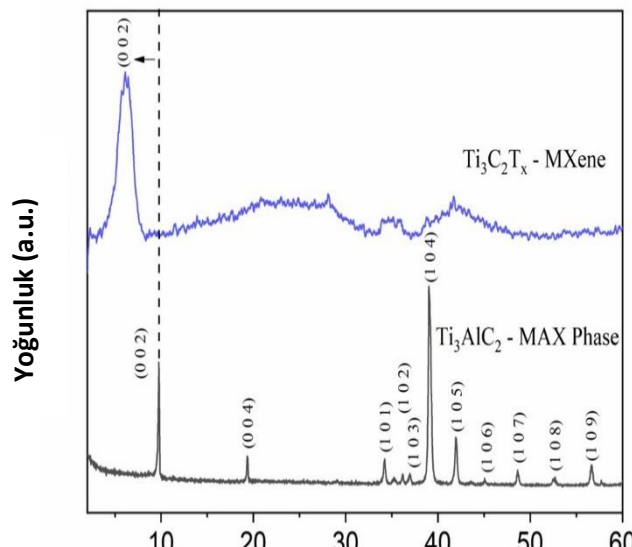
Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), tek tek grafen tabakalarının yüzey morfolojisini ve yükseklik profillerini incelemek için değerli bir tekniktir ve AFM görüntüleri grafenin işlevselleştirilmesine bağlıdır. Şekil 5.4'de gösterilen AFM görüntüsü, fiziksel yapı ve kristallik atamak için malzemelerin görüntüsü yakalanmıştır.



Şekil 4.11. (a) PMMA:MX- % 0.3 VE (b) PMMA:MX- % 3.0 AFM mikrografi

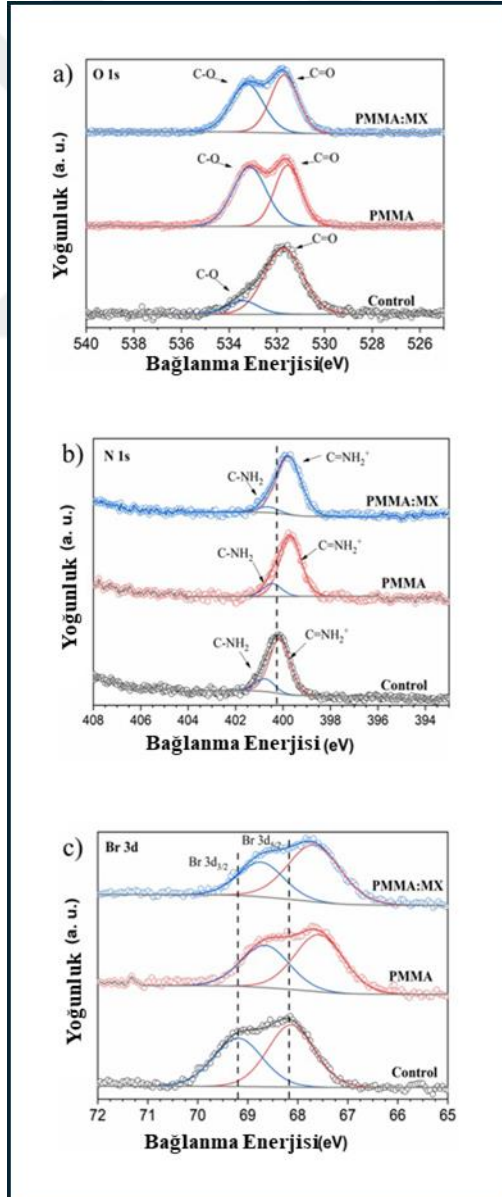
4.6. XRD ANALİZ BULGULARI

XRD analizi, malzemenin tabakaları arası değişikliği ve kristal özelliklerini incelemek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 4.12. $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$ fazı ve $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene'nin XRD desenleri.

4.7. XPS SPEKTRUMU SONUÇLARI



Şekil 4.13. Yüksek çözünürlüklü XPS spektrumları: (a) O 1s, (b) N 1s ve (c) Br 3d spektrumları yalın perovskit ile PMMA içeren ve PMMA % geçiş tabakaları olan perovskitten alınmıştır.

4.8. BET ANALİZİ SONUÇLARI

Tablo 4.3. PMMA/MXene/KS algılama malzemelerinin çeşitli işlemlerle elde edilen BET yüzey alanı, gözenek boyutu ve gözenek hacmi.

İşlem Koşulu	S_{BET} ($m^2 \cdot g^{-1}$)	Gözenek Boyutu (nm)		Gözenek Hacmi ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	
		BJH adsorpsiyon	BJH desorpsiyon	BJH adsorpsiyon	BJH desorpsiyon
Kazınmamış	4.482	10.4	11.4	0.012	0.012
30 dk Tek Taraflı Kazınmış	2.329	14.5	14.0	0.006	0.006
15 dk Çift Taraflı Kazınmış	4.577	8.1	8.8	0.009	0.008

4.9. ANTİMİKROBİYAL AKTİVİTE ANALİZLERİ

Tablo 4.4. Test edilen nanofiber filmlerin antimikrobiyal etkinliğinin değerlendirilmesi, S1: PMMA/KS; S2: PMMAA/MXene/KS; ve S3: PMMA/MXene olarak kodlanmıştır. Polimerize ve polimerize edilmemiş formlar kullanılarak agar kuyu ve disk difüzyon yöntemleriyle sırasıyla inhibitasyon bölgelerinin ($mm \pm SD$) kaydedilmesi.

Çoklu İlaç Dirençli Suşlar	Disk Difüzyon Yöntemi (100 mg/ml)			Kuyu Difüzyon Yöntemi (50 mg/ml)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<i>Escherichia coli</i>	4.23±0.05	*UD	0	0	21.3±1.2	0
<i>Enterobacter aerogenes</i>	7.5±0.1	UD	0	13.9±0.21	28±1.1	0
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	8.75±0.03	UD	0	11.8±1.7	29±0.51	0
<i>Enterobacter cloacae</i>	0	0	0	0	22.3±0.6	0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	3.25±0.07	UD	0	8.7±0.6	25.7±1.2	0
<i>Staphylococcus aureus</i>	2.23±0.01	UD	0	7.1±0.1	24.9±1.6	0
<i>Salmonella typhimurium</i>	3.18±0.12	UD	0	5.5±2.1	25.3±0.6	0
<i>Bacillus cereus</i>	5.17±0.04	UD	0	15.7±1.5	26.3±1.3	0
<i>Listeria monocytogenes</i>	UD	UD	0	10.3±0.8	22.3±0.9	0
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	0	UD	0	0	24.6±0.8	0
<i>Bacillus pumilus</i>	3.27±0.05	UD	0	6.34±0.51	25.3±0.5	0
<i>Candida albicans</i>	12.75±0.02	0	0	19.8±0.9	31.3±0.6	0

*UD: Disk Altı

Tablo 4.5. PMMA/MXene nanofiber filmlerinin polimerize edilmemiş (20, 40, 60, 80 ve 100 mg/ml) formlarının çoklu ilaca dirençli patojenlere karşı minimum inhibitör konsantrasyonunun (MIC) tespiti, inhibitör oransal faktörün (%) ölçülmesiyle yapılmıştır.

Çoklu İlaç Dirençli Suşlar	Polimerize Edilmemiş Çapraz Bağlı PMMA/MX'li Hidrojellerin Membranları (mg/ml)
----------------------------	--

	20	40	60	80	100
<i>Escherichia coli</i>	0.0	25.78±1.23	25.07±0.26	34.14±1.01	49.30±0.95
<i>Enterobacter aerogenes</i>	0.0	0.00	0.00	30.57±0.8	0.00
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	0.0	44.52±0.92	44.18±0.85	53.62±0.59	51.1±0.32
<i>Enterobacter cloacae</i>	0.0	24.35±0.41	23.81±0.59	32.83±0.39	0.00
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0.0	37.36±0.35	36.79±0.2	45.89±0.19	0.00
<i>Staphylococcus aureus</i>	0.0	53.92±0.26	52.5±0.46	61.25±0.24	41.38±1.05
<i>Salmonella typhimurium</i>	0.0	39.36±0.35	37.87±0.85	46.72±0.45	0.00
<i>Bacillus cereus</i>	0.0	46.4± 0.45	44.82±0.26	53.83±0.098	0.00
<i>Listeria monocytogenes</i>	0.0	46.13±0.46	45.74±0.29	54.69±0.506	54.66±1.17
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	0.0	50.88±0.1	50.26±0.26	59.39±1.06	0.00
<i>Bacillus pumilus</i>	0.0	46.56±0.14	46.14±0.35	55.18±0.45	0.00
<i>Candida albicans</i>	0.0	55.12±0.03	54.69±0.61	63.57±0.7	57.92±1.96

İnhibitör oransal faktör (% ±SD)

Tablo 4.6. PMMA/MXene/KS nanofiber filmlerinin polimerize edilmemiş (20, 40, 60, 80 ve 100 mg/ml) formlarının çoklu ilaca dirençli patojenlere karşı minimum inhibitör konsantrasyonunun (MIC) belirlenmesi, inhibitör oransal faktörün (%) hesaplanmasıyla yapılmıştır.

Çoklu İlaç Dirençli Suşlar	Polimerize Edilmemiş Çapraz Bağlı PMMA/MXene/KS İçeren Hidrojel Membranları (mg/ml)				
	20	40	60	80	100
<i>Escherichia coli</i>	53.37±0.58	89.56±2.76	62.15±3.15	59.31±0.54	56.18±6.07
<i>Enterobacter aerogenes</i>	39.87±0.49	71.52±3.5	48.68±3.31	45.90±.97	0.00
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	48.65±1.52	85.28±4.91	57.49±9.69	54.57±1.43	54.63±3.9
<i>Enterobacter cloacae</i>	46.88±1.019	82.38±3.56	55.68±4.85	52.79±2.94	0.00

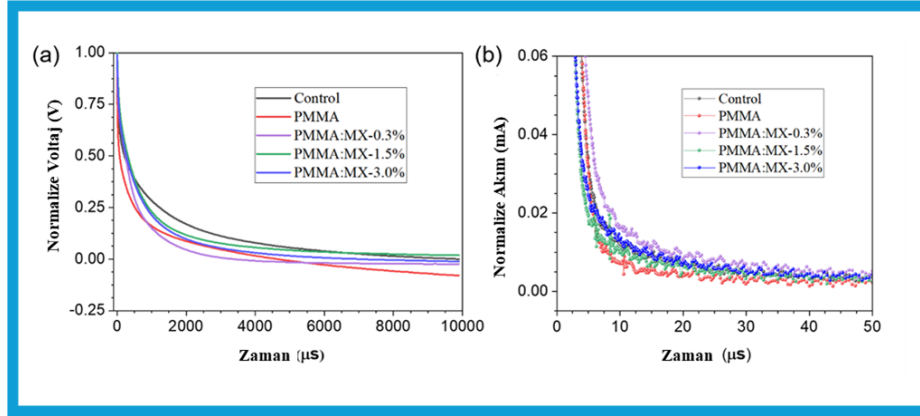
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	56.88±4.08	92.68±4.19	65.74±2.81	62.94±0.96	0.00
<i>Staphylococcus aureus</i>	53.50±5.17	93.66±2.69	62.23±1.95	59.52±9.6	53.54±3.36
<i>Salmonella typhimurium</i>	48.88±9.01	85.68±5.35	57.67±7.31	54.86±2.1	0.00
<i>Bacillus cereus</i>	55.701±4.9	96.47±1.84	64.63±5.70	61.85±3.57	0.00
<i>Listeria monocytogenes</i>	54.73±5.04	93.65±2.33	63.38±4.2	60.59±5.21	67.67±7.0
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	53.26±3.05	98.08±0.19	62.19±2.55	59.47±1.24	0.00
<i>Bacillus pumilus</i>	50.27±2.13	87.66±6.94	59.05±4.31	56.32±1.03	0.00
<i>Candida albicans</i>	57.47±5.3	99.01±0.67	66.26±3.5	63.39±3.02	73.49±2.85

İnhibitör oransal faktör (% ±SD)

4.10. TERMAL FOTOVOLTAİK (TPV)- TERMAL FOTOVOLTAİK KOMPOZİT (TPC) ANALİZİ

TPV, ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir teknoloji türüdür. TPV sistemleri, yüksek sıcaklıklarda yayılan termal radyasyonu yakalayıp fotovoltaiik hücreler aracılığıyla elektrik üretirler. TPV eğrileri, genellikle fotovoltaiik hücrelerin termal radyasyona maruz kaldıklarında ürettikleri akım ve voltaj değerlerini gösterir. Bu eğriler, cihazın termal ışıınımı nasıl dönüştürdüğünü ve verimliliğini anlamak için kullanılır.

TPC eğrileri, genellikle ışık uyarımıyla bir malzemenin fotokondüktivitesinde meydana gelen değişimleri zamanla veya sıcaklıkla nasıl bir ilişki gösterdiğini gösterir. Bu eğriler, fotokondüktivite ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi analiz eder. Malzemenin ışıkla uyarıldıktan sonra zamanla iletkenliğindeki değişimi gösterir. Çalışmamızda bu eğri bize malzemenin ömrü ve yeniden kombinasyon hızları hakkında bilgi sağlamaktadır.



Şekil 4.14: (a) TPV ve (b) TPC eğrileri; Kontrol, PMMA ve PMMA:MX bazlı

Tablo 4.7. Açık perovskite, PMMA ve PMMA filmlerinin ETL öncü çözeltisi (PCBM içinde CB) ile temas açısı (CA) ölçümleri.

Örnek	Sol Açı (°)	Sağ Açı (°)	Ortalama Açı (°)
Kaplamasız	43.06	17.56	30.31
PMMA	11.82	13.06	12.44
PMMA:MX-0.3%	13.53	11.22	12.37
PMMA:MX-1.5%	11.89	11.15	11.52

Tablo 4.8. 1 güneş simüle ışınlandırması (72 mW/cm²) altında PSC'lerin TPV ve TPC eğrilerinin uyarlanmış parametreleri. τ ve t_e , sırasıyla TPV ve TPC eğrilerinden elde edilen yeniden birleşme ve çıkarım yüklerine karşılık gelir.

Örnek	A_1	τ_1 (μs)	A_2	τ_2 (ms)	τ (ms)	t_e (μs)
Kontrol	0.37	26.3	0.75	0.88	0.88	1.47
PMMA	0.60	24.4	0.44	0.54	0.53	1.69

PMMA:MX-0.3%	0.45	24.2	0.63	0.67	0.67	1.59
PMMA:MX-1.5%	0.55	30.1	0.62	0.92	0.92	1.24
PMMA:MX-3.0%	0.45	28.7	0.71	0.80	0.80	1.16

Tablo 4.9. Perovskite/PCBM, perovskite/PMMA/PCBM ve perovskite/PMMA/PCBM filmlerinin TRPL (Zamanla Işık Salınımı) eğrilerinin uyarlanmış parametreleri.

Örnek	A ₁	τ_1 (ns)	A ₂	τ_2 (ns)	τ_s (ns)
Kontrol	41.51	111.20	57.49	2.06	108.47
PMMA	40.94	57.51	59.06	4.65	51.99
PMMA:MX-0.3%	23.76	53.71	76.24	4.13	43.90
PMMA:MX-1.5%	36.99	64.16	63.01	3.89	58.52
PMMA:MX-3.0%	38.49	82.50	61.51	3.17	77.91

SONUÇ

Elektrospinning yöntemleriyle sırasıyla PMMA/KS ve PMMA/KS/MXene içeren elektrospinning nanofiber matlar ve filmler başarıyla hazırlandı. MXene'nin her iki yöntemle hazırlanan polimer ve filmlerde amorf halde veya moleküler olarak dağılmış halde bulunduğu bulundu. Elektrospinning nanofiberler, mikro yapısıyla bağlantılı olan KS antimikrobiyal özellik gösterdi. MXene'nin PMMA fiberlerinin içindeki dağılımı ve diğer karakterizasyonları gösterildi. Elektriksel iletkenlik özelliği ile iyi derecede bilinen 2 boyutlu MXen'lerin polimerik fiberler üzerindeki iletkenlikleri gösterildi. Bu sonuçlara göre kontak lens olarak tasarlanan kompozit fiberlerin iletkenlik ve antimikrobiyal özellik olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir.

KAYNAKÇA

- Alhabeb, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S., & Gogotsi, Y. (2017).** Guidelines for Synthesis and Processing of Two-Dimensional Titanium Carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$). *Chemistry of Materials*, 29(18), 7633–7644.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02847>
- Ali, M., & Byrne, M. E. (2009).** Controlled release of high molecular weight hyaluronic Acid from molecularly imprinted hydrogel contact lenses. *Pharm. Res.*, 26(3), 714–726.
- Allhoff, F. (2009).** The coming era of nanomedicine. *American Journal of Bioethics*, 9(10), 3–11. <https://doi.org/10.1080/15265160902985027>
- Amrillah, T., Abdullah, C., Hermawan, A., Sari, F., & Alviani, V. (2022).** Towards Greener and More Sustainable Synthesis of MXenes: A Review. *Nanomaterials*, 12(23), 4280.
<https://doi.org/10.3390/nano12234280>
- Anasori, B., Xie, Y., Beidaghi, M., Lu, J., Hosler, B. C., Hultman, L., Kent, P. R. C., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2015).** Two-Dimensional, Ordered, Double Transition Metals Carbides (MXenes). *ACS Nano*, 9(10), 9507–9516.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.5b03591>
- Asgharzadeh Shishavan, A., Nordin, L., Tjossem, P., Abramoff, M. D., & Toor, F. (2016).** PMMA-based ophthalmic contact lens for vision correction of strabismus. In N. Engheta, M. A. Noginov, & N. I. Zheludev (Eds.), *Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2016*. SPIE.
- Aziza, Y., Itoi, M., Ueta, M., Inatomi, T., Kinoshita, S., & Sotozono, C. (2022).** Limbal-rigid contact lens wear for the treatment of ocular surface disorders: A review. *Eye Contact Lens*, 48(8), 313–317.
- B. UNAL. (2017).** *Elektroeği rme tekni ği ile hazırlanmış nanolifleri temel alan elektrokimyasal biyosensör geliştirilmesi.*
- Bae, S., Kang, Y.-G., Khazaei, M., Ohno, K., Kim, Y.-H., Han, M. J., Chang, K. J., & Raebiger, H. (2021).** Electronic and magnetic properties of carbide MXenes—the role of electron correlations. *Materials Today Advances*, 9, 100118.
<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100118>
- Barnett, M., & Mannis, M. J. (2011).** Contact lenses in the management of keratoconus. *Cornea*, 30(12), 1510–1516.

- Bartlett, J. D., Howes', J. F., Ghormley², N. R., Amos, J. F., Laibovitz³, R., & Horwitz', B. (1993a). *Safety and efficacy of loteprednol etabonate for treatment of papillae in contact lens-associated giant papillary conjunctivitis* (Vol. 12, Issue 4).
- Bartlett, J. D., Howes', J. F., Ghormley², N. R., Amos, J. F., Laibovitz³, R., & Horwitz', B. (1993b). *Safety and efficacy of loteprednol etabonate for treatment of papillae in contact lens-associated giant papillary conjunctivitis* (Vol. 12, Issue 4).
- Bruinsma, G. M., van der Mei, H. C., & Busscher, H. J. (2001). Bacterial adhesion to surface hydrophilic and hydrophobic contact lenses. *Biomaterials*, 22(24), 3217–3224.
- Bühler, N., Haerri, H.-P., Hofmann Manfred and Irrgang, C., Mühlebach, A., Müller, B., & Stockinger, F. (1999). Nelfilcon A, a new material for contact lenses. *Chimia (Aarau)*, 53(6), 269.
- Carnt, N., Samarawickrama, C., White, A., & Stapleton, F. (2017). The diagnosis and management of contact lens-related microbial keratitis. *Clin. Exp. Optom.*, 100(5), 482–493.
- Carvalho, I. M., Marques, C. S., Oliveira, R. S., Coelho, P. B., Costa, P. C., & Ferreira, D. C. (2015). Sustained drug release by contact lenses for glaucoma treatment—A review. *Journal of Controlled Release*, 202, 76–82.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2015.01.023>
- C.H. Dohlman. (1968). Corneal Edema. *International Ophthalmology Clinics*, 8(3).
- Chang, W.-H., Liu, P.-Y., Lin, M.-H., Lu, C.-J., Chou, H.-Y., Nian, C.-Y., Jiang, Y.-T., & Hsu, Y.-H. H. (2021). Applications of hyaluronic acid in ophthalmology and contact lenses. *Molecules*, 26(9), 2485.
- Chatterjee, S., Upadhyay, P., Mishra, M., M, S., Akshara, M. R., N, K., Zaidi, Z. S., Iqbal, S. F., & Misra, S. K. (2020). Advances in chemistry and composition of soft materials for drug releasing contact lenses. *RSC Adv.*, 10(60), 36751–36777.
- Chen, G.-Z., Chan, I.-S., Leung, L. K. K., & Lam, D. C. C. (2014a). Soft wearable contact lens sensor for continuous intraocular pressure monitoring. *Med. Eng. Phys.*, 36(9), 1134–1139.
- Chen, G.-Z., Chan, I.-S., Leung, L. K. K., & Lam, D. C. C. (2014b). Soft wearable contact lens sensor for continuous intraocular pressure monitoring. *Med. Eng. Phys.*, 36(9), 1134–1139.
- Chen, J.-S., Liu, T.-Y., Tsou, H.-M., Ting, Y.-S., Tseng, Y.-Q., & Wang, C.-H. (2017). Biopolymer brushes grown on PDMS contact lenses by in situ atmospheric plasma-induced polymerization. *J. Polym. Res.*, 24(5).
- Chen, Y., Zhang, S., Cui, Q., Ni Jiahua and Wang, X., Cheng, X., Alem, H., Tebon, P., Xu, C., Guo, C., Nasiri, R., Moreddu, R., Yetisen, A. K., Ahadian, S., Ashammakhi, N., Emaminejad, S., Jucaud, V., Dokmeci, M. R., & Khademhosseini, A. (2020).

- Microengineered poly(HEMA) hydrogels for wearable contact lens biosensing. *Lab Chip*, 20(22), 4205–4214.
- Chirica, I. M., Mirea, A. G., Neațu, Ș., Florea, M., Barsoum, M. W., & Neațu, F.** (2021). Applications of MAX phases and MXenes as catalysts. In *Journal of Materials Chemistry A* (Vol. 9, Issue 35, pp. 19589–19612). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1ta04097a>
- Cockreham, C. B., Goncharov, V. G., Hammond-Pereira, E., Reece, M. E., Strzelecki, A. C., Xu, W., Saunders, S. R., Xu, H., Guo, X., & Wu, D.** (2022). Energetic Stability and Interfacial Complexity of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXenes Synthesized with HF/HCl and CoF_2/HCl as Etching Agents. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(36), 41542–41554. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c09669>
- Dattilo, M., Patitucci, F., Prete, S., Parisi, O. I., & Puoci, F.** (2023). Polysaccharide-based hydrogels and their application as drug delivery systems in cancer treatment: A review. *J. Funct. Biomater.*, 14(2), 55.
- Deysher, G., Shuck, C. E., Hantanasirisakul, K., Frey, N. C., Foucher, A. C., Maleski, K., Sarycheva, A., Shenoy, V. B., Stach, E. A., Anasori, B., & Gogotsi, Y.** (2020). Synthesis of Mo_4VAlC_4 MAX Phase and Two-Dimensional Mo_4VC_4 MXene with Five Atomic Layers of Transition Metals. *ACS Nano*, 14(1), 204–217. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b07708>
- Emül, E.** (2022). *ELEKTROEĞİRME TEKNİĞİ İLE YEŞİL NANOTEKNOLOJİ TEMELLİ NANOFİBERLERİN ÜRETİMİ VE TIBBİ UYGULAMA ALANLARININ İNCELENMESİ*.
- Fink, J. K.** (2022). Front Matter. In *Contact Lenses*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119858072.fmatter>
- Fonn, D., Holden, B. A., Roth, P., Gooley, G., & Kenefick, J.** (1984). Comparative physiologic performance of polymethyl methacrylate and gas-permeable contact lenses. *Arch. Ophthalmol.*, 102(5), 760–764.
- Fonn, D., Holden, B. A., Roth, P., Gooley, G., Kenefick, J., & Wales, S.** (1981). Comparative Physiologic Performance of Polymethyl Methacrylate and Gas-Permeable Contact Lenses. In *National Research Symposium*. <http://archophth.jamanetwork.com/>
- Forister, J. F. Y., Forister, E. F., Yeung, K. K., Ye, P., Chung, M. Y., Tsui, A., & Weissman, B. A.** (2009). Prevalence of Contact Lens-Related Complications: UCLA Contact Lens Study. *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice*, 35(4), 176–180. <https://doi.org/10.1097/ICL.0b013e3181a7bda1>
- Fromel, M., & Pester, C. W.** (2022). Polycarbonate surface modification via aqueous SI-PET-RAFT. *Macromolecules*, 55(12), 4907–4915.

- Ghidiu, M., Lukatskaya, M. R., Zhao, M.-Q., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W.** (2014). Conductive two-dimensional titanium carbide ‘clay’ with high volumetric capacitance. *Nature*, 516(7529), 78–81. <https://doi.org/10.1038/nature13970>
- Goda, T., & Ishihara, K.** (2006). Soft contact lens biomaterials from bioinspired phospholipid polymers. *Expert Rev. Med. Devices*, 3(2), 167–174.
- Goda, T., Shimizu, T., & Ishihara, K.** (2010). Bioinspired biomaterials for soft contact lenses. In *Biomaterials and Regenerative Medicine in Ophthalmology* (pp. 263–279). Elsevier.
- Gogri, P., & Bhombal, F. A.** (2020). A new technique for fitting of tricurve rigid gas-permeable contact lens in penetrating keratoplasty eyes using Scheimpflug imaging. *Indian J. Ophthalmol.*, 68(6), 1057–1060.
- Gong, S., Zhao, F., Xu, H., Li, M., Qi, J., Wang, H., Wang, Z., Fan, X., Li, C., & Liu, J.** (2022). Iodine-Functionalized Titanium Carbide MXene with Ultra-Stable Pseudocapacitor Performance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 615, 643–649. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.013>
- Grosvenor, T., Perrigin, J., Perrigin, D., & Quintero, S.** (1989). Use of silicone-acrylate contact lenses for the control of myopia: results after two years of lens wear. *Optom. Vis. Sci.*, 66(1), 41–47.
- Gulsen, D., & Chauhan, A.** (2005). Dispersion of microemulsion drops in HEMA hydrogel: a potential ophthalmic drug delivery vehicle. *Int. J. Pharm.*, 292(1–2), 95–117.
- GÜRBÜZ, B., & ÇİFTÇİ F.** (2024). Bio-electric-electronics and tissue engineering applications of MXenes wearable materials: A review. *Chemical Engineering Journal*, 489(151230).
- Guzman-Aranguiz, A., Fonseca, B., Carracedo, G., Martin-Gil, A., Martinez-Aguila, A., & Pintor, J.** (2016). Dry Eye Treatment Based on Contact Lens Drug Delivery: A Review. In *Eye and Contact Lens* (Vol. 42, Issue 5, pp. 280–288). Lippincott Williams and Wilkins. <https://doi.org/10.1097/ICL.0000000000000184>
- Han, S., Zou, M., Pu, X., Lu, Y., Tian, Y., Li, H., Liu, Y., Wu, F., Huang, N., Shen, M., Song, E., & Wang, D.** (2023). Smart MXene-based bioelectronic devices as wearable health monitor for sensing human physiological signals. *VIEW*, 4(4). <https://doi.org/10.1002/VIW.20230005>
- Hart, J. L., Hantanasirisakul, K., Lang, A. C., Anasori, B., Pinto, D., Pivak, Y., van Omme, J. T., May, S. J., Gogotsi, Y., & Taheri, M. L.** (2019). Control of MXenes’ electronic properties through termination and intercalation. *Nature Communications*, 10(1), 522. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08169-8>
- Honda, K.** (2000). On the classification of tight contact structures I. *Geom. Topol.*, 4(1), 309–368.

- Huang, J.-F., Zhong, J., Chen, G.-P., Lin, Z.-T., Deng, Y., Liu, Y.-L., Cao Piao-Yang and Wang, B., Wei, Y., Wu, T., Yuan, J., & Jiang, G.-B. (2016). A hydrogel-based hybrid theranostic contact lens for fungal keratitis. *ACS Nano*, 10(7), 6464–6473.
- Hyon, S. H., Cha, W. I., Ikada, Y., Kita, M., Ogura, Y., & Honda, Y. (1994). Poly(vinyl alcohol) hydrogels as soft contact lens material. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.*, 5(5), 397–406.
- Iqbal, A., Sambyal, P., & Koo, C. M. (2020). 2D MXenes for Electromagnetic Shielding: A Review. *Advanced Functional Materials*, 30(47). <https://doi.org/10.1002/adfm.202000883>
- Ishihara, K., Fukazawa, K., Sharma, V., Liang, S., Shows, A., Dunbar, D. C., Zheng, Y., Ge, J., Zhang, S., Hong, Y., Shi, X., & Wu, J. Y. (2021). Antifouling silicone hydrogel contact lenses with a bioinspired 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine polymer surface. *ACS Omega*, 6(10), 7058–7067.
- Itoi, M., & Itoi, M. (2022). Management of keratoconus with corneal rigid gas-permeable contact lenses. *Eye Contact Lens*, 48(3), 110–114.
- Jeremy E., L. (n.d.). *Corneal_Edema*.
- Jin, H., Wang, K., Mao, Z., Tang, L., & Zhang, J. (2023). Structural Stability and Electronic Transport Properties of Nb₂C-MXenes under High Pressure. *Advanced Electronic Materials*, 9(4). <https://doi.org/10.1002/aelm.202201071>
- Kantarci, Z., Aksoy, S., & Hasirci, N. (1997). Estimation of monomer content in polymethyl methacrylate contact lens materials by Raman spectroscopy. *Int. J. Artif. Organs*, 20(7), 407–411.
- Karayegen, G. (2016). *Investigating the Possibility of Redirecting Nanofibers By Using Electrical Field With Electrospinning Technique*.
- Keay, L., Edwards, K., Naduvilath, T., Forde, K., & Stapleton, F. (2006). Factors affecting the morbidity of contact lens-related microbial keratids: A population study. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 47(10), 4302–4308. <https://doi.org/10.1167/iovs.06-0564>
- Keum, D. H., Kim, S.-K., Koo, J., Lee, G.-H., Jeon, C., Mok, J. W., Mun Beom Ho and Lee, K. J., Kamrani, E., Joo, C.-K., Shin, S., Sim, J.-Y., Myung, D., Yun Seok Hyun and Bao, Z., & Hahn, S. K. (2020). Wireless smart contact lens for diabetic diagnosis and therapy. *Sci. Adv.*, 6(17), eaba3252.
- Khazaei, M., Mishra, A., Venkataramanan, N. S., Singh, A. K., & Yunoki, S. (2019). Recent advances in MXenes: From fundamentals to applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 23(3), 164–178. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2019.01.002>

- Khazaei, M., Ranjbar, A., Arai, M., Sasaki, T., & Yunoki, S. (2017). Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(10), 2488–2503. <https://doi.org/10.1039/C7TC00140A>
- Khazaei, M., Ranjbar, A., Esfarjani, K., Bogdanovski, D., Dronskowski, R., & Yunoki, S. (2018). Insights into exfoliation possibility of MAX phases to MXenes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(13), 8579–8592. <https://doi.org/10.1039/c7cp08645h>
- Kidane, A., Szabocsik, J. M., & Park, K. (1998). Accelerated study on lysozyme deposition on poly(HEMA) contact lenses. *Biomaterials*, 19(22), 2051–2055.
- Kita, M., Ogura, Y., Honda, Y., Hyon, S. H., & Cha 2nd, W. and I. Y. (1990). Evaluation of polyvinyl alcohol hydrogel as a soft contact lens material. *Arbeitsphysiologie*, 228(6), 533–537.
- Kodjikian, L., Casoli-Bergeron, E., Malet, F., Janin-Manificat, H., Freney Jean and Burillon, C., Colin, J., & Steghens, J.-P. (2008a). Bacterial adhesion to conventional hydrogel and new silicone-hydrogel contact lens materials. *Arbeitsphysiologie*, 246(2), 267–273.
- Kodjikian, L., Casoli-Bergeron, E., Malet, F., Janin-Manificat, H., Freney Jean and Burillon, C., Colin, J., & Steghens, J.-P. (2008b). Bacterial adhesion to conventional hydrogel and new silicone-hydrogel contact lens materials. *Arbeitsphysiologie*, 246(2), 267–273.
- Kojima, T. (2018). Contact lens-associated dry eye disease: Recent advances worldwide and in Japan. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 59(14 Special Issue), DES102–DES108. <https://doi.org/10.1167/iovs.17-23685>
- Koruga, uro, Stamenković, D., Djuricic, I., Mileusnic, I., Šakota, J., Bojović, B., & Golubovoć, Z. (2013a). Nanophotonic rigid contact lenses: Engineering and characterization. *Adv. Mat. Res.*, 633, 239–252.
- Koruga, uro, Stamenković, D., Djuricic, I., Mileusnic, I., Šakota, J., Bojović, B., & Golubovoć, Z. (2013b). Nanophotonic rigid contact lenses: Engineering and characterization. *Adv. Mat. Res.*, 633, 239–252.
- Kuriaki M., Hasebe M., Miwa Y., & Mizutani Y. (1985). Application and effect of plasma polymerization for silicone rubber contact lens. *KOBUNSHI RONBUNSHU*, 42(11), 841–847.
- La Porta Weber, S., Becco De Souza, R., Gomes, J. Á. P., & Hofling-Lima, A. L. (2016). The Use of the Esclera Scleral Contact Lens in the Treatment of Moderate to Severe Dry Eye Disease. *American Journal of Ophthalmology*, 163, 167-173.e1. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2015.11.034>
- Ladage, P. M., Yamamoto, K., Ren, D. H., Li, L., Jester, J. V, Petroll, W. M., & Cavanagh, H. D. (2001). Effects of rigid and soft contact lens daily wear on corneal epithelium, tear lactate dehydrogenase, and bacterial binding to exfoliated epithelial cells. *Ophthalmology*, 108(7), 1279–1288. [https://doi.org/10.1016/S0161-6420\(01\)00639-X](https://doi.org/10.1016/S0161-6420(01)00639-X)

- Li, J., Wang, H., & Xiao, X.** (2020). Intercalation in Two-Dimensional Transition Metal Carbides and Nitrides (MXenes) toward Electrochemical Capacitor and Beyond. *ENERGY & ENVIRONMENTAL MATERIALS*, 3(3), 306–322. <https://doi.org/10.1002/eem2.12090>
- Li, J., Wang, X., Sun, W., Maleski, K., Shuck, C. E., Li, K., Urbankowski, P., Hantanasirisakul, K., Wang, X., Kent, P., Wang, H., & Gogotsi, Y.** (2021). Intercalation-Induced Reversible Electrochromic Behavior of Two-Dimensional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene in Organic Electrolytes. *ChemElectroChem*, 8(1), 151–156. <https://doi.org/10.1002/celec.202001449>
- Li, X., Pan, J., Wu, Y., Xing, H., An, Z., Shi, Z., Lv, J., Zhang, F., Jiang, J., Wang, D., Han, R. P. S., Su, B., Lu, Y., & Liu, Q.** (2023). MXene-based wireless facemask enabled wearable breath acetone detection for lipid metabolic monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*, 222, 114945. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114945>
- Lim, C. H. L., Carnt, N. A., Farook, M., Lam, J., Tan, D. T., Mehta, J. S., & Stapleton, F.** (2016). Risk factors for contact lens-related microbial keratitis in Singapore. *Eye*, 30(3), 447–455. <https://doi.org/10.1038/eye.2015.250>
- Lim, K. R. G., Shekhirev, M., Wyatt, B. C., Anasori, B., Gogotsi, Y., & Seh, Z. W.** (2022). Fundamentals of MXene synthesis. *Nature Synthesis*, 1(8), 601–614. <https://doi.org/10.1038/s44160-022-00104-6>
- Liu, D., Cao, Y., Jiang, P., Wang, Y., Lu, Y., Ji, Z., Wang, X., & Liu, W.** (2023). Tough, transparent, and slippery PVA hydrogel led by syneresis. *Small*, 19(14), e2206819.
- Liu, H., Wang, Z., Wang, J., Yang, Y., Wu, S., You, C., Tian, N., & Li, Y.** (2022). Structural evolution of MXenes and their composites for electromagnetic interference shielding applications. *Nanoscale*, 14(26), 9218–9247. <https://doi.org/10.1039/D2NR02224A>
- Liu, L., Orbay, M., Luo, S., Duluard, S., Shao, H., Harmel, J., Rozier, P., Taberna, P.-L., & Simon, P.** (2022). Exfoliation and Delamination of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Prepared via Molten Salt Etching Route. *ACS Nano*, 16(1), 111–118. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08498>
- Manawi, Y., Ihsanullah, Samara, A., Al-Ansari, T., & Atieh, M.** (2018). A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. *Materials*, 11(5), 822. <https://doi.org/10.3390/ma11050822>
- Mandathara, P. S., Fatima, M., Taureen, S., Dumpati, S., Ali, M. H., & Rathi, V.** (2013). RGP contact lens fitting in keratoconus using FITSCAN technology. *Cont. Lens Anterior Eye*, 36(3), 126–129.
- Martin, R.** (2009). Corneal conjunctivalization management with high Dk RGP contact lenses. *Cont. Lens Anterior Eye*, 32(3), 147–150.

- McArthur, S. L., McLean, K. M., & St. John Heather A W and Griesser, H. J.** (2001). XPS and surface-MALDI-MS characterisation of worn HEMA-based contact lenses. *Biomaterials*, 22(24), 3295–3304.
- McDermott, M. L., & Chandler, J. W.** (1989). Therapeutic uses of contact lenses. *Surv. Ophthalmol.*, 33(5), 381–394.
- McMahon, T. T.** (2022a). Contact Lenses. In *Albert and Jakobiec's Principles and Practice of Ophthalmology* (pp. 1023–1035). Springer International Publishing.
- McMahon, T. T.** (2022b). Contact Lenses. In *Albert and Jakobiec's Principles and Practice of Ophthalmology* (pp. 1023–1035). Springer International Publishing.
- Mohammadi, S., Jones, L., & Gorbett, M.** (2014). Extended latanoprost release from commercial contact lenses: in vitro studies using corneal models. *PLoS One*, 9(9), e106653.
- Mohan, T., Čas, A., Bračič, M., Plohl, O., Vesel, A., Rupnik, M., Zemljič, L. F., & Rebol, J.** (2019). Highly protein repellent and antiadhesive polysaccharide biomaterial coating for urinary catheter applications. *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 5(11), 5825–5832.
- Moriyama, A. S., & Hofling-Lima, A. L.** (2008). Contact lens-associated microbial keratitis. *Arq. Bras. Oftalmol.*, 71(6), 32–36.
- Mosuela, R., Mustafa, S., Gould, S., Hassanin, H., Alany, R. G., & ElShaer, A.** (2018). Adherence of *Pseudomonas aeruginosa* onto surfactant-laden contact lenses. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 163, 91–99.
- Murali, G., Rawal, J., Modigunta, J. K. R., Park, Y. H., Lee, J.-H., Lee, S.-Y., Park, S.-J., & In, I.** (2021). A review on MXenes: new-generation 2D materials for supercapacitors. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(22), 5672–5693. <https://doi.org/10.1039/D1SE00918D>
- Mutlu, Z., Shams Es-haghi, S., & Cakmak, M.** (2019). Recent Trends in Advanced Contact Lenses. In *Advanced Healthcare Materials* (Vol. 8, Issue 10). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adhm.201801390>
- Mutlu, Z., Shams Es-haghi, S., & Cakmak, M.** (2019). Recent Trends in Advanced Contact Lenses. *Advanced Healthcare Materials*, 8(10). <https://doi.org/10.1002/adhm.201801390>
- Möhlebach, A., Müller, B., Pharisa, C., Hofmann, M., Seiferling, B., & Guerry, D.** (1997). New water-soluble photo crosslinkable polymers based on modified poly(vinyl alcohol). *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.*, 35(16), 3603–3611.
- Naguib, M., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y.** (2021). Ten Years of Progress in the Synthesis and Development of MXenes. *Advanced Materials*, 33(39). <https://doi.org/10.1002/adma.202103393>

- Namrata, S., Ramkishor, S., K, P., & Jeewan S, T. (n.d.). *Contact lenses for the treatment of ocular surface diseases*. https://doi.org/https://doi.org/10.4103/ijo.ijo_17_23
- Noor, U., Mughal, M. F., Ahmed, T., Farid, M. F., Ammar, M., Kulsum, U., Saleem, A., Naeem, M., Khan, A., Sharif, A., & Waqar, K. (2023). Synthesis and applications of MXene-based composites: a review. *Nanotechnology*, 34(26), 262001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/acc7a8>
- Nosch, D. S., Käser E., Christen, A., Schinzel, J., & Joos, R. E. (2023). Corneal sensitivity in silicone hydrogel and rigid gas permeable contact lens wear. *Cont. Lens Anterior Eye*, 46(5), 101888.
- Olivieri, M., Cristaldi, M., Pezzino Salvatore and Spampinato, G., Corsaro, R., Anfuso, C. D., Lupo, G., & Rusciano, D. (2021). Poly 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine protects corneal cells and contact lenses from desiccation damage. *Optom. Vis. Sci.*, 98(2), 159–169.
- Papas, E. B., Ciolino, J. B., Jacobs, D., Miller, W. S., Pult, H., Sahin, A., Srinivasan, S., Tauber, J., Wolffsohn, J. S., & Nelson, J. D. (2013). The TFOS International Workshop on Contact Lens Discomfort: Report of the management and therapy subcommittee. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 54(11). <https://doi.org/10.1167/iovs.13-13166>
- Peng, J., Chen, X., Ong, W.-J., Zhao, X., & Li, N. (2019). Surface and Heterointerface Engineering of 2D MXenes and Their Nanocomposites: Insights into Electro- and Photocatalysis. *Chem*, 5(1), 18–50. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2018.08.037>
- Phan, C.-M., Subbaraman, L. N., & Jones, L. W. (2019). Uptake and release of polyvinyl alcohol from hydrogel daily disposable contact lenses. *Optom. Vis. Sci.*, 96(3), 180–186.
- Phan, C.-M., Walther, H., Riederer, D., Lau, C., Lorenz, K. O., Subbaraman, L. N., & Jones, L. (2019). Analysis of polyvinyl alcohol release from commercially available daily disposable contact lenses using an in vitro eye model. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, 107(5), 1662–1668.
- Pourshaban, E., Banerjee, A., Deshpande, A., Ghosh, C., Karkhanis, M. U., Hasan, R., Rock, N. D., Kim, H., & Mastrangelo, C. H. (2022). Flexible and semi-transparent silicon solar cells as a power supply to smart contact lenses. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 4(8), 4016–4022.
- Rajavel, K., Shen, S., Ke, T., & Lin, D. (2019). Achieving high bactericidal and antibiofouling activities of 2D titanium carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) by delamination and intercalation. *2D Materials*, 6(3), 035040. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab23ce>
- Roth, H. W. (1995). [Contact lenses]. *Medizinische Monatsschrift Fur Pharmazeuten*, 18(1), 3–12.

- Sarac, B., Yücer, S., Sahin, H., Unal, M., & Ciftci, F.** (2024). Wearable and implantable bioelectronic: Biosensing contact lens and applications. *Chemical Engineering Journal*, 491, 152016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152016>
- Schafer, J., Reindel, W., Steffen, R., Mosehauer, G., & Chinn, J.** (2018). Use of a novel extended blink test to evaluate the performance of two polyvinylpyrrolidone-containing, silicone hydrogel contact lenses. *Clin. Ophthalmol.*, 12, 819–825.
- Shaker, L. M., Al-Amiery, A. A., & Al-Azzawi, W. K.** (2024). A clearer vision: a mini-review on contact lenses. *J. Opt.*, 53(2), 949–958.
- Sharma, S., Garg, P., & Rao, G. N.** (2000a). Patient characteristics, diagnosis, and treatment of non-contact lens related Acanthamoeba keratitis. In *Br J Ophthalmol* (Vol. 84). <http://bjo.bmj.com/>
- Sharma, S., Garg, P., & Rao, G. N.** (2000b). Patient characteristics, diagnosis, and treatment of non-contact lens related Acanthamoeba keratitis. In *Br J Ophthalmol* (Vol. 84). <http://bjo.bmj.com/>
- Shimada, T., Takenaka, N., Ando, Y., Otani, M., Okubo, M., & Yamada, A.** (2022). Relationship between Electric Double-Layer Structure of MXene Electrode and Its Surface Functional Groups. *Chemistry of Materials*, 34(5), 2069–2075. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c03328>
- Shimizu, T., Goda, T., Minoura, N., Takai, M., & Ishihara, K.** (2010). Super-hydrophilic silicone hydrogels with interpenetrating poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine) networks. *Biomaterials*, 31(12), 3274–3280.
- Sinha, R., & Dada Kumar, V.** (n.d.). *Textbook_of_Contact_Lenses*.
- Sobyra, T. B., Mathis, T. S., Gogotsi, Y., & Fenter, P.** (2021). Probing the *In Situ* Pseudocapacitive Charge Storage in Ti_3C_2 MXene Thin Films with X-ray Reflectivity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(36), 43597–43605. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c10959>
- Stapleton, F.** (1992). Nonulcerative Complications of Contact Lens Wear. *Archives of Ophthalmology*, 110(11), 1601. <https://doi.org/10.1001/archopht.1992.01080230101031>
- Stapleton, F., & Carnt, N.** (2012). Contact lens-related microbial keratitis: how have epidemiology and genetics helped us with pathogenesis and prophylaxis. *Eye*, 26(2), 185–193. <https://doi.org/10.1038/eye.2011.288>
- Stapleton, F., Keay, L., Edwards, K., Naduvilath, T., Dart, J. K. G., Brian, G., & Holden, B. A.** (2008). The Incidence of Contact Lens–Related Microbial Keratitis in Australia. *Ophthalmology*, 115(10), 1655–1662. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2008.04.002>

- Sweeney, D. F.** (2013). Have Silicone Hydrogel Lenses Eliminated Hypoxia? *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice*, 39(1), 53–60.
<https://doi.org/10.1097/ICL.0b013e31827c7899>
- Tang, X., Guo, X., Wu, W., & Wang, G.** (2018). 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) as High-Performance Electrode Materials for Lithium-Based Batteries. *Advanced Energy Materials*, 8(33). <https://doi.org/10.1002/aenm.201801897>
- Tang, Y., Yang, C., Xu, X., Kang, Y., Henzie, J., Que, W., & Yamauchi, Y.** (2022). MXene Nanoarchitectonics: Defect-Engineered 2D MXenes towards Enhanced Electrochemical Water Splitting. *Advanced Energy Materials*, 12(12).
<https://doi.org/10.1002/aenm.202103867>
- Thean, J. H. J., & McNab, A. A.** (2004). Blepharoptosis in RGP and PMMA hard contact lens wearers. *Clin. Exp. Optom.*, 87(1), 11–14.
- Tomić, M. M., Conte, M., Munćan Jelena S and Stamenković, D. M., & Koruga, uro L.** (2014). Investigation of influence of nanophotonic gas permeable contact lenses on saline by aquaphotomics and OMI spectroscopy. *FME Trans.*, 42(1), 82–87.
- Tran, N.-P.-D., & Yang, M.-C.** (2019a). Synthesis and characterization of silicone contact lenses based on TRIS-DMA-NVP-HEMA hydrogels. *Polymers (Basel)*, 11(6), 944.
- Tran, N.-P.-D., & Yang, M.-C.** (2019b). Synthesis and characterization of silicone contact lenses based on TRIS-DMA-NVP-HEMA hydrogels. *Polymers (Basel)*, 11(6), 944.
- Tran, N.-P.-D., & Yang, M.-C.** (2020). The ophthalmic performance of hydrogel contact lenses loaded with silicone nanoparticles. *Polymers (Basel)*, 12(5), 1128.
- Tran, V. A., Tran, N. T., Doan, V. D., Nguyen, T.-Q., Pham Thi, H. H., & Vo, G. N. L.** (2023). Application Prospects of MXenes Materials Modifications for Sensors. *Micromachines*, 14(2), 247. <https://doi.org/10.3390/mi14020247>
- Vaghasiya, J. V., Mayorga-Martinez, C. C., Vyskočil, J., & Pumera, M.** (2022). Flexible wearable MXene Ti3C2-Based power patch running on sweat. *Biosensors and Bioelectronics*, 205, 114092. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114092>
- van der Worp, E., Bornman, D., Ferreira Daniela Lopes and Faria-Ribeiro, M., Garcia-Porta, N., & González-Mejome, J. M.** (2014). Modern scleral contact lenses: A review. *Cont. Lens Anterior Eye*, 37(4), 240–250.
- Waghmare, S. V., & Jeria, S.** (2022a). A Review of Contact Lens-Related Risk Factors and Complications. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.30118>
- Waghmare, S. V., & Jeria, S.** (2022b). A Review of Contact Lens-Related Risk Factors and Complications. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.30118>
- Wang, C., Wei, S., Zhang, P., Zhu, K., Song, P., Chen, S., & Song, L.** (2020). Cation-intercalated engineering and X-ray absorption spectroscopic characterizations of two

- dimensional MXenes. *Chinese Chemical Letters*, 31(4), 969–979.
<https://doi.org/10.1016/j.cclet.2019.08.045>
- Wang, D., Zhou, C., Filatov, A. S., Cho, W., Lagunas, F., Wang, M., Vaikuntanathan, S., Liu, C., Klie, R. F., & Talapin, D. V.** (2023). Direct synthesis and chemical vapor deposition of 2D carbide and nitride MXenes. *Science*, 379(6638), 1242–1247. <https://doi.org/10.1126/science.add9204>
- Wang, X., Shi, Y., Qiu, J., & Wang, Z.** (2023). Molten-salt etching synthesis of delaminatable MXenes. *Chemical Communications*, 59(34), 5063–5066.
<https://doi.org/10.1039/D3CC00746D>
- Weeks, A., Luensmann, D., Boone, A., Jones, L., & Sheardown, H.** (2012). Hyaluronic acid as an internal wetting agent in model DMAA/TRIS contact lenses. *J. Biomater. Appl.*, 27(4), 423–432.
- Weeks, A., Subbaraman, L. N., Jones, L., & Sheardown, H.** (2013). Physical entrapment of hyaluronic acid during synthesis results in extended release from model hydrogel and silicone hydrogel contact lens materials. *Eye Contact Lens*, 39(2), 179–185.
- Wei, Y., Soomro, R. A., Xie, X., & Xu, B.** (2021). Design of efficient electrocatalysts for hydrogen evolution reaction based on 2D MXenes. *Journal of Energy Chemistry*, 55, 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.06.069>
- Wei, Y., Zhang, P., Soomro, R. A., Zhu, Q., & Xu, B.** (2021). Advances in the Synthesis of 2D MXenes. *Advanced Materials*, 33(39). <https://doi.org/10.1002/adma.202103148>
- WICHTERLE, O., & LIM, D.** (1960). Hydrophilic Gels for Biological Use. *Nature*, 185(4706), 117–118. <https://doi.org/10.1038/185117a0>
- Won, J. S., Prasad, C., Jeong, S.-G., Rosaiah, P., Reddy, A. S., Ahmad, Z., Sangaraju, S., & Choi, H. Y.** (2023). Recent advances in the development of MXenes/cellulose based composites: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240, 124477. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124477>
- Xie, K., Wang, J., Xu, S., Hao, W., Zhao, L., Huang, L., & Wei, Z.** (2023). Application of Two-Dimensional MXene materials in sensors. *Materials & Design*, 228, 111867. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111867>
- Xie, X., & Zhang, N.** (2020). Positioning MXenes in the Photocatalysis Landscape: Competitiveness, Challenges, and Future Perspectives. *Advanced Functional Materials*, 30(36). <https://doi.org/10.1002/adfm.202002528>
- Xu, C., Wang, L., Liu, Z., Chen, L., Guo, J., Kang, N., Ma, X.-L., Cheng, H.-M., & Ren, W.** (2015). Large-area high-quality 2D ultrathin Mo₂C superconducting crystals. *Nature Materials*, 14(11), 1135–1141. <https://doi.org/10.1038/nmat4374>

- Xu, C. Y., Inai, R., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2004). Aligned biodegradable nanofibrous structure: A potential scaffold for blood vessel engineering. *Biomaterials*, 25(5), 877–886. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00593-3](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00593-3)
- Xu, J., Peng, T., Qin, X., Zhang, Q., Liu, T., Dai, W., Chen, B., Yu, H., & Shi, S. (2021). Recent advances in 2D MXenes: preparation, intercalation and applications in flexible devices. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(25), 14147–14171. <https://doi.org/10.1039/D1TA03070A>
- Xuan, J., Wang, Z., Chen, Y., Liang, D., Cheng, L., Yang, X., Liu, Z., Ma, R., Sasaki, T., & 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. <https://doi.org/10.1002/anie.201606643>
- Yuan, Z., Ju, S., Li, W., Guo, H., Chen, K., Yue, M., Yu, X., & Wang, Y. (2022). Alkali ions pre-intercalated 3D crinkled Ti₃C₂T_x MXene architectures for advanced sodium storage. *Chemical Engineering Journal*, 450, 138453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138453>
- Zainodin, E. L., Ahmad Najmee, N. A., Hamzah, F. N., & Saliman, N. H. (2021). Ocular Complications in Contact Lens Wear and the Risk Factors: A retrospective analysis. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 6(17), 111–116. <https://doi.org/10.21834/ebpj.v6i17.2881>
- Zekman, T. N., & Sarnat, L. A. (1972). Clinical evaluation of the silicone corneal contact lens. *Am. J. Ophthalmol.*, 74(3), 534–537.
- Zhang, C. (John), Kim, S. J., Ghidui, M., Zhao, M., Barsoum, M. W., Nicolosi, V., & Gogotsi, Y. (2016). Layered Orthorhombic Nb₂O₅@Nb₄C₃T_x and TiO₂@Ti₃C₂T_x Hierarchical Composites for High Performance Li-ion Batteries. *Advanced Functional Materials*, 26(23), 4143–4151. <https://doi.org/10.1002/adfm.201600682>
- Zhang, T., Pan, L., Tang, H., Du, F., Guo, Y., Qiu, T., & Yang, J. (2017). Synthesis of two-dimensional Ti₃C₂T_x MXene using HCl+LiF etchant: Enhanced exfoliation and delamination. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 818–826. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.127>
- Zhang, X.-H., & Li, X. (2020). Effect of rigid gas permeable contact lens on keratoconus progression: a review. *Int. J. Ophthalmol.*, 13(7), 1124–1131.
- Zhang, Y., Yan, Y., Qiu, H., Ma, Z., Ruan, K., & Gu, J. (2022). A mini-review of MXene porous films: Preparation, mechanism and application. *Journal of Materials Science & Technology*, 103, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.08.001>
- Zhao, L., Wang, H., Feng, C., Song, F., & Du, X. (2021). Preparation and evaluation of starch hydrogel/contact lens composites as epigallocatechin gallate delivery systems for inhibition of bacterial adhesion. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 9, 759303.

- Zhou, A., Liu, Y., Li, S., Wang, X., Ying, G., Xia, Q., & Zhang, P. (2021). From structural ceramics to 2D materials with multi-applications: A review on the development from MAX phases to MXenes. In *Journal of Advanced Ceramics* (Vol. 10, Issue 6, pp. 1194–1242). Tsinghua University. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0535-5>
- Asif, U. A., Mahmood, K., Naqvi, S. R., Mehran, M. T., Noor, T. 2023. "Development of high-capacity surface-engineered MXene composite for heavy metal Cr (VI) removal from industrial wastewater". *Chemosphere*, 326.
- Azeez, N. R., Salih, S. S., Kadhom, M., Mohammed, H. N., Ghosh, T. K. 2024. "Enhanced termination of zinc and cadmium ions from wastewater employing plain and chitosan-modified mxenes: synthesis, characterization, and adsorption performance". *Green Chemical Engineering*, 5(3), 339–347.
- Bukhari, A., Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A., Zain, H., Muhammad, S., ... Hussain, S. 2023. "Simultaneous removal of Norfloxacin, Ciprofloxacin, and copper from aqueous solution by chitosan and MXene functionalized graphene oxide ternary composite based on anion-synergistic interaction". *Chemical Engineering Journal*, 474.
- Iravani, P., Iravani, S., Varma, R. S. 2022. "MXene-Chitosan Composites and Their Biomedical Potentials". *Micromachines*.
- Jamaluddin, N. S., Alias, N. H., Samitsu, S., Othman, N. H., Jaafar, J., Marpani, F., ... Tan, Y. Z. 2022. "Efficient chromium (VI) removal from wastewater by adsorption-assisted photocatalysis using MXene". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6).
- Kannan, K., Sliem, M. H., Abdullah, A. M., Sadasivuni, K. K., Kumar, B. 2020. "Fabrication of zno-fe-mxene based nanocomposites for efficient co2 reduction". *Catalysts*, 10(5).
- Li, J., Xia, F., Liu, Y., Wang, J., Su, X., Li, Z., Peng, H. 2024. "Synthesis of MXene-Based functional coatings on rigid polyurethane foam surfaces: A comparative study of layer-by-layer self-assembly and hydrothermal methods". *Polymer Degradation and Stability*, 220.
- Li, Y., Tian, P., Cao, H., Wang, Y., Zhao, X., Han, S., Wang, C. 2024. "Remarkable enhancement of corrosion resistance and tribological properties of chitosan-MXene based hydrogel coating on the surface of Ti6Al4V alloy". *Tribology International*, 192.
- Lin, B., Yuen, A. C. Y., Li, A., Zhang, Y., Chen, T. B. Y., Yu, B., ... Wang, C. H. 2020. "MXene/chitosan nanocoating for flexible polyurethane foam towards remarkable fire hazards reductions". *Journal of Hazardous Materials*, 381.
- Mayerberger, E. A., Street, R. M., McDaniel, R. M., Barsoum, M. W., Schauer, C. L. 2018. "Antibacterial properties of electrospun Ti3C2Tz (MXene)/chitosan nanofibers". *RSC Advances*, 8(62), 35386–35394.
- Pešić, I., Petrović, M., Radojević, V. 2021. "Influence of synthesis parameters on mechanical properties of nanocomposite PMMA-MXene". *Tehnika*, 76(5), 545–549.
- Pešić, I., Petrović, M., Vuksanović, M., Popović, M., Rabasović, M. S., Šević, D., Radojević, V. 2022. "Structural, optical, and mechanical characterization of PMMA-MXene composites functionalized with MEMO silane". *Nanocomposites*, 8(1), 215–226.
- Shen, Z., Chen, W., Xu, H., Yang, W., Kong, Q., Wang, A., ... Shang, J. 2019. "Fabrication of a novel antifouling polysulfone membrane with in situ embedment of mxene nanosheets". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23).

- Ul Haq, Y., Murtaza, I., Mazhar, S., Ahmad, N., Qarni, A. A., Ul Haq, Z., ... Iqbal, M. 2020. "Investigation of improved dielectric and thermal properties of ternary nanocomposite PMMA/MXene/ZnO fabricated by in-situ bulk polymerization". *Journal of Applied Polymer Science*, 137(40).
- Wan, H., Nan, L., Geng, H., Zhang, W., Shi, H. 2021. "Green synthesis of a novel mxene–cs composite applied in treatment of cr(Vi) contaminated aqueous solution". *Processes*, 9(3).
- Wang, B., Lai, X., Li, H., Jiang, C., Gao, J., Zeng, X. 2021. "Multifunctional MXene/Chitosan-Coated Cotton Fabric for Intelligent Fire Protection". *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13(19), 23020–23029.
- Wang, R., Cao, H., Yao, C., Peng, C., Qiu, J., Dou, K., ... Wang, W. 2023. "Construction of alkalized MXene-supported CoFe₂O₄/CS composites with super-strong adsorption capacity to remove toxic dyes from aqueous solution". *Applied Surface Science*, 624.
- Wu, Z., Li, J., Zhang, S., Yan, J., Gao, J., Zheng, N., Xue, H. 2022. "Chitosan assisted MXene decoration onto polymer fabric for high efficiency solar driven interfacial evaporation of oil contaminated seawater". *Journal of Colloid and Interface Science*, 622, 169–180.
- Xu, S., Liu, C., Jiang, X., Wang, X., Zhang, S., Zhang, Y., ... Zhang, J. 2023. "Ti₃C₂ MXene promoted Fe³⁺/H₂O₂ fenton oxidation: Comparison of mechanisms under dark and visible light conditions". *Journal of Hazardous Materials*, 444.
- Xu, Z., Sun, H., Huo, Y., Jia, M., Chen, Z., Yang, Y. 2024. "Ti₃C₂T_x MXene modified polyethylene fibers for enhancing interface properties of strain-hardening cementitious composites". *Cement and Concrete Composites*, 145.
- Yang, Q., Zhang, J., Yin, H., Guo, J., Lv, S., Li, Y. 2024. "MXene/Cellulose Hydrogel Composites: Preparation and Adsorption Properties of Pb²⁺". *Polymers*, 16(2).