



**AKILLI AMBALAJ OLARAK KULLANILMAK
ÜZERE ELEKTRO ÜFLEME YÖNTEMİ İLE
NANOLİFLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**2025
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ**

Özge ATAY

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Yasin AKGÜL
Doç. Dr. Cemhan DOĞAN**

**AKILLI AMBALAJ OLARAK KULLANILMAK ÜZERE ELEKTRO
ÜFLEME YÖNTEMİ İLE NANOLİFLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Özge ATAY

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Yasin AKGÜL
Doç. Dr. Cemhan DOĞAN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2025**

Özge ATAY tarafından hazırlanan “AKILLI AMBALAJ OLARAK KULLANILMAK ÜZERE ELEKTRO ÜFLEME YÖNTEMİ İLE NANOLİFLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yasin AKGÜL
Tez Danışmanı, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Cemhan DOĞAN
Tez İkinci Danışmanı, Biyoloji Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 06/01/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yusuf POLAT (ETÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Özge ATAY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKILLI AMBALAJ OLARAK KULLANILMAK ÜZERE ELEKTRO ÜFLEME YÖNTEMİ İLE NANOLİFLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Özge ATAY

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Doç. Dr. Yasin AKGÜL

Doç. Dr. Cemhan DOĞAN

Ocak 2025, 92 sayfa

Bu çalışmada, 2023'te Nobel Kimya Ödülü'ne konu olan karbon noktalar (CD'ler), biyoaktivite, toksik olmama, zararsızlık ve biyoyumluluk gibi özellikleriyle diğer birçok alanın yanı sıra aktif gıda paketlenme alanı için de umut vaat eden malzemelerdir. Bu nedenle, son yıllarda CD'leri içeren kompozit filmler, gıda ambalajı uygulamaları için araştırılmaktadır. Ancak, bildiğimiz kadarıyla, film yapıları ile kıyaslandığında üstün özellikler gösteren nanofibröz matlara karbon noktaları eklenen herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmada, atık malzeme olan kabak kullanılarak hidrotermal karbonizasyon yöntemiyle CD'ler üretilmiştir. Ardından, polivinil alkol (PVA) ve karboksimetil selüloz (CMC) karışımından, atık kabak karbon noktalarını (SPCD'ler) içeren kompozit nanofibröz matlar elektro-üfleme tekniği ile üretilmiştir. Sonuçlar, SPCD'lerin kondrosit hücreleri ve akciğer hücre tipleri üzerinde

çok düşük toksisite gösterdiğini ve bu nedenle SPCD'lerin gıda ambalajı uygulamalarında güvenle kullanılabileceğini ortaya koymuştur. SPCD'lerin nanofibröz matlara eklenmesi, antioksidan aktivitede, E. coli ve S. aureus'a karşı inhibe edici etkilerde ve mekanik dayanıklılıkta artışa yol açmıştır. Ceviz yağı üzerinde yapılan gerçek gıda denemeleri, SPCD'li kompozit nanofibröz matların, canlı bakteri sayısında büyük bir azalma ve lipit oksidasyonunda düşüş sağladığını, dolayısıyla ürünün dayanıklılığını artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu nanofibröz matlar, 42. günün sonunda toprakta tamamen biyolojik olarak çözünmüştür. Bu nedenle, bu yeni kompozit nanofibröz matların, sürdürülebilir aktif gıda ambalajı için uygulanabilir bir gelecek sunduğu ve ambalaj endüstrisi için kapsamlı ve pratik bir çözüm önerdiği söylenebilir.

Anahtar Sözcükler : Aktif gıda ambalajı, Elektro-üfleme, Karbon noktaları, Polivinil Alkol, Karboksimetil selüloz, Nanofiberler.

Bilim Kodu : 92513

ABSTRACT

MasterThesis

PRODUCTION AND CHARACTERISATION OF NANOFIBRES BY ELECTRO BLOWING METHOD TO BE USED AS SMART PACKAGING

Özge ATAY

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Write Biomedical Engineering**

Thesis Advisors:

Assoc. Prof. Dr. Yasin AKGÜL

Assoc. Prof. Dr. Cemhan DOĞAN

January 2025, 92 pages

In this study, Carbon dots (CDs), which are the subject of the Nobel Prize in chemistry in 2023, are promising materials for the field of active food packaging as well as many other fields with properties such as bioactivity, non-toxicity, harmlessness, and biocompatibility. Therefore, in recent years, composite films containing CDs have been investigated for food packaging applications. However, as far as we know, no study has been carried out in which carbon dots are added to nanofibrous mats, which show superior properties compared to film structures. In this study, CDs were produced via hydrothermal carbonization from the waste material, the spent pumpkin. Then, composite nanofibrous mats from a blend of polyvinyl alcohol (PVA) and carboxymethyl cellulose (CMC), incorporating spent pumpkin carbon dots (SPCDs) were fabricated via the electro-blowing technique. Results showed that SPCDs performed very low toxicity on chondrocyte and lung cell types, indicating that SPCDs

can be safely used in food packaging applications. Addition of SPCDs into nanofibrous mats led to increase in an antioxidant activity, inhibitory effects against both *E. coli* and *S. aureus* and mechanical strength. Conducting real food trials with composite nanofibrous mats, on walnut oils disclosed the large reduction in viable bacteria count and lipid oxidation, consequently extending the durability of the product. Also, these nanofibrous mats were completely degraded in the soil at the end of the 42nd day. Therefore, it can be said that this novel composite nanofibrous mats represent a viable future for sustainable active food packaging and offers a comprehensive and practical answer for the packaging industry.

Key Word : Active food packaging, Electro-blowing, Carbon dots, Polyvinyl alcohol, Carboxymethyl cellulose, Nanofibers.

Science Code : 92513

TEŞEKKÜR

Tez çalışması için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesiyle aşmamda yardımcı olan danışmam hocam Doç. Dr. Yasin AKGÜL'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam sırasında benden yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Cemhan DOĞAN'a teşekkür ederim.

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Proje Koordinasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: KBUBAP-23-YL-113). Uygulama çalışmaları için Nurcan DOĞAN'a ve MTT çalışmaları için Ali AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında bana destek veren aileme ve eşim Ahmet Faik ATAY'a sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
NANOLİF VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ	5
2.1. NANOLİF KAVRAMI VE ÖZELLİKLERİ	5
2.2. NANOLİF ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER	6
2.3. NANOLİF ÜRETİM TEKNİKLERİ	8
2.3.1. Elektrospinning (Elektro İplik Çekim) Yöntemi	8
2.3.2. Elektro Üfleme Yöntemi.....	10
2.3.3. Eriyikten Üfleme Yöntemi	11
2.3.4. Çözeltilerden Üfleme Yöntemi	13
2.3.5. Elektro Eğirme Yöntemi.....	13
2.4. NANOLİFLERİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI.....	14
2.5. NANOLİFLERİN KULLANIM ALANLARI.....	16
BÖLÜM 3.	23
KARBON NOKTALARI.....	23
3.1. KARBON NOKTALARIN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ	23
3.2. KARBON NOKTA ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	24
3.3. KARBON NOKTALARIN ÖZELLEŞTİRİLMESİ.....	29

3.4. KARBON NOKTALARIN AVANTAJLARI VE SINIRLAMALARI	31
3.5. KARBON NOKTALARIN UYGULAMA ALANLARI	32
BÖLÜM 4.	41
BİYOBOZUNURLUK	41
4.1. BİYOBOZUNUR POLİMER KAVRAMI	41
4.2. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	42
4.2.1. Doğal Kaynaklı Polimerler	42
4.2.2. Sentetik Biyobozunur Polimerler	44
4.3. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN ÜRETİM SÜREÇLERİ	45
4.4. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN ÇEVRESEL ETKİLERİ	46
4.5. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN AVANTAJLARI VE SINIRLAMALARI	47
4.6. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN UYGULAMA ALANLARI.....	48
4.6.1. Ambalaj Endüstrisi	49
4.6.2. Tıbbi ve Eczacılık Uygulamaları	50
4.6.3. Tarım Sektöründe Kullanımı	51
4.6.4. Diğer Uygulama Alanları	52
4.7. PVA (POLİVİNİL ALKOL)	54
BÖLÜM 5	56
MALZEMELER VE YÖNTEMLER	56
5.1. MALZEMELER.....	56
5.2. CD'LERİN SENTEZİ.....	56
5.3. KARBON NOKTALARIN KARAKTERİZASYONU.....	57
5.3.1. TEM Analizi	57
5.3.2. Absorpsiyon Spektrum Analizi.....	58
5.3.3. Hücre Canlılığı Deneyi (MTT).....	58
5.4. ÇÖZELTİLERİN HAZIRLANMASI	59
5.5. NANOLİFLİ ÖRTÜLERİN ÜRETİMİ	59
5.6. NANOFİBRÖZ MATLARIN KARAKTERİZASYONU	59
5.6.1. SEM Analizi	59

	<u>Sayfa</u>
5.6.2. FTIR Analizi	60
5.6.3. TGA Analizi	60
5.6.4. Su Temas Açısı Ölçümü	60
5.6.5. Suda Çözünürlük Ölçümü.....	60
5.6.6. Hava Geçirgenliği Testi.....	61
5.6.7. Çekme Testi	61
5.6.8. Biyobozunurluk Testi	61
5.6.9. İn-vitro Antioksidan Aktivite	61
5.6.10. İn-vitro Antimikrobiyal Aktivite	62
5.7. GIDA UYGULAMASI VE STABİLİTE TESTLERİ	62
5.8. İSTATİSTİKSEL ANALİZ	63
 BÖLÜM 6	 64
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	64
6.1. SPCD'LERİN KARAKTERİZASYONU	64
6.2. SPCD'LERİN SITOTOKSİSİTESİ	65
6.3. NANOLİFLİ ÖRTÜLERİN KARAKTERİZASYONU	67
6.3.1. Morfolojik Analiz	67
6.3.2. FTIR Analizi	68
6.3.3. TGA Analizi	69
6.3.4. Su Temas Açısı Ölçümleri.....	70
6.3.5. Su Çözünürlük Sonuçları.....	71
6.3.6. Mekanik Özellikler	72
6.3.7. Antioksidan Aktivite.....	73
6.3.8. Antimikrobiyal Aktivite	74
6.3.9. Biyolojik Bozunma Süresi.....	75
6.4. GIDA UYGULAMA VE STABİLİTE TESTLERİ.....	76
 BÖLÜM 7	 79
SONUÇ VE ÖNERİLER	79
 KAYNAKLAR	 80

ÖZGEÇMİŞ	92
----------------	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 5.1. Elektro-üfleme yöntemi şematik çizimi.....	57
Şekil 6.2. (a) Atık kabak türevi karbon noktalarının UV-vis emilim spektrumları ve (b) İletim elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü	65
Şekil 6.3. SPCD'lerin Beas2B normal akciğer hücre hattı (a) ve HC normal kondrosit hattı (b) üzerindeki sitotoksosite analizi	66
Şekil 6.4. SPCD'lerin Beas2B normal akciğer hücre hattı ve HC normal kondrosit hattı morfolojileri üzerindeki etkisi.....	66
Şekil 6.5. PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs nanolifli örtülerinin SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımı.....	68
Şekil 6.6. PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs örneklerinin FTIR spektrumu (a), ve TGA ile DTG eğrileri (b).	70
Şekil 6.7. PVA, PVA-CMC ve PVA-CMC-SPCDs nanolifli matlarının su temas açısı (a) ve su çözünürlüğü (b) değerleri.	71
Şekil 6.8. PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs nanofiber matların çekme dayanımı ve kopma uzama oranı.	73
Şekil 6.9. Nanolif matlarının antioksidan (a), antimikrobiyal (b) ve bozunma (c) özellikleri.....	76
Şekil 6.10. Hızlandırılmış depolama sırasında ceviz yağının peroksit (b) ve Tiyobarbiturik Asit Reaktif Maddeler (c) değerleri ile nanolifli gıda uygulaması şematik görselleştirmesi (a).	77

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gıda kontaminasyonundan kaynaklanan gıda kaynaklı hastalıkları, insan sağlığını önemli ölçüde tehdit etmektedir. Bu sorun, acil çözümler gerektiren küresel bir endişe olarak kalmaktadır (Zhao vd., 2020). 2015 yılında Dünya Sağlık Örgütü, dünya çapında yaklaşık 600 milyon kişinin, yani o dönemde dünya nüfusunun yaklaşık 10'da 1'inin, gıda kaynaklı hastalıklar geçirdiğini ve bunun sonucunda 420.000 ölüm yaşandığını bildirmiştir (Pires & Devleesschauwer, 2021). Gıda kontaminasyonunun etkin bir şekilde korunması ve kontrol edilmesi, gıda kaynaklı hastalıkların etkilerini azaltmak için temel stratejilerdir. Ambalajlama, gıda ürünlerini çevresel faktörlerden korumanın yanı sıra, gıda güvenliği için sanayi ve tüketici gereksinimlerini karşılamak için de çok önemlidir (S. Sharma vd., 2021). Son araştırmalar, ambalaj sistemlerini geliştirmeye odaklanmış ve aktif ambalajın umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmasına yol açmıştır (Fang vd., 2017). Aktif ambalaj malzemeleri, biyolojik özelliklere sahip bileşenleri içerir, bu bileşenler yiyecek ürününe yavaşça salınarak raf ömrünü uzatır, kalite ve güvenliği artırır ve görünümü iyileştirir (Ribeiro-Santos vd., 2017). Bu malzemeler, raf ömrünü uzatmayı veya gıda koşulunu korumayı/iyileştirmeyi amaçladığı tanımlanan 1935/2004/EC ve 450/2009/EC Yönetmeliği'ne göre düzenlenmiştir (Restuccia vd., 2010). Bu yaklaşım yalnızca gıda güvenliğini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda biyolojik olarak parçalanabilir ve sürdürülebilir ambalaj malzemelerinin kullanımını teşvik ederek çevresel endişelere de destek olur. Aktif ambalaj yaklaşımı, gıda koruma konusunda tüketici beklentilerine ve çevresel sorumluluğa yönelik bir değişim temsil etmektedir (R. Sharma vd., 2020).

Aktif ambalaj sistemleri genellikle aktif ajanların bir polimerik matris içine entegrasyonu ile ilgilidir (Ramos vd., 2014). Antioksidan ve antimikrobiyal özelliklere sahip bu aktif ajanlar sentetik veya doğal olabilir. Ancak, sentetik ajanlar

tüketici sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir, bu da doğal özlerin alternatif olarak ilgi görmesine neden olmuştur çünkü bunlar hem insan tüketimi hem de gıda ürünleri için güvenli kabul edilmektedir (de Lima Silva vd., 2021; Djebbari vd., 2021; Jafarzadeh vd., 2020). Gıda işleme sırasında ortaya çıkan atık yan ürünleri, doğal antioksidanlar için ilginç bir kaynak sunmaktadır (Makris & Şahin, 2019). Bu tarımsal yan ürünler, bitkilerin tohumları, kabukları, sapları, gövdeleri ve yaprakları gibi bileşenleri içerir ve polifenoller, flavonoidler, tokoferoller, pigmentler ve esansiyel yağlar (EO'lar) gibi bileşiklerin verimli rezervuarlarıdır. Fenolik açısından zengin olan bu biyolojik aktif maddeler, onları gıda ambalajı, ilaçlar ve kozmetikler gibi geniş bir uygulama yelpazesi için uygun, oldukça ekonomik doğal antioksidan kaynakları yapmaktadır (Panzella vd., 2020; Settanni vd., 2012). Esansiyel yağlar gibi doğal biyolojik aktif bileşikler içeren ambalaj sistemlerinin yaratılma potansiyeli, umut verici bir alternatif sunmaktadır. Bu yaklaşım, kimyasal olarak sentezlenmiş katkı maddeleri ile ilgili gıda güvenliği risklerini azaltma sözü vermektedir (S. Sharma vd., 2021). Dahası, karbon noktaları (CD'ler) olarak bilinen yeni malzemeler dikkat çekmektedir. CD'ler, ambalaj uygulamalarında önemli bir rol oynamakta olup, çok sayıda potansiyel fayda sunmaktadır. Anti-ultraviyole, antibakteriyel, antioksidan ve biyoyoumlu özelliklere sahip biyolojik olarak çözünebilen filmlerin geliştirilmesine olanak tanırırlar (Kumar & Gaikwad, 2023).

Karbon noktaları (CD'ler), 2023 Nobel Kimya Ödülü'nü Mounji Bawendi, Louis Brus ve Alexei Ekimov'a kazandıran, sıfır boyutlu (0D) karbon nanomalzemeleri kategorisinde umut verici bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Biyolojik aktivite, toksik olmama, zararsızlık ve biyoyoumluluk gibi olağanüstü özellikleri, onları son derece avantajlı kılmaktadır. Bu özellikler, büyük bir heyecan uyandırmış ve çeşitli alanlardaki uygulamaları üzerine geniş çaplı araştırmalara yol açmıştır (Tuerhong vd., 2017). Biyokütle atıklarının CD sentezi için birincil kaynak olarak kullanılması üzerine dikkat çeken bir trend ortaya çıkmıştır. Bu değişim, giderek daha sıkı çevresel düzenlemeler ve üretim süreçlerinde ortaya çıkan atık miktarının artması gibi faktörlerle hızlanmıştır (Baweja & Jeet, 2019). Bu yenilikçi yaklaşımı benimsemek, yalnızca sürdürülebilir uygulamalarla uyumlu olmakla kalmaz, aynı zamanda atık malzemeleri, çok çeşitli uygulamalara sahip değerli nanomalzemelere dönüştürmek için umut verici bir yol sunar.

CD'ler, küçük boyutları sayesinde, fotolüminesan özellikleriyle diğer karbon bazlı nanomalzemelerden ayrılmaktadır (Ezati, Khan, & Rhim, 2023; Ezati, Khan, Rhim, ve ark., 2023). Fotolüminesansın yanı sıra, CD'lerin yüzey fonksiyonel grupları, ultraviyole (UV) koruma, antioksidanlar ve antibakteriyel özellikler gibi diğer değerli özelliklere de sahiptir. Bu özellikler, CD'leri aktif ambalaj filmlerinde yenilikçi bir şekilde kullanılabilecek umut verici adaylar haline getirmektedir (Min vd., 2023). Örneğin, Ezati ve Rhim tarafından gösterildiği gibi, pektin ve CD'leri içeren kompozit filmler, UV fotonlarını mavi ışığa dönüştürerek UV korumasını artırmıştır (Prasanna & Imae, 2013). Ayrıca, Y Sul ve ark., muz kabuğundan elde edilen CD'leri, kitosan ve jelatin fonksiyonel filmlerinin bir karışımına ekleyerek çok fonksiyonlu bir aktif ambalaj malzemesi hazırlamıştır (Sul vd., 2023). CD'lerle aktif ambalaj filmlerinin üretilmesine dair raporlar olsa da, CD'lerin nanofibröz matlara uygulanmasına dair herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

PVA, mükemmel biyouyumluluğu ve su çözünürlüğü ile bilinir (Aslam vd., 2018). Bu özellikler, PVA' yı, özellikle malzemelere suya dayanıklılık kazandırma yeteneği göz önüne alındığında, gıda ambalajı uygulamaları için arzu edilen bir aday yapmaktadır. Öte yandan, selülozdan türetilen CMC, biyolojik çözünürlüğü ve güçlü yapışma özellikleri ile tanınmaktadır (Pettignano vd., 2019). PVA ve CMC'nin kombinasyonu, güçlerinden yararlanmayı amaçlayarak, ileri düzey gıda ambalajı uygulamaları için uygun nanofibröz matlar geliştirmek adına sinerjik bir yaklaşım sunmaktadır.

Atık kabak karbon noktalarının eklenmesi, benzersiz bir öge sunmuş ve tarımsal yan ürünlerin sürdürülebilir kullanımını teşvik etmiştir. Kavrulmuş Cucurbita pepo tohumlarından elde edilen kabak çekirdekleri, linoleik asit ve oleik asit gibi yağlar, proteinler, diyet lifi ve çeşitli mikro besinler açısından yüksek içerikleri nedeniyle besin değeri yüksek atıştırmalıklar olarak kullanılır. Bu özellikleri, onları sağlıklı atıştırmalıklar alanında değerli bir bileşen olarak konumlandırmaktadır (Şamec vd., 2022). Besinsel önemi olmasına rağmen, Cucurbita pepo genellikle tohum üretimi için yetiştirilir ve bu da tohumların iç kısmındaki kalan etin atılmasına neden olur. Dikkate değer şekilde, bu atılmış kısım, kabak tohumlarının %92-95'ini oluşturur ve büyük miktarda atık üretimine yol açar. Genellikle bu atık, hasat sonrası tarlalarda çürümeye

bırakılır, bu da kötüye kullanımını ve çevresel endişeleri artırır. Karbon açısından zengin bu fazla malzeme büyük bir potansiyele sahiptir. Kabak atığı, karbon noktalarının sentezlenmesi için öncül olarak kullanılabilir. Kabak atığının değerli karbon bazlı malzemelerin yaratılmasında kullanılması, yalnızca çevresel kirliliği azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir kaynak yönetiminin önemini karşılar ve hem ekolojik hem de ekonomik faydalar sunar.

Bildiğimiz kadarıyla, CMC/PVA nanofiber matlarında katkı maddesi olarak CD'lerin kullanıldığı herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle, birincil hedef, elde edilen nanofibröz matları morfolojik özellikleri, mekanik dayanıklılıkları ve termal stabiliteleri dahil olmak üzere kapsamlı bir şekilde karakterize etmektir. Son literatürden elde edilen bilgiler, karbon noktalarının eklenmesinin potansiyel faydalarını, örneğin iyileştirilmiş mekanik özellikler ve gelişmiş biyolojik fonksiyonellikleri vurgulamaktadır. Bu araştırma, aktif ve sürdürülebilir gıda ambalajı malzemeleri konusundaki tartışmalara önemli bir katkı sağlamış ve atık kabak karbon noktalarının ek değerinin etkinliğine dair içgörüler sunmuştur. PVA ve CMC'nin ayırt edici özelliklerinden yararlanarak ve kapsamlı bir karakterizasyon yaparak, bu çalışma potansiyel uygulamaları keşfetmeyi ve gıda ambalajı alanında daha verimli ve çevre dostu çözümler için bir yol açmayı amaçlamaktadır.

BÖLÜM 2

NANOLİF VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.1. NANOLİF KAVRAMI VE ÖZELLİKLERİ

Nanolif kavramı, lif çaplarının nanometre boyutuna (genellikle 100 nm'nin altına) indirilmesiyle elde edilen yeni nesil malzeme türlerini kapsamaktadır. Gelişmiş yüzey alanı ve yüksek gözeneklilik gibi özellikler, bu materyalleri çok sayıda disiplinin odak noktası hâline getirmektedir. Polimer, seramik veya kompozit gibi farklı malzeme gruplarından üretilen nanolifler, morfolojik ve kimyasal çeşitliliğe sahip yüzeyler sağlamaktadır (Yıldız vd., 2021). Bu yüzey özelliklerinin uyarlanabilirliği, sensör geliştirme, filtreleme sistemleri ve yara örtüleri gibi çeşitli alanlarda kullanım imkânlarını artırmaktadır. Üretim sürecindeki parametrelerin optimize edilmesiyle lif çapında ve yüzey özelliklerinde önemli iyileştirmeler kaydedilmesi mümkündür (Şimşek Gündüz, 2023). İhtiyaca uygun modifikasyonlar sayesinde su itici, elektriksel iletken veya biyouyumlu nitelikler kazandırılabilir.

Yaygın olarak tercih edilen elektroegirme yöntemi, yüksek voltaj altında polimer çözeltilerin çekilmesiyle nanolif oluşumuna olanak tanımaktadır (Şimşek Gündüz, 2023b). Üretilen lifler, homojen çap dağılımı ve kontrollü lif düzeni açısından avantaj sunmaktadır. Ek olarak, püskürtmeli çöktürme yönteminde basınçlı gaz veya sıvı kullanılarak ince lif yapıları elde edilmektedir. Isıl çekme ve faz ayrıştırma gibi yöntemler de nanolif üretiminde başvurulan diğer teknikler arasında yer almaktadır. Polimer çözelti konsantrasyonu, uçucu çözücü yapısı ve ortam sıcaklığı gibi faktörler, liflerin son özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Şimşek Gündüz, 2023). Kullanılan yöntem ve malzeme çeşidine göre liflerin mekanik dayanımı, yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal etkileşim potansiyeli farklılık gösterebilmektedir.

Nanolifler, sahip oldukları geniş yüzey alanı ve gözenekli yapı sayesinde filtrasyon, doku mühendisliği ve ilaç salınımı gibi kritik uygulamalarda etkin çözümler sunmaktadır. Örneğin, doku iskelelerinde hücre tutunma ve proliferasyonunu kolaylaştıracak yüzey morfolojisi düzenlenebilmektedir. Böylelikle biyomedikal alanda daha işlevsel ve doğal dokulara benzeyen yapıların oluşturulması hedeflenmektedir. Filtrasyon uygulamalarında yüksek verimli partikül tutma kapasitesine sahip lif katmanları tasarlanarak su ve hava temizliği gibi alanlarda üstün performans elde edilmektedir. Bu uygulamalarda liflerin düzenli porozite seviyesi ve yüzey kimyasının uyarlanabilirliği önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ek olarak, sensör teknolojileri ve koruyucu tekstiller gibi birçok sektörde de nanoliflerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Farklı üretim yöntemleriyle şekillendirilen nanoliflerin özellikleri, kullanılacak uygulama alanına göre seçilmektedir. Yüzeyin kimyasal uyumu, ıslanabilirlik veya hidrofobik karakter, uygulamaya yönelik tasarım parametrelerinin başında gelmektedir. Biyomedikal alanda tercih edilen biyoçözünür ve biyobozunur liflerde, hücre uyumluluğuna odaklanan özellikler ön plana çıkmaktadır. Endüstriyel filtreleme gibi alanlarda ise yüksek mekanik dayanım ve ısı direnci beklenmektedir. Çeşitli katkı maddeleri veya kaplamalarla liflere elektriksel veya manyetik özellikler kazandırılabilir (Yıldız vd., 2021). Bu bilgiler ışığında, nanoliflerin farklı disiplinlerde etkin bir malzeme platformu sunduğu ve gelecekte daha kapsamlı araştırmalarla kullanım alanlarının genişleyeceği değerlendirilmektedir.

2.2. NANOLİF ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER

Nanolif üretiminde kullanılan malzemelerin belirlenmesi, elde edilecek liflerin mekanik, kimyasal ve biyolojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu malzemeler genellikle polimerik yapıda olup, doğal veya sentetik kaynaklardan temin edilebilmektedir. Doğal polimerler arasında kitosan, jelatin, ipek fibroin ve kolajen gibi biyoyumlu seçenekler dikkat çekmektedir (P. R. Sharma & Varma, 2013; Mali & Sherje, 2022). Doğal polimerlerin tercih edilmesinde biyolojik uyumluluk ve biyobozunabilirlik özellikleri önemli rol oynamaktadır. Sentetik polimerler arasında ise polilaktik asit (PLA), poli(laktik-ko-glikolik asit) (PLGA), poliakrilonitril (PAN)

ve polikaprolakton (PCL) gibi çeşitlerin yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu polimerlerin erime ve çözünme özellikleri, üretim sürecinde farklı yöntemlerin uygulanabilmesine imkân tanımaktadır.

Metal esaslı malzemeler de nanolif üretimi için uygun seçenekler arasında yer almaktadır. Yüzey plasmonik etkiler, katalitik faaliyetler ve mekanik dayanım gibi ilave işlevler talep edildiğinde gümüş, altın ve titanyum gibi metallerin kullanılabildiği bilinmektedir. Metallerin doğrudan nanolif formunda elde edilmesi zor olduğundan, genellikle polimer matris içinde metal nanoparçacıklar dağıtılarak kompozit nanolifler üretilmektedir. Böylelikle, hem polimerik iskeletin esnekliği hem de metal nanoparçacıkların yüksek iletkenlik ve antimikrobiyal etki gibi özellikleri bir arada elde edilebilmektedir (Ghosh & Webster, 2021).

Seramik esaslı malzemeler, yüksek ısıl kararlılık ve korozyon direnci sayesinde özel uygulamalarda öne çıkmaktadır. Silika ve zirkonya gibi malzemelerin nanolif formuna dönüştürülmesi için öncelikle inorganik pre-kürler kullanılmakta, ardından yüksek sıcaklık işlemleriyle kristalin yapı kazandırılmaktadır. Elde edilen seramik nanoliflerin düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve yüksek erime noktası gibi avantajları bulunduğu belirtilmektedir. Bazı uygulamalarda seramik lifler, polimer liflerle hibrit şekilde üretilerek çok katmanlı kompozit yapılar oluşturulmaktadır.

Biyolojik uygulamalara yönelik nanolif üretiminde, malzemelerin sterilizasyon ve doku uyumu gibi faktörlere uygun olup olmadığı değerlendirilmeye alınmaktadır. Polimerlerin yapısı, liflerin biyoçözünürlüğünü ve hücre etkileşimini etkilemektedir. Biyomedikal alanlarda kullanılacak nanoliflerin üretimi sırasında, lif yüzeyine protein tutunması veya büyüme faktörü salınımı gibi süreçleri yönlendirecek ek modifikasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Böylelikle, doku mühendisliği ve ilaç salınımı gibi alanlarda biyolojik özellikleri geliştirilmiş nanoliflerin önemi artmaktadır.

Endüstriyel ölçekte kullanılacak malzemelerin seçimi, kimyasal dayanıklılık ve maliyet unsurlarını göz önünde bulunduracak şekilde yapılmaktadır. Filtrasyon sistemleri için üretilen nanoliflerde, liflerin dirençli ve uzun ömürlü olması esas kabul edilmektedir. Üretim hacmine uygun polimerlerin tercih edilmesi ve geri

dönüştürülebilirlik gibi kriterler, sürdürülebilirlik politikalarıyla da ilişkili görülmektedir. Tasarım sürecinde malzeme-makine etkileşiminin gözlemlenmesi ve üretim parametrelerinin belirlenmesi, hedeflenen lif özelliklerinin elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Farklı malzeme türlerinin bir arada kullanılmasıyla kompozit veya hibrit nanolif yapıları oluşturulabilmektedir. Bu yaklaşımla birden fazla işlevin aynı sistemde toplanması hedeflenmektedir. Örneğin, biyoçözünür polimer ile metal nanoparçacıkların birlikte kullanılması sayesinde hem biyolojik uyum hem de antibakteriyel etki sağlanmaktadır. Bu çeşitlilik, gelecekte nanolif tabanlı ürünlerin daha spesifik gereksinimleri karşılmasına yönelik çalışmaların artacağı yönünde değerlendirilmiştir.

2.3. NANOLİF ÜRETİM TEKNİKLERİ

2.3.1. Elektrosinning (Elektro İplik Çekim) Yöntemi

Elektrosinning (Elektro İplik Çekim) yöntemi, polimer çözeltilerinin veya eriyiklerinin yüksek gerilim etkisi altında ince liflere dönüştürülmesini amaçlayan bir proses olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemde, polimerin bulunduğu hazne ile kollektör adı verilen toplayıcı yüzey arasında elektriksel bir alan oluşturulmakta ve polimer sıvısı ince bir jet hâlinde çekilmektedir. Meydana gelen sıvı jet, uçucu çözücünün buharlaşması veya eriyiğin soğuması ile katılaşarak nanometre seviyesinde çaplara sahip lifler oluşturmaktadır. Elde edilen liflerin çap dağılımı, morfolojik özellikleri ve mekanik dayanımı; polimerin doğası, çözücünün buharlaşma hızı ve uygulanan voltaj gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Sivan vd., 2022).

Tekniğin yaygın kullanım nedenleri arasında basit ekipman gereksinimleri, farklı polimer türlerine uyum ve sürekli lif üretimi imkânı sayılmaktadır (Madheswaran vd., 2022). Laboratuvar ölçeğinde, bir iğne ucu üzerinden beslenen polimer çözeltisi kullanılarak kolayca deneysel çalışmalar yürütülebilmektedir. Süreç esnasında iğne ucunun çapı, çözeltinin akış hızı ve uygulanan potansiyel farkı belirleyici parametrelerdir. Çözeltinin akışının doğru ayarlanması ile sabit bir jet oluşumu

sağlanmakta ve liflerin homojen bir yapıya sahip olması hedeflenmektedir. Kollektörün yapısı ve hareketi de liflerin biriktirme düzenini önemli ölçüde etkilemektedir. Dönen silindir tipi kollektörler, liflerin belirli bir hizaya sahip olmasına imkân tanımaktadır.

Çözücü seçimi, elektrospinning yönteminde dikkat edilmesi gereken temel faktörlerden biridir. Çözücünün uçuculuk, iletkenlik ve polimerle etkileşimi, lif kalitesini belirleyen unsurlar arasında yer almaktadır. Uygun çözücü bulunmadığında, polimer çözeltisinin yeterli viskoziteye ulaşamaması veya kararlı jet oluşumunun sağlanamaması söz konusu olmaktadır. Yüksek buharlaşma hızı, liflerin hızlı kurumasını sağlayarak çökme ve yapışma sorunlarını azaltabilmektedir. Diğer yandan, buharlaşma hızı fazla olan çözücüler, jet üzerindeki yüzey gerilimini de etkilemekte, lif morfolojisinde pürüzlülüğe veya gözenekli yapılara yol açabilmektedir.

Nanofiber elde etmek için kullanılan polimerlerin eriyik hâlinde işlenmesi de elektrospinning yönteminin bir başka uygulama şekli olarak kabul edilmektedir. Eriyik elektrospinning, genellikle yüksek sıcaklık ve viskozite değerlerine sahip polimerlerin işlenmesini kolaylaştırmaktadır. Bu yaklaşım, çözücü buharlaşması kaynaklı sağlık ve çevre risklerini azaltabildiği gibi enerji tüketimi ve ekipman maliyeti açısından özel önlemlere gereksinim duyulmasına neden olmaktadır. Üretilen eriyik bazlı liflerin kalitesi, proses sıcaklığı ve polimerin termal kararlılığı ile yakından ilişkilidir.

Üretim parametrelerindeki değişiklikler, liflerin morfolojik yapısını ve ortalama çapını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Voltaj değerleri arttıkça polimer jeti üzerindeki itici kuvvet artmakta ve lif çapı genellikle küçülme eğilimi göstermektedir. Akış hızı ve iğne-kollektör mesafesi de benzer şekilde lif oluşumunu şekillendirmektedir. Daha kısa mesafelerde, çözücünün buharlaşması tamamlanmadan lif kollektöre ulaşabilmekte, bu durum lif morfolojisinde kusurlara neden olabilmektedir. Kollektör yüzeyinin iletkenliği veya tasarımı, liflerin düzgün bir şekilde birikmesi ve belirli hizalanmış yapıların elde edilmesi açısından önem taşımaktadır.

Elde edilen nanolifler, yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapı özellikleri nedeniyle biyomedikal, koruyucu tekstil, filtreleme ve sensör teknolojileri gibi farklı alanlarda

kullanılmaktadır (Ghosh & Webster, 2021). Elektrosinning tekniğinin çok yönlü olması ve geniş bir materyal yelpazesinde uygulanabilmesi, bu yönteme olan ilgiyi artırmaktadır. Üretim ölçeğinin büyütüldüğü endüstriyel sistemlerde, çoklu iğne düzenekleri ve döner disk sistemleri gibi yenilikçi teknolojiler uygulanarak verimlilik artışı sağlanmaktadır. Eş zamanlı olarak, farklı katkı maddeleri veya ek yapısal düzenlemelerle liflerin yüzey kimyası ve işlevselliği zenginleştirilebilmektedir.

Tekniğin gelecekteki gelişmelerinde, üç boyutlu iskele yapılar, çok katmanlı ürünler ve kontrollü ilaç salınımına yönelik tasarımlar üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı belirtilmektedir. Elde edilen deneysel ve teorik verilerin, lif oluşum sürecinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunması ve böylece üretim parametrelerinin istenen özelliklere göre optimize edilmesi beklenmektedir. Bu sayede, elektrosinning yönteminin daha geniş uygulama alanlarına yayılması ve yüksek katma değerli nanoteknolojik ürünlerin geliştirilmesinde öncü rol oynaması amaçlanmaktadır.

2.3.2. Elektro Üfleme Yöntemi

Elektro-üfleme, hem çözeltilerden hem de eriyiklerden polimerik nanolifler üretmek için hava üfleme ile elektro-eğirme işlemlerini birleştiren ve böylece hem elektro-eğirme hem de eriyik-üfleminin avantajlarını entegre eden yenilikçi bir tekniktir. Bu yöntemde, bir polimer önce bir polimer çözeltisi oluşturmak için bir çözücü içinde çözülür ve daha sonra bir eğirme nozulünden geçirilir. Sisteme yüksek voltaj uygulanır ve nozulün ucundan basınçlı hava enjekte edilerek topraklanmış bir kolektör üzerinde bir elyaf ağı oluşturulur. Yalnızca gaz jetinden gelen çekme kuvvetine dayanan eriyik üfleminin aksine, elektro üfleme, lifleri germek için elektrostatik itmeyi kullanır ve gaz jeti ilk aşamada çözelti çekmeye yardımcı olur. Bu yaklaşım iki kuvvetin etkileşimini içerir: bir elektrik kuvveti ve bir hava üfleme kesme kuvveti, polimerik sıvıdan nanoliflerin oluşturulmasına yol açar. Özellikle, elektro-üfleme, yüksek üretim oranlarına sahip basit bir süreç sunarak, geleneksel yöntemler kullanılarak verimli bir şekilde elektro-eğirilemeyen sulu hyaluronik asit de dahil olmak üzere 100 nm'nin altındaki çaplara sahip çok çeşitli malzemelerden nanoliflerin üretilmesini sağlar (Alghoraibi & Alomari, 2018).

Ayrıca, elektro-üfleme, liflerin gerilmesine ve çözücü buharlaşmasının hızlandırılmasına yardımcı olan ve böylece polimer çözeltisinin yüksek yüzey geriliminin üstesinden gelen yüksek hızlı bir hava veya gaz akışı sağlayarak üretkenliği ve lif kalitesini artırır. Hava üfleme basıncı ve uygulanan voltaj gibi parametreleri ayarlayarak, nanoliflerin biriktirme miktarı ve çap dağılımı üzerinde kontrol elde edilebilir, bu da çok yönlülük sunar ve nihai ürünün özelliklerini geliştirir. Elektro-üfleme prosesi, içteki iğnenin polimer çözeltisini ve dıştaki iğnenin gaz akışını sağladığı iki eş eksenli iğneden oluşan bir düze kullanır ve böylece artan elyaf üretkenliği ve biriktirme hızını kolaylaştırır. Bu entegre yaklaşım, çeşitli endüstriyel uygulamalarda ölçeklenebilir nanolif üretim çözümlerine yönelik talebi karşılayarak, gelişmiş işlevselliğe sahip nanoliflerin seri üretimi için umut vaat etmektedir (Kong vd., 2009).

2.3.3. Eriyikten Üfleme Yöntemi

Eriyikten üfleme yöntemiyle üretilen dokusuz kumaşları oluşturan liflerin boyutları genel olarak mikron ölçeğinde olsa da son yıllarda yapılan Ar-Ge çalışmaları sonucunda artık nano düzeyde lifler de elde edilebilmektedir. Örneğin, çapı 36 nm kadar ince olan nanolifler, denizdeki adacıklar yaklaşımı ile birlikte eriyikten üfleme yoluyla üretilmiştir. Başka bir çalışmada, 82 nm çapında nanoliflerin yine eriyikten üfleme yöntemi ile üretildiği rapor edilmiştir. Şimdiye kadar polifenilen eter (PPE), polibütilen tereftalat (PBT), polistiren (PS) ve Poliamid-6 (PA-6)'nın eriyikten üfleme yöntemi kullanılarak nanolifli yüzey üretmek için kullanıldığı rapor edilmiştir. Rogalski ve arkadaşları maksimum üretim hızlarının eriyikten üfleme için 1500 g/saat ve iğnesiz elektro-üretim için 200 g/saat olduğunu belirtmektedir (Rogalski, vd., 2020). Eriyikten üfleme yönteminin en büyük avantajı, polimerin herhangi bir çözücü içinde çözülmesine gerek olmamasıdır. Bu birçok açıdan çok önemli bir noktadır çünkü çözeltiden üfleme, elektro-üretim ve santrifüj-eğirmede, işlenecek polimerin bir solvent içinde çözülmesi gerekir. Yukarıda bahsedilen nanolif üretim tekniklerinin çoğunda solvent, polimer çözeltisinin yaklaşık %90'ını oluşturur. Bu önemli miktardaki solvent, üretim esnasında buharlaşır ve ortama yayılır, bu da çevre sorunlarına ve/veya solventin geri kazanımı nedeniyle ekstra maliyetlere neden olur. Ancak eriyikten üfleme yönteminde solvante gerek yoktur. Eriyikten üflemenin bir

diğer avantajlı noktası da, ihtiyaç duyulan sayıda üretim kalıbı/nozulu eklenerek kolayca ölçeklendirilebilmesidir. Hava akışı kalıbın dış kanalından gelir ve erimiş polimeri kuşatıp hızlandırarak liflere dönüştürür. Bu şekilde oluşturulan lifler bir toplayıcıda rastgele biriktirilir ve sonuçta dokusuz bir kumaş oluşur. Genel olarak hava akışının ve erimiş polimerin sıcaklıkları aynıdır (Tipper & Guillemois, 2016).

Eriyikten üfleme dokusuz kumaşların yapısını etkileyen ana parametreler kalıp geometrisi, polimerin moleküler ağırlığı, hava sıcaklığı, hava basıncı, polimer sıcaklığı, toplayıcı mesafesi ve polimer besleme hızıdır. Kalıp ile toplayıcı arasındaki mesafedeki bir artış, polimer jetlerinin uzaması için daha fazla zamana neden olacağından daha ince liflerle sonuçlanır. Düşük moleküler ağırlıklı polimerler, düşük viskoziteleri nedeniyle daha ince liflerin elde edilmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda eriyik viskozitesinin azalmasına yol açan polimer sıcaklığının artması, polimerin akış özelliklerini iyileştirerek daha ince liflerin elde edilmesinde olumlu etkiye sahiptir. Hava sıcaklığındaki artışın daha ince liflerle sonuçlandığı bulunmuştur. Ortalama lif çapının azaltılmasında kalıp sıcaklığının artırılmasının etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca kalıp sıcaklığındaki artış, üretilen dokusuz yüzeyin mukavemetinde ve Young modülünde azalmaya neden olmuştur. Hasan ve arkadaşları farklı düze tasarımlarının ve proses parametrelerinin ortalama lif çapı üzerindeki etkisini araştırmış ve besleme hızı ve düze deliği çapı azaldıkça lif çapının azaldığını bulmuştur (H. Zhang vd., 2019). Eriyikten üfleme yoluyla polistiren üretiminde viskozitenin etkisi Deng ve arkadaşları tarafından incelenmiş ve viskozite düştükçe daha ince lifler elde edilmiştir. Polimer besleme hızı azaldıkça lifler daha ince olmakta; bunun nedeni, basınçlı sıcak havanın etki ettiği polimer miktarının birim zaman ve alan başına daha fazla olması ve polimer jetinin daha fazla incelmesiyle açıklanmaktadır. Zhang ve arkadaşları viskozitenin lif çapına etkisini araştırmışlar ve çeşitli viskozitelerde karışımlar elde etmek için polipropilene (PP) %15'e kadar çeşitli miktarlarda polietilen glikol (PEG) ilave etmişlerdir. Artan PEG miktarına ve PP ile PEG fazları arasındaki arayüzey farklılığına bağlı olarak iç sürtünmede önemli bir azalma gözlenmiş ve bu da viskoziteyi önemli ölçüde azaltmıştır. Sonunda düşük viskoziteli polimer çözeltilerinden ince lifler üretildiği bulunmuştur (Milligan vd., 1992).

2.3.4. Çözeltiden Üfleme Yöntemi

Çözelti Üfleme Eğıme (SBS) prosesi, sürekli nanolifleri sentezlemek için basınçlı gaz kullanır; olgunlaşan bir eğıme tekniğı olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, dağınc bir jet oluşturmak için bir gaz akışıyla sarılmış iki paralel polimer çözeltisi akışını yönlendiren eş merkezli bir nozul konfigürasyonu kullanır. SBS prosesinin arkasındaki fiziksel prensip, basınç farklılıklarının kinetik enerjiye dönüştüğü Bernoulli denklemiyle uyumludur. Nozulün ucunda, yüksek basınçlı gazdan atmosferik basınca geçiş, gaz/çözelti arayüzünde bir kesme kuvveti yaratır. Artan gaz basıncı bu kesme kuvvetini güçlendirerek polimerin yüzey geriliminin üstesinden gelir ve çözelti jetini gaz akışına doğru iter. SBS prosesi güvenliğı, basitliğı ve ölçeklenebilirliğı nedeniyle büyük ilgi görmüş ve endüstriyel uygulamalar için uygun hale gelmiştir. Bununla birlikte, kontrolsüz elyaf birikimi, nozul tıkanması ve jet kararsızlığı gibi doğal sınırlamalar devam etmektedir. SBS alümina nanoliflerde boncuk oluşumu, jet kararsızlığı ve nozul ucu tıkanmasına bağlanırken, jet üretimi ve elyaf sürekliliğindeki bozukluklar nozul çıkıntı uzunluğıyla ilişkilendirilmiştir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli stratejiler önerilmiştir. Bunlar arasında, nanolif israfını azaltmak için metalik bir ağı yüzeyine sahip içi boş vakum bağlantılı bir tamburun oluşturulması ve nozul tasarımının nanolif morfolojisi üzerindeki etkilerinin araştırılması yer almaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğı (CFD) simülasyonları, nozul çapı ve iğne çıkıntı uzunluğunun elyaf çapını nasıl etkilediğini anlamaya yardımcı olurken, türbülans modelleri kullanılarak yapılan analizler proses sıcaklığı, hava yoğunluğı ve jet stabilitesi arasındaki ilişkiye ışık tutmuştur. Deneysel çalışmalar, yüksek gaz basıncının nanoliflerin morfolojik yapısı üzerindeki etkisini doğrulamış, lif örtüşmesi ve demet oluşumu için eğilimler göstermiştir (Elnabawy vd., 2023).

2.3.5. Elektro Eğıme Yöntemi

Elektroeğıme yönteminin temelini oluşturan ilk çalışma Formhals tarafından 1934 yılında yapılmıştır (Sarwar vd., 2019) (Formhals, 1934). Ancak gelişen teknoloji ile birlikte bu yöntem günümüzde son derece ilgi çekici bir malzeme üretim yöntemi haline gelmiştir. Tipik bir elektroeğıme yöntemi üç temel birimden oluşur. Bu

birimler; yüksek bir voltaj kaynağı, ucunda püskürtme memesi bulunan çözeltinin içerisinden aktığı boru sistemi ve toprağa bağlı metal bir toplayıcı yüzeydir. Yüksek voltaj kaynağının bağlantılarından biri çözelti ile dolu şırınganın metal ucuna bağlanırken diğer ucu topraklama görevi yapan toplayıcı yüzeye bağlanır. Eğirme işlemi boyunca; enjektör iğnesinden çıkan çözelti, yüksek voltaj altında fiber şeklini alarak toprağa bağlı olan metal toplayıcı yüzeyde birikir.

Elektroeğirme işlemi sırasında yüksek voltajın oluşturduğu elektrik alan sayesinde çözelti, püskürtme iğnesinin ucuna küçük damlacıklar halinde gelir. Daha sonra yüklenmiş sıvı çözelti damlaları birer koni şeklini alır. Koni şeklini alan bu sıvı, jet olarak adlandırılır. Koni şekli alan bu jetler uzamaya başlar. Elektrik alanın etkisiyle sıvıdaki uzamalar bükülmeye başlayarak toplayıcı yüzeyde fiber yapıları oluşturur. Uygun deney şartları sağlanarak sarmal, bükülü, çapraz ağ şeklinde değişik formda iki ya da üç boyutlu fiber yapılar sentezlenebilir. Elektroeğirme yöntemiyle, kısa sürede istenilen boyutta ve büyüklükte nanofiber yapılar sentezlenebilir. Son yıllarda elektroeğirme yöntemi kullanılarak organik veya inorganik malzemeler yardımıyla makro ve/veya nano ölçekli fiber ağların üretimi yapılmıştır.

Üretilen bu ağlar güneş pillerinde, algılayıcılarda, filtrelerde, doku mühendisliğinde, ilaç salınımında ve yaraların iyileştirilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Sarwar vd., 2019). Elektroeğirme yöntemi ile üretilen fiberlerin çaplarını ve morfolojik özelliklerini etkileyen birçok değişken söz konusudur. Bunlar; uygulanan voltaj, çözeltinin viskozitesi, iğnenin ucu ile toplayıcı yüzey arasındaki mesafe olarak sıralanabilir. Ayrıca nem ve ortam sıcaklığı fiberlerin yapısını etkileyen ikincil faktörlerdir.

2.4. NANOLİFLERİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Nanoliflerin avantajları, malzeme biliminden biyomedikal alanlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kendini göstermektedir (Ghosh & Webster, 2021). Yüksek yüzey alanı, onları filtrasyon, sensör teknolojileri, biyomedikal cihazlar ve doku mühendisliği gibi birçok alanda etkili bir malzeme hâline getirmektedir. Ayrıca, nanolifler, düşük yoğunluk ve yüksek mekanik dayanım gibi özellikler sunarak, hafif

ve güçlü malzemelerin üretimine olanak tanımaktadır. Bu liflerin gözenekli yapıları, sıvı, gaz veya partikül tutma kapasitesini artırmakta, bu durum onları su arıtma, hava filtreleme ve biyolojik uygulamalarda vazgeçilmez kılmaktadır. Özgün tasarımlar, farklı uygulama gereksinimlerine göre özelleştirilebilir ve modifiye edilebilir. Biyomedikal uygulamalarda, nanolifler, hücre tutunuma yardımcı olmakta, dokuların iyileşmesi ve yenilenmesi süreçlerinde kritik rol oynamaktadır (Demirkıran, 2019). Bunlar, yara örtüleri, ilaç salınımı sistemleri ve biyolojik iskeleler gibi işlevlerde kullanılmaktadır. Polimerik veya biyobozunur yapılar, çevre dostluğu açısından avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, nanolifler, kullanıldıkları alana göre biyolojik tepkiyi etkileyen yüzey özelliklerinin optimize edilmesine olanak tanımaktadır.

Nanoliflerin dezavantajları ise, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve maliyetleriyle ilişkilidir. Çeşitli üretim yöntemleri, uygulanacak malzemeler doğrultusunda özel ekipman ve yüksek enerji gereksinimleri doğurabilmektedir. Ayrıca, nanoliflerin üretim ölçeklerinin artırılması, en verimli biçimde gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarında karşılaşılan zorlukların üstesinden gelen ticari ölçekteki ekosistemlerin oluşturulmasını gerektirmektedir. Diğer bir zorluk ise, nanoliflerin biyomedikal kullanımındaki vücutla uyumluluğu ve toksisite risklerinin uzun vadeli pratik uygulamalarda dikkatlice izlenmesi gereğidir (Babaarslan, 2014).

Nanoliflerin sahip olduğu yüksek yüzey alanı ve gözeneklilik, birçok sektörde işlevsel çözümler sunulmasına katkıda bulunmaktadır (Ghosh & Webster, 2021). Lif çapları nanometre mertebesine indiğinde, absorpsiyon ve adsorpsiyon kapasitesi artmakta ve yüzey kimyası üzerinde daha geniş bir kontrol olanağı doğmaktadır. Bu özellikler, filtreleme uygulamalarından biyomedikal malzemelere kadar uzanan geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Doku mühendisliği alanında, hücre tutunması ve proliferasyonunun desteklenmesi amacıyla yüksek porozite seviyesine sahip nanolif yapıları tercih edilmektedir. İlaç salınımı ve yara örtüsü gibi konularda, liflerin kontrollü salınım özelliği ve biyoyumluluğu, klinik uygulamalarda verimli sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Nanoliflerin ince yapısı, ışık ve ısı gibi fiziksel faktörlere karşı hassas tepki verme potansiyelini de beraberinde getirmektedir. Böylece, sensör teknolojileri ve akıllı tekstiller gibi yenilikçi alanlarda fonksiyonel tasarımlara kapı aralanmaktadır.

Bazı uygulamalarda, liflerin düşük mekanik dayanımı ve üretim zorlukları dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Gelişmiş üretim yöntemlerine rağmen, seri ve kontrollü üretimde karşılaşılan zorluklar bulunmakta ve maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Polimerlerin seçimi, üretim parametrelerinin ayarlanması ve yüzey işlemleri gibi faktörler, üretim sürecini karmaşık hâle getirmektedir. Liflerin küçük çaplı oluşu, mekanik mukavemetin düşük olmasına ve dış etkenlere karşı hassasiyetin artmasına yol açabilmektedir. Kalın ve dayanıklı yapılara kıyasla, nakliye ve depolama koşullarında özel önlemler gerekmekte, bu durum lojistik ve ölçeklendirme süreçlerini etkilemektedir. Bazı durumlarda, kullanılan çözücülerin uçuculuğu ve toksisitesi de çevre dostu uygulamalar bakımından kısıtlayıcı faktörler arasında sayılmaktadır (Demirkıran, 2019). Bu nedenlerle, üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve yeni malzeme tasarımlarının denenmesi, nanoliflerin daha yaygın ve güvenli biçimde kullanılmasına yönelik çalışmaların devam edeceğini göstermektedir.

2.5. NANOLİFLERİN KULLANIM ALANLARI

Nanoliflerin kullanım alanları, malzeme bilimi ve endüstriyel uygulama pratiklerinin kesişim noktasında geniş bir yelpazede değerlendirilmektedir (Aytaç, 2016). Üretim yöntemlerindeki gelişmeler, lif çaplarının mikrometre düzeyinden nanometre boyutlarına kadar indirgenmesine imkân tanımaktadır (Sunar & Hasçıçek, 2017). Elde edilen nanolifler, yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapı özellikleri sayesinde farklı disiplinlerin çözüm arayışlarına katkı sunmaktadır. Tasarımlardaki esneklik, polimer veya seramik türü hammaddelerin çeşitliliği ve liflerin işlevselleştirilmesi, uygulamaların kapsamını giderek genişletmektedir. Özellikle fiziksel ve kimyasal modifikasyon tekniklerinin gelişmesiyle, nanoliflerin yüzey özellikleri istenen amaca uygun hâle getirilebilmektedir (Ghosh & Webster, 2021). Bu durum, filtre sistemlerinden tıp ve ilaç endüstrisine kadar pek çok sektörde yeni fırsatlar ortaya çıkarmaktadır.

Nanolif temelli çözümler, tıbbi ve biyomedikal uygulamalarda önem kazanmaktadır (Ghosh & Webster, 2021; Sunar & Hasçıçek, 2017). Yüksek porozite, hücre tutunması ve proliferasyonu için uygun mikro ortamlar sağladığı için doku mühendisliği

alışmaları bu malzemelere yönelmektedir (Sunar & Haşek, 2017). Liflerin ap ölçüsünün nanometre düzeyinde olması, hücrelerin doğal yapılarında gördükleri fibröz matrise benzer bir ortama denk gelmektedir. Hücre tutunmasının artması, doku yenilenmesinin hızlanması ve kan damarı oluşumunun desteklenmesi, nanolif esaslı iskelelerin yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktadır (Ghosh & Webster, 2021). Biyoznr ve biyobozunur polimerlerle üretilen lifler, uygulama sonrası vücutta kaldığında zararlı atık oluşturmadan parçalanabilmekte ve bu sayede ek cerrahi müdahaleye gerek duyulmamaktadır (Sunar & Haşek, 2017). Yara rtleri de nanoliflerin tıbbi kullanımında önemli bir yer tutmaktadır. Mikroorganizmaların girişini engelleyen, ideal nem dengesini koruyan ve gaz değişimine imkân tanıyan lif katmanları, hızlandırılmış iyileşme süreci için uygun ortam yaratmaktadır. Yara örtülerine antimikrobiyal ajanların eklenmesi de enfeksiyon riskini azaltabilmekte, böylece hasta konforu ve tedavi başarısı artmaktadır. İlaç salınım sistemlerindeki potansiyel de oldukça yüksektir. Kontrollü salınım sunan ve hedef dokuya özgü formülasyonlar geliştirebilen nanolif bazlı taşıyıcılar, yan etkileri azaltırken tedavinin etkinliğini artırma yönünde çalışmaların odağını oluşurmaktadır (Aytaç, 2016; Sunar & Haşek, 2017).

Filtrasyon sistemleri, nanoliflerin kullanım alanları arasında sıkça anılmaktadır (Yurtaydın, E. (2022). Liflerin ince çapları, yüksek özgül yüzey alanı oluşturarak daha küçük partiküllerin tutulmasına olanak vermektedir. Gözenekli yapı ve yüzey kimyasının ayarlanabilmesi, hava ve su filtrasyonunda istenilen performans kriterlerinin sağlanması mümkün kılmaktadır. Hava temizleme uygulamalarında, hava içerisindeki toz, polen, bakteri ve virüs gibi zararlı partiküllerin yakalanma oranı artmaktadır. Bu sayede laboratuvar ve hastane gibi hassas ortamların yanı sıra endüstriyel tesislerin emisyon kontrolü de etkin şekilde yönetilebilmektedir. Su arıtma teknolojilerinde, nanolif tabanlı membranların gözenek yapısı ve kimyasal kararlılığı, sudaki mikrobiyolojik yükün ve çözünmüş organik atıkların azaltılmasına katkı sunmaktadır. Membran teknolojisiyle birlikte adsorpsiyon ve katalitik proseslerin de birleştirilmesi, çok işlevli filtrasyon sistemlerinin geliştirilebileceğini göstermektedir.

Enerji depolama alanındaki çalışmalar, nanoliflerin yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapı özelliklerinden yararlanarak daha verimli elektrot tasarımları oluşurmaya

odaklanmaktadır. Lityum-iyon pillerde, anot ve katot malzemeleriyle nanoliflerin birleştirilmesi, pil kapasitesi ve döngü ömrü üzerinde olumlu etkiler ortaya koyabilmektedir. Pillerin hızlı şarj-deşarj kabiliyeti, liflerin elektron iletimi ve iyon difüzyonunu kolaylaştırmasına bağlı olarak yükselmektedir. Süperkapasitör uygulamalarında da benzer bir yaklaşım söz konusudur. Liflerin ara yüzey alanını artırarak daha fazla yük depolanmasına imkân tanınması, enerji depolamada kapasiteyi ve güç yoğunluğunu yükseltebilmektedir. Yüksek ısı ve kimyasal direnç gerektiren yakıt pili bileşenlerinde de nanolif esaslı kompozitler test edilmektedir. Elektriksel iletkenlik veya katalitik aktiviteyi geliştirmek için metal veya karbon nanoparçacıklar lif ağına entegre edilebilmektedir.

Tekstil endüstrisi, yüksek performanslı ürünler geliştirmek ve ürünlere fonksiyonel nitelikler kazandırmak amacıyla nanolif teknolojisine ilgi göstermektedir. Esneklik, nefes alabilirlik ve hafiflik gibi özellikler, spor giyim ve koruyucu giysi tasarımlarında ön plana çıkmaktadır. Liflerin su itici veya antibakteriyel kaplamalarla bütünleştirilmesi, kullanıcı konforunu artıran ve hijyen sağlayan kumaşların üretilmesine imkân tanımaktadır. Koruyucu tekstillerde kimyasallara, mikroorganizmalara ve aşırı ısıya karşı dirençli katmanlar oluşturmak için nanolif bazlı malzemelerin yüksek yüzey alanından yararlanılmaktadır. Isı yalıtımı ve ateşe dayanıklı kaplamalar, yangın güvenliği uygulamalarında potansiyel sunarken, iletken lifler giyilebilir elektroniklerin geliştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir.

Gıda ambalaj endüstrisi de nanolif teknolojisi sayesinde daha fonksiyonel paketleme çözümleri tasarlamaya yönelmektedir. Gıdaların raf ömrünü uzatma ve kalite koruma kriterleri, ambalaj malzemelerinin bariyer ve antimikrobiyal özelliklerine bağlıdır (Karabulut vd., 2019). Nanolif kaplamalar veya katmanlar, oksijen ve nem geçişini kontrol etme düzeyini yükselterek bozulma süreçlerini yavaşlatma potansiyeline sahiptir (Karabulut vd., 2019). Antimikrobiyal maddelerin liflere eklenmesi, gıda patojenlerinin üremesini sınırlayarak hijyen ve güvenlik standartlarını güçlendirmektedir. Yenilenebilir ve biyoçözünür polimerler kullanıldığında, sürdürülebilir ambalaj alternatifleri de ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşım, plastik atık sorununa katkı sağlayan geleneksel ambalajların çevresel etkisini hafifletme çabasını desteklemektedir.

Savunma sanayii ve güvenlik uygulamalarında, nanolif esaslı kumaşlar ve kaplamalar, balistik koruma ve kimyasal maddeye dayanıklılık gibi öncelikli ihtiyaçlara yanıt verebilmektedir. Yüksek çekme mukavemeti ve darbe emici özellikler, zırh sistemlerinde ve kurşun geçirmez malzemelerde değerlendirilmektedir. Liflerin çok katmanlı yapılarla birleştirilmesi, farklı tehdit seviyelerine göre uyarlanabilen koruyucu sistemlerin tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, hafiflik ve esneklik gibi özelliklerin korunması, sahada personelin hareket kabiliyetini artırarak güvenlik donanımlarının etkinliğini yükseltmektedir. Kimyasal ve biyolojik ajanlara karşı özel kaplamalar, özellikle tehlikeli bölgelerde çalışan personel için koruyucu giysilerde kritik bir role sahiptir.

İlaç endüstrisinde, nanolif üretim teknolojilerinin kontrollü ilaç salınım platformlarında kullanımı dikkat çekmektedir (Sunar & Hasçıçek, 2017; Aytaç, 2016). Farklı etken maddeler, liflerin gözenekli yapısına hapsedilerek difüzyon kontrollü veya erime kontrollü salınım gerçekleştirebilmektedir. Farklı salınım kinetiklerine sahip çok katmanlı lif yapıları, kombine ilaç tedavisi ve uzun süreli salınım için uygundur. Bu yaklaşım, özellikle kronik hastalıkların yönetiminde ve belirli bölgelerin hedeflenmesinde yenilikçi çözümler yaratmaktadır. Transdermal yama veya oral tablet formülasyonlarında, lif yapısının kontrollü bozunması, etkin maddenin istenen hız ve dozda serbest kalmasına imkân vermektedir.

Kozmetik ve kişisel bakım ürünleri, nanoliflerin ince ve hassas yapısından yararlanmaktadır. Cilt bakım kremleri veya serumlarda, etken maddelerin cilde nüfuz etmesi lif yapılarıyla kolaylaştırılabilmektedir. Gözenekli lif ağlarının yüksek adsorpsiyon ve tutunma kapasitesi, aktif bileşenlerin stabilize edilmesine yardımcı olmaktadır. Nem tutma özelliği, cildin doğal dengesini korumasına katkı sağlarken, kontrollü salınım kapasitesi ürünün uzun süreli etkinliğini artırmaktadır. Benzer şekilde, deodorant veya antiperspirant formülasyonlarda, kokunun kontrolüne ve hedeflenmiş salınımına katkıda bulunabilecek sistemler üzerinde araştırmalar sürdürülmektedir. Nanoliflerin ciltle uyumlu polimerlerden üretildiği durumlarda, hassas ciltlerde de güvenli kullanım olanağı araştırılmaktadır.

Tarım sektöründe, bitki gelişimini iyileştirmek ve toprakla etkileşimi artırmak amacıyla nanolif bazlı tohum kaplama ve gübrelerin kullanımına dair çalışmalar yürütülmektedir. Liflerin gözenekli yapısı, besin maddelerinin kontrollü salınımını desteklemekte ve tohumun çimlenme sürecine fayda sağlamaktadır. Benzer şekilde, pestisit ve herbisit formülasyonlarının liflerle birlikte uygulanması, kimyasal maddelerin gereksiz kullanımını azaltarak çevresel zararları sınırlama potansiyeli taşımaktadır. Yüksek yüzey alanı, bitki köklerinin su ve besin maddelerine erişimini destekleyerek verimliliği artırma amacına yönelik araştırmaların odağındadır. Toprakta biyolojik olarak bozunabilir liflerin kullanılması, uzun vadede sürdürülebilir tarım pratiklerine geçişte bir fırsat olarak görülmektedir.

Endüstriyel ölçekte sensör ve izleme teknolojilerinde de nanoliflerin artan önemi göze çarpmaktadır. Yüksek hassasiyet ve hızlı tepki süresi, gaz sensörleri ve kimyasal dedektörler için arzu edilen niteliklerdir. Liflerin yüzey alanı geniş olduğundan, ortamdaki hedef molekülle gerçekleşen etkileşim, klasik sensör filmlerine göre daha yüksek oranda algılama kabiliyeti sunabilmektedir. İnce film kaplamalar veya direkt nanolif esaslı sensör platformları, zararlı gazların tespiti, gıda ve ilaç güvenliği gibi konularda çözüm üretmektedir. Biyosensör alanında ise antikor, enzim veya peptit benzeri biyolojik moleküllerin lif yüzeyine bağlanması, seçici algılama mekanizmaları geliştirilmesine imkân tanımaktadır.

Nanoliflerin inşaat ve yapı sektöründe de potansiyeli değerlendirilmektedir. Beton takviyesinde, liflerin mikro çatlak oluşumunu engellemesi ve yapısal mukavemeti yükseltmesi amaçlanmaktadır. Hafif fakat dayanıklı kompozit malzemelerin üretiminde, polimer esaslı liflerin katkısı öne çıkmaktadır. Liflerin su emiciliğinin ayarlanmasıyla, su yalıtımı veya yangına dayanıklı yapı elemanlarının tasarımı da yapılabilmektedir. Prefabrik yapı panellerinde, lif takviyeli çimento benzeri karışımların ısı ve ses yalıtımı sağladığı belirtilmektedir. Uzun ömürlü ve sürdürülebilir yapı malzemeleri üretmek, çevresel açıdan daha sorumlu projelerin önünü açmaktadır.

Nanoteknolojik tekstil ürünleri, enerji hasadı veya giyilebilir cihazlar gibi alanlarda da önem taşımaktadır. Liflerin elektriği iletme, esneme veya sensör işlevi görme

özellikleri, elektronik bileşenlerin doğrudan kumaş yapısına entegre edilmesine olanak tanımaktadır. Akıllı kıyafetler, kalp ritmi veya vücut sıcaklığı gibi hayati parametreleri ölçerek gerçek zamanlı veri sunabilmekte ve bu veriler taşınabilir cihazlara aktarılabilmektedir. Bu yaklaşımla, sporcuların performans takibinden sağlık izlemeye kadar çeşitli uygulamalar geliştirilmektedir. Lif tabanlı enerji hasadı sistemleri, kullanıcı hareketinden veya güneş ışığından elektrik üretmeyi mümkün kılabilen çalışmaların temelini oluşturmaktadır.

Çevre mühendisliği ve sürdürülebilirlik perspektifinde, nanoliflerin kirlilik izleme ve gideriminde rol oynadığı görülmektedir. Endüstriyel atık sularda, ağır metal iyonlarının tutulumunu sağlayan fonksiyonel lifler, filtrasyon ve adsorpsiyon süreçlerini birleştirebilmektedir. Fotokatalitik liflerin geliştirilmesi, güneş ışığı altında organik kirleticilerin parçalanmasına yönelik ek avantaj sağlamaktadır. Hava kirliliğiyle mücadelede, lif temelli filtreler ince partiküllerin tutulmasında geleneksel filtrelerden daha etkili olabilmektedir. Yakıt emisyonlarının azaltılması ve endüstriyel atık gaz kontrolü, bu tip yüksek verimli filtrelerin yaygınlaşmasıyla desteklenmektedir (Yurtaydın, E. (2022)). . Atık yönetiminde, biyobozunur polimerlerden üretilen lif malzemelerin doğada parçalanma süreci, çevresel yükün azaltılmasına katkı sunmaktadır.

Elektronik ve optoelektronik uygulamalarda, nanoliflerden yararlanılan araştırmalar hız kazanmaktadır. Yüksek iletkenlik veya yarı iletkenlik özelliklerine sahip liflerin ince film devre elemanlarında kullanılması, cihaz boyutlarının küçültülmesine ve verimliliğin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Organik LED, güneş pili ve transistör prototiplerinde, düşük maliyetli üretim yöntemleriyle nanolif bazlı katmanların entegrasyonu hedeflenmektedir. Ortam sensörleri veya ışık dedektörleri gibi esnek ve hafif cihazlarda, liflerin mekanik dayanıklılık ve yüzey alan avantajı dikkat çekmektedir. Mikroelektronik boyutlara inen tasarımlar, liflerin nano ölçekteki özelliklerini ve üretim parametrelerinin ince ayarını gerektirmektedir.

Sanat ve tasarım alanında da nanoliflerin dekoratif ve işlevsel kullanımlarına örnekler bulunmaktadır. Liflerin renk ve dokusu, aydınlatma tasarımlarından modern mimari yüzeylere kadar yaratıcı projelerde değerlendirilmekte, eşsiz görsel efektler elde

edilmesini sağlamaktadır. Kokuyu absorbe edebilen veya kimyasal değişikliklerle renk değiştirebilen lif kaplamalar, sanatsal ve interaktif düzenlemelerde yer almaktadır. Müzecilik ve sergileme tekniklerinde, hassas nesneleri koruyan ve aynı zamanda estetik çözümler sunan mikro örtüler üzerinde çalışmalar sürmektedir. Bu uygulamalar, nanoteknoloji ve tasarım disiplinlerinin alışılmadık iş birliklerine olanak tanımaktadır.

Farklı sektörlerin ihtiyaçları, nanoliflerin üretim yöntemlerini ve son ürün özelliklerini şekillendiren etmenler olarak görülmektedir. Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen çok yönlü malzemelerin, endüstriyel ölçekte başarılı olması için üretim süreçlerinin standardizasyonu, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik önem kazanmaktadır (Aytaç, 2016). Çeşitli normlar ve sertifikasyon süreçleri, tıbbi cihazlar veya gıda ambalajları gibi regülasyonların yoğun olduğu sektörlerde belirleyici rol oynamaktadır. Liflerin toksisite profili, çevresel riskleri ve geri dönüşüm koşulları da araştırmaların odak noktalarını oluşturmaktadır. Sektörlere entegre olmanın yanı sıra, bilim insanları ve mühendisler, yeni fonksiyonel lif tasarımlarıyla birlikte geleceğin nano malzemelerinin potansiyelini genişletmeye devam etmektedir.

Gelecekteki çalışmaların, akıllı sistemler ve çok katmanlı yapılara doğru evrileceği düşünülmektedir. Birden fazla işlevi aynı lif yapısında barındıran tasarımlar, gelişmiş sensörlerden kendi kendini onarabilen tekstillere kadar farklı uygulamalara hizmet edebilir. Benzer şekilde, yapay zekâ destekli modelleme araçları ve ileri analiz teknikleri, lif üretimindeki parametre optimizasyonunu hızlandırabilmektedir. Tüm bu gelişmeler, nanolif tabanlı teknolojilerin uzun vadede daha yaygın ve erişilebilir hâle gelmesi için yol gösterici olmaktadır. Bu kapsamda, sağlık, enerji, çevre, tarım ve güvenlik gibi alanlarda nanoliflerin varlığının giderek belirginleşeceği beklenmektedir.

BÖLÜM 3

KARBON NOKTALARI

3.1. KARBON NOKTALARIN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Karbon noktalar, genellikle birkaç nanometre ile 10 nanometre arasında değişen boyutlara sahip, karbon bazlı ve sıfır boyutlu (0D) nanomalzemeler olarak tanımlanmaktadır (Biçer & Biçer, 2020; Yıldız vd., 2021). Bu yapıların ilk keşfi, karbon nanotüplerin saflaştırılması sırasında gözlemlenen küçük floresan partiküllere dayandırılmaktadır (Dinç, 2017a). Sentez ve karakterizasyon çalışmaları ilerledikçe, karbon noktaların grafitik veya amorf karbon çekirdeğe sahip olduğu ve yüzeyinde çeşitli oksijen, hidroksil veya karboksil grupları gibi işlevsel grupların bulunduğu belirlenmiştir. Küçük boyutları ve yüksek özgül yüzey alanları, optik ve elektronik uygulamalarda avantaj sağlayabilecek özellikler arasında gösterilmektedir.

Üretim yöntemleri, genellikle kimyasal veya fiziksel süreçlerin uygulanması sonucunda ortaya çıkan çekirdek oluşumu ve yüzey fonksiyonelleştirmeyi kapsamaktadır (Biçer & Biçer, 2020). Hidrotermal sentez, mikrodalga yardımcı yöntemler ve plazma bazlı prosesler gibi yaklaşımlarla karbon noktalar üretilmektedir. Hammadde olarak organik atıklar, tarımsal kalıntılar veya çeşitli polimerler kullanıldığında, çevre dostu ve düşük maliyetli süreçler geliştirilebilmektedir (Dinç, 2017b; Yıldız vd., 2021). Çekirdek etrafındaki yüzey grupları, elde edilen karbon noktaların fotoluminesans, biyoyumluluk ve kimyasal etkileşim kapasitesini belirlemektedir. Yüzey kimyasının isteğe göre düzenlenebilmesi, farklı uygulama alanlarında özelleştirilmiş malzemelerin tasarlanmasına imkân tanımaktadır.

Optik özellikleri arasında, görünür ve yakın UV bölgelerinde fotolüminesans emisyonu önemli yer tutmaktadır (Biçer & Biçer, 2020). Işık uyarımıyla oluşan emisyonun dalga boyu, çekirdek yapısı ve yüzey fonksiyonel gruplarının düzenlenmesiyle ayarlanabilmektedir. Karbon noktaların çoğunlukla yüksek kuantum verimi sergilemesi, bunları biyosensör, biyo-görüntüleme ve optoelektronik uygulamalarında kullanışlı hâle getirmektedir (Yıldız vd., 2021). Uygun sentez koşulları ve doplama stratejileriyle, azot, kükürt veya fosfor gibi elementlerin eklenmesi sonucu floresans özellikleri daha da güçlendirilmektedir. Bu sayede, yüksek parlaklık ve stabilite gibi niteliklerin elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Biyomedikal uygulamalarda, karbon noktaların düşük toksisite ve kolay işlenebilirlik açısından avantaj sağladığı belirtilmektedir (Dinç, 2017b). Su bazlı çözeltilerde iyi dağılılabile özelliği, hücre içi ve doku hedefli çalışmalarda kullanım potansiyelini artırmaktadır. Fotodinamik terapi, ilaç taşıma sistemleri ve moleküler tanı gibi konularda yapılan araştırmalar, karbon noktaların fonksiyonel grupları üzerinden farklı biyomoleküllere bağlanmasına imkân tanımaktadır (Biçer & Biçer, 2020). Elektrokimyasal ve fotokimyasal kararlılığın yüksek olması, algılama (sensör) sistemlerinde güvenilir sonuçlar alınmasını kolaylaştırmaktadır. Çok yönlü özellikleri ve nispeten basit üretim süreçleri nedeniyle, karbon noktaların gelecekte daha geniş bir uygulama yelpazesine yayılacağı değerlendirilmektedir (Yıldız vd., 2021).

3.2. KARBON NOKTA ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Karbon nokta üretim yöntemleri, genel olarak top-down (yukarıdan aşağıya) ve bottom-up (aşağıdan yukarıya) yaklaşımları çerçevesinde değerlendirilmektedir (Y. Wang & Hu, 2014a). Top-down yaklaşımında, daha büyük ölçekli karbon kaynaklarının parçalanması veya kimyasal aşındırma süreçleriyle nano boyutta karbon çekirdekler oluşturulmaktadır (Zhou vd., 2013a). Bottom-up yaklaşımında ise karbon içeren öncül moleküllerin kontrollü şekilde polimerleşmesi, pirolizi veya kondenzasyon reaksiyonları sonucu küçük boyutlu karbon noktaların sentezi hedeflenmektedir (Peng & Travas-Sejdic, 2009). Belirli üretim parametrelerinin değişimi, hem çekirdek yapısını hem de yüzey fonksiyonel gruplarını etkilemekte,

farklı uygulama alanları için özelleştirilmiş karbon noktaların geliştirilmesine imkân tanımaktadır (S. Zhu vd., 2013a).

Top-down yöntemleri arasında lazer ablasyonu, kimyasal oksidasyon ve elektriksel deşarj metotları sıklıkla anılmaktadır. Lazer ablasyon yönteminde, bir karbon kaynağı (grafit gibi) yoğun lazer ışınına maruz bırakılarak yüzeyde buharlaşma ve parçalanma süreçleri başlatılmaktadır. Oluşan buhar fazındaki karbon türleri, hızlı soğuma etkisiyle nano boyutlu parçacıklar hâline gelmektedir. Yöntem sırasında lazer gücü, atım süresi ve ortam atmosferi gibi değişkenler, ürünün boyut dağılımı ve yüzey özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Kimyasal oksidasyon yaklaşımında, güçlü asit veya oksitleyici çözeltiler yardımıyla grafit, kömür veya grafen benzeri karbon yapılarının katmanlı olarak aşındırılması sağlanmaktadır (S. Zhu vd., 2013a). Bu işlemin aşamalarında, asitli ortamda yüksek sıcaklık veya basınç değerleri uygulanarak karbonun küçük parçacıklara ayrışması amaçlanmaktadır. Elde edilen parçacıkların yıkama ve nötralizasyon adımlarıyla saflığı yükseltilmekte, yüzeydeki işlevsel gruplar ise oksijen, karboksil veya hidroksil içerikli türler şeklinde ortaya çıkmaktadır. Elektriksel deşarj yönteminde, yüksek voltajlı akım kullanılarak iki grafit elektrot arasında ark oluşturulmakta ve bu esnada ayrılan karbon türleri çöktürülmektedir (Zhou vd., 2013a). Top-down yaklaşımıyla sentezlenen malzemelerin yüzeyinde genellikle heterojen işlevsel gruplar gözlemlenmekte, bu durum farklı uygulama alanları için ek yüzey düzenlemelerine ihtiyaç doğurmaktadır.

Bottom-up yöntemleri içerisinde hidrotermal/solvotermal sentez, mikrodalga ile ısıtma, ultrasonikasyon ve termal piroliz gibi teknikler yaygın biçimde kullanılmaktadır (Y. Wang & Hu, 2014a). Hidrotermal sentez yaklaşımında, karbon içeren öncül maddeler (örneğin glikoz, sitrik asit ya da çeşitli organik atıklar) yüksek sıcaklık ve basınç altında reaksiyona sokulmaktadır (Peng & Travas-Sejdic, 2009). Basınçlı reaktörler veya otoklav sistemleri kullanılarak belirli sürelerde ısıtma uygulanmakta ve organik moleküllerin karbon çekirdekler oluşturacak şekilde parçalanması sağlanmaktadır. Solvotermal koşullarda ise organik çözücüler yardımıyla reaksiyon mekanizmaları kontrol altına alınmakta, son ürünlerdeki yüzey kimyası çözücü tipine göre şekillenmektedir. Hidrotermal yöntem, yeşil kimya

prensiplerine uygunluk ve düşük maliyet avantajlarıyla dikkat çekmekte, atık malzemelerin değerlendirilmesine de imkân tanımaktadır (Cao vd., 2024).

Mikrodalga destekli sentez, hızlı ve homojen ısıtma sağlaması nedeniyle karbon noktaların kısa sürede üretilbildiği bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Zhu vd., 2009). İşlem esnasında organik maddeler mikrodalga kaynağına maruz bırakılmakta, moleküllerin titreşimi ve çarpışmaları sonucunda ısınma meydana gelmektedir. Bu ısınma, klasik konvansiyonel ısıtma yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve verimli bir süreç sunmakta, yüksek verimle karbon noktaların oluşmasına zemin hazırlamaktadır (Peng & Travas-Sejdic, 2009). Mikrodalga gücü, reaksiyon süresi ve öncül madde özellikleri, elde edilecek parçacıkların boyut dağılımını ve fotoluminesan özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Üretim sürecinin kolay oluşu ve ekipman tasarımının nispeten basitliği, laboratuvar ve endüstriyel ölçek arasında hızlı geçiş yapma potansiyeli taşımaktadır.

Ultrasonikasyon yöntemi, ses dalgalarının sıvı ortamda oluşturduğu kavitasyon etkisinden yararlanarak organik moleküllerin parçalanmasına ve yeni bağların oluşumuna öncülük etmektedir (S. Zhu vd., 2013a). Yüksek frekanslı ses dalgaları, çözelti içinde ani basınç dalgalanmaları yaratarak küçük baloncukların oluşmasına ve patlamasına sebep olmaktadır. Bu şiddetli ve lokal mikro patlamalar, çözeltideki karbon bazlı moleküllerin kimyasal reaksiyonlarını tetiklemekte ve nano boyutta çekirdeklerin meydana gelmesini kolaylaştırmaktadır. Ultrasonikasyon sırasında çözelti kompozisyonu ve uygulama süresi gibi parametreler, reaksiyonun verimliliğini ve ürünün özelliklerini belirleyen unsurlar arasında yer almaktadır. Ultrasonik destekli yaklaşımların, düşük sıcaklıkta işlem yapma olanağı ve ek kimyasal reaktiflere daha az ihtiyaç duyulması gibi avantajları bulunmaktadır (Y. Wang & Hu, 2014a).

Termal piroliz ve yanma teknikleri, yüksek sıcaklık altında karbon içeren hammaddelerin parçalanması prensibine dayanmaktadır (Peng & Travas-Sejdic, 2009). Belirli ısı derecelerinde ve kontrollü atmosferde (örneğin inert gaz veya sınırlı oksijen) organik malzemelerin kararlı karbon çekirdeklerine dönüşümü sağlanmaktadır. Piroliz sürecinde, uçucu bileşenler gaz fazına geçmekte, geride ise yoğunlaşmış karbon parçacıkları kalmaktadır. Sıcaklık ve ısıl işlem süresi, oluşan

karbon noktaların boyut dağılımını ve kristal yapısını etkilemektedir. Hızlı ısıtma veya yavaş ısıtma tercihleri, malzemenin gözenekliliğini, yüzey kimyasını ve verim değerlerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Süreç sonrasında, elde edilen ürün genellikle su veya organik çözücüler ile yıkanarak saflaştırılmakta ve metal iyonları ya da diğer kirlilikleri uzaklaştırmak için ek prosedürler uygulanmaktadır.

Doplama ve yüzey fonksiyonelleştirme stratejileri, karbon nokta üretim sürecinin kritik adımları arasında görülmektedir (S. Zhu vd., 2013a). Azot, kükürt, fosfor ya da bor gibi heteroatomlarla doplama yapıldığında, karbon noktalarda farklı kimyasal reaktivite ve optik özellikler ortaya çıkmaktadır. Doplama işlemi, öncül maddeye uygun dopant kaynağı eklenerek, sentez aşamasında veya sentez sonrasında gerçekleştirilmektedir. Heteroatomların karbon kafes içine yerleşmesi, elektron düzenlemelerini değiştirerek fotoluminesan verimini artırabilmekte ya da yeni emisyon dalga boyları kazandırabilmektedir. Yüzey fonksiyonelleştirme ise çeşitli polimerler, ligandlar veya silan grupları aracılığıyla yapılmakta, hidrofilitiklik, yağ tutma kapasitesi, metal tutma yeteneği gibi işlevsel özellikler kazandırılmaktadır. Biyosensör ve biyo-uygulamalar için protein, peptit veya antikor eklenmesi de sıklıkla gündeme gelmektedir (Y. Wang & Hu, 2014a).

Kimyasal ve fiziksel yöntemlerin yanı sıra, yeşil sentez yaklaşımlarıyla organik atıkların dönüştürülmesi de literatürde ilgi görmektedir (Cao vd., 2024). Tarımsal kalıntılar, gıda artıkları ve hatta atık su çamurları, karbon nokta üretimi için potansiyel hammadde kaynağı oluşturmaktadır. Bu tür biyo-atıkların değerlendirilmesi, çevresel açıdan daha sürdürülebilir proseslerin önünü açmaktadır. Piroliz, hidrotermal reaksiyon veya kompostlama benzeri aşamalarla organik madde içinde yer alan karbon atomları yeniden düzenlenerek nano boyuttaki çekirdeklere dönüştürülmektedir. Elde edilen karbon noktalar, kirlilik önleyici uygulamalardan fotokatalitik proseslere kadar çok çeşitli alanlarda değerlendirilmektedir. Atık yönetimi ve nano malzeme üretiminin entegrasyonunu sağlayan yeşil sentez yöntemlerinin, önümüzdeki dönemde daha kapsamlı araştırmalara konu olacağı düşünülmektedir.

Karbon noktaların üretiminde kullanılan tüm bu yöntemler, belirli avantajlar ve sınırlılıklar içermektedir (Y. Wang & Hu, 2014a). Hidrotermal sentez, düşük maliyet

ve yeşil kimya prensipleriyle uyumlu olması bakımından öne çıkarken, lazer ablasyonu gibi top-down yaklaşımlar homojen boyut dağılımı kontrolünde güçlü bir potansiyel sergilemektedir. Kimyasal oksidasyon yöntemlerinde ise agresif reaktiflerin kullanılması, çevre ve ekipman güvenliği açısından ek önlemler gerektirebilmektedir. Mikrodalga ve ultrasonik destekli yöntemler, süreç hızını artırmakla birlikte reaktör tasarımı ve ölçek büyütme konularında özen isteyen bir planlama istemektedir. Her yöntemin kendine has parametreleri bulunduğu için, hedeflenen uygulamanın gerektirdiği optik, kimyasal veya yüzey özellikleri doğrultusunda üretim rotası seçilmektedir (S. Zhu vd., 2013a).

Elde edilen karbon noktaların fotofiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, üretim yönteminin yanı sıra saflaştırma ve karakterizasyon adımlarından da etkilenmektedir. Saflaştırma işlemleri sırasında dializ, ultra-filtrasyon veya kolonsuz anaför gibi yöntemler kullanılabilmekte, bu süreçte çözelti pH'ı ve iyonik gücü de ayarlanarak istenmeyen metal ve reaktif kalıntıları uzaklaştırılmaktadır. Karakterizasyon teknikleri arasında atomik kuvvet mikroskobu (AFM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve Raman spektroskopisi yer almaktadır (Zhou vd., 2013a). Elde edilen veriler, çekirdek boyutu, kristal yapı, yüzey kimyası ve fonksiyonel gruplar hakkında ayrıntılı bilgi sağlamaktadır. Fotolüminesan incelemeleri ise karbon noktaların emisyon dalga boyu, kuantum verimi ve uyarma dalga boyuna bağlı olarak gösterdiği davranışları ortaya koymaktadır (S. Zhu vd., 2013a).

Farklı üretim yöntemlerinin ve modifikasyon süreçlerinin kombinasyonu, uygulama odaklı karbon noktaların tasarlanmasını mümkün kılmaktadır (Cao vd., 2024). Çevre sensörlerinden biyomedikal tedavilere, optoelektronik cihazlardan enerji depolama sistemlerine kadar geniş kullanım alanı, üretim sürecinde esnekliği ve ölçeklenebilirliği zorunlu hâle getirmektedir. Bazı yöntemler, düşük sıcaklıkta çalışarak enerji maliyetini düşürmeyi hedeflerken, bazıları daha kontrollü boyut dağılımı veya yüksek kristal yapısı sunan ürünler ortaya koymaktadır (Y. Wang & Hu, 2014b). Üretim ve karakterizasyon protokolleri standart hale geldikçe, karbon noktaların endüstriyel ölçekte benimsenme hızının artacağı öngörülmektedir. Malzemelerin ekolojik olarak zararsız olması, toksik solvent veya ağır metal kullanımı

gerekmeden üretilebilmesi, ticari uygulamalarda karar vericiler için önemli kriterler oluşturmaktadır.

Geniş üretim çeşitliliği, karbon nokta araştırmalarının çok boyutlu bir çerçevede ele alınmasına sebep olmaktadır (H. Zhu vd., 2009a). Her yöntemin avantaj ve dezavantajlarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, uygulama alanına en uygun sentez rotasının seçilmesini kolaylaştırmaktadır. Mevcut teknolojiler geliştikçe, top-down ve bottom-up yaklaşımların melez çözümleri de gündeme gelmekte, nano boyutlu karbon parçacıkların daha yüksek saflıkla, daha iyi performansla ve daha sürdürülebilir yollarla üretilmesi hedeflenmektedir (S. Zhu vd., 2013a). Bu gelişmelerin, karbon noktaların akademik araştırmalarda ve endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir perspektifle incelenmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir (Peng & Travas-Sejdic, 2009).

3.3. KARBON NOKTALARIN ÖZELLEŞTİRİLMESİ

Karbon noktaların özelleştirilmesi, bu malzemelerin belirli uygulama alanlarında daha verimli ve hedeflenmiş kullanımını sağlamak amacıyla yapılan bir süreçtir. Bu özelleştirme, genellikle karbon noktaların yüzey modifikasyonları veya doplanması ile gerçekleştirilir (Li, He, vd., 2011a; D. Sun vd., 2013). Yüzey modifikasyonları, karbon noktaların kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirerek, özellikle biyomedikal, optoelektronik ve sensör teknolojileri gibi alanlarda daha yüksek performans elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Polisakaritler, peptitler, poliaminler veya organik asitler gibi işlevsel gruplarla kaplanan karbon noktalar, biyoyumluluklarını artırabilir ve hedeflenmiş tedavi alanlarında kullanılabilir (Xu vd., 2013). Karbon noktalar, aynı zamanda farklı elementlerle doplanarak özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirilebilir. Karbon noktaların doplanmasında kullanılan elementler arasında azot, kükürt, fosfor ve bor gibi heteroatomlar bulunmaktadır (S. Zhu vd., 2015a). Bu heteroatomlar, karbon kafeste elektron-dolanımını değiştirerek, daha gelişmiş optik özelliklerin ortaya çıkmasına yardımcı olabilir (S. Zhu vd., 2015a). Doplama ayrıca karbon noktaların yüzey enerjisini modifiye ederek, özellikle biyomoleküllerle etkileşim kapasitesini artırabilir. Örneğin, azot doplanmış karbon noktalar, güçlü floresan özelliklerine sahip olabilir ve biyosensörler için ideal malzemeler sunduğu

için yaygın olarak kullanılmaktadır (Xu vd., 2013). Ek olarak, karbon noktalara polimerik, protein bazlı veya silan gibi fonksiyonel grupların bağlanması, bu malzemelerin özelliklerine özgül işlevsellik kazandırabilir. Bu modifikasyonlar, karbon noktaların zıt ortam koşullarında, özel pH seviyelerinde veya ileride tedavi edilmesi gereken genetik hedeflere dayanabilecek şekilde özelleştirilmesine olanak tanır. Yüzey modifikasyonlarının ve doplama işlemlerinin kombinasyonu, karbon noktaların çeşitli uygulama alanlarına uygun olmasını sağlayarak, bu nano malzemelerin işlevsel kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır (Y. Wang & Hu, 2014a).

Karbon noktaların özelleştirilmesi, farklı uygulama gereksinimlerine uygun fonksiyonel özelliklerin kazandırılmasını içermektedir. Üretim sonrasında gerçekleştirilen kimyasal veya fiziksel işlemlerle, çekirdek yapısı ve yüzey kimyası seçici biçimde düzenlenebilmektedir (Zhou vd., 2013a). Dış yüzeye eklenen işlevsel gruplar veya heteroatom doplamaları, optik, elektriksel ve biyolojik etkileşimlerin kontrol edilmesinde etkili görülmektedir (S. Zhu vd., 2015a). Bu yaklaşım, sensör teknolojilerinden farmasötik uygulamalara kadar geniş bir yelpazede iyileştirilmiş performans sunma potansiyeline sahiptir (Xu vd., 2013).

Doplama stratejisi, karbon noktaların çekirdek yapısına farklı atomların eklenmesine dayanmaktadır (Y.-P. Sun vd., 2006). Azot, kükürt ve fosfor gibi elementler eklendiğinde, yeni elektronik geçişler ortaya çıkmakta ve fotoluminesan özelliklerinde dikkat çekici değişimler gözlemlenmektedir. Azot doplaması, genellikle daha parlak emisyon ve yüksek kuantum verimi elde etmek amacıyla tercih edilmektedir. Kükürt doplanmış karbon noktalar, kataliz uygulamalarında kükürt merkezli aktif noktalar oluşturması nedeniyle ilgi çekmektedir (Li, He, vd., 2011a). Heteroatom ekleme işlemi, üretim aşamasında veya sonrasında farklı reaktifler kullanılarak gerçekleştirilebilmekte ve böylece yapısal dönüşümler kontrol altına alınabilmektedir.

Yüzey fonksiyonelleştirme, karbon noktaların dış yüzeyinde yer alan kimyasal grupları düzenleyerek farklı çözeltilerde dağılma, biyolojik moleküllerle etkileşim ve hedefe yönelik bağlanma gibi işlevleri güçlendirmektedir (Y. Wang & Hu, 2014a). Polimerler, proteinler veya ligandlar kullanılarak oluşturulan kaplamalar, su itici veya

hidrofilik yüzeylerin tasarlanmasına ve çeşitli iyonlarla seçici bağlanmanın sağlanmasına katkı sunmaktadır (Zhou vd., 2013a). Biyomedikal uygulamalarda, hücre hedefleme mekanizmalarında görev alan ligandlar karbon noktaların yüzeyine eklenerek dokulara özgü tutunma süreçleri geliştirilmekte ve ilaç taşıma potansiyeli yükseltilmektedir (Xu vd., 2013). Farklı fonksiyonelleştirme yaklaşımlarının bir arada kullanılması, malzemenin çok yönlü uygulama alanlarında daha başarılı performans göstermesi bakımından önem taşımaktadır. Bu süreçlerin kontrollü yürütülmesi, karbon noktaların istenen niteliklerde ve yüksek saflık düzeyinde elde edilmesini mümkün kılmaktadır (S. Zhu vd., 2013a).

3.4. KARBON NOKTALARIN AVANTAJLARI VE SINIRLAMALARI

Karbon noktaların avantajları arasında fotolüminesan özelliklerinin yüksek olması ve geniş bir dalga boyu aralığında emisyon verebilmesi önemli bir yer tutmaktadır (Baker & Baker, 2010; Y.-P. Sun vd., 2006). Küçük boyutları ve yüksek yüzey alanları, kimyasal ve biyolojik ortamlarda kolayca dağılmalarına imkân tanımaktadır. Biyoyumluluk düzeyinin genellikle yüksek olduğu, bu nedenle biyomedikal uygulamalarda tercih edildiği rapor edilmektedir (Li, He, vd., 2011a). Üretim yöntemlerinde organik atıklar veya basit karbon kaynakları kullanılarak maliyet etkin ve çevre dostu süreçler yürütülebilmektedir. Yüzey fonksiyonelleştirme stratejileriyle farklı uygulama alanlarına özgü özellikler kazandırılmakta, sensör veya kataliz gibi sektörlerde işlevsellik artışı sağlanmaktadır (S. Zhu vd., 2015a).

Optik ve elektronik özelliklerin ayarlanabilir nitelikte olması, karbon noktaların fotovoltaiik ve optoelektronik cihazlarda kullanımını desteklemektedir (Y.-P. Sun vd., 2006). Elektrokimyasal kararlılık düzeyinin yüksek olduğu, bu nedenle pil elektrotları ve süperkapasitör malzemeleri gibi enerji depolama uygulamalarında çeşitli araştırmalara konu edildiği belirtilmektedir (Baker & Baker, 2010). Basit sentez protokolleri, üretim ölçeğinin laboratuvarından endüstriyel boyuta taşınmasına imkân tanıyarak daha geniş bir pazar potansiyeline kapı aralamaktadır (Li vd., 2012a).

Bazı sınırlamalar, ürün kalitesi ve uygulama sürekliliğini etkileyebilmektedir. Üretim süreçlerinde standardizasyon eksikliği, farklı laboratuvar veya tesislerde üretilen

karbon noktaların özelliklerinin karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır (S. Zhu vd., 2015a). Boyut, yüzey kimyası ve doplama derecesindeki heterojenlik, spesifik uygulamalar için istenen performansın yakalanamamasına yol açabilmektedir. Fotolüminesan mekanizmalarının tam olarak anlaşılmaması ve farklı sentez yöntemleri arasında gözlenen verim değişiklikleri, ölçek büyütme çalışmalarında güçlük yaratabilmektedir. Bazı uygulamalarda kararlılık ve uzun dönemli dayanıklılık bakımından geleneksel nanomalzemelere kıyasla daha az güvenilir olduğu ifade edilmektedir (Y.-P. Sun vd., 2006).

Toksisite konusundaki belirsizlikler de dikkat çekmektedir. Her ne kadar çoğu çalışmada düşük toksisite düzeyi rapor edilse de, farklı sentez yöntemleri ve yüzey modifikasyonlarının canlı sistemlerde oluşturabileceği etkiler üzerinde daha kapsamlı araştırmaların gerekliliği vurgulanmaktadır (Li vd., 2012a; S. Zhu vd., 2015a). Bu nedenle, karbon noktaların avantajlarından tam olarak yararlanabilmek adına sentez protokollerinin standardizasyonu ve güvenilirlik analizlerinin iyileştirilmesi önerilmektedir (Baker & Baker, 2010).

3.5. KARBON NOKTALARIN UYGULAMA ALANLARI

Karbon noktaların uygulama alanları, geniş bir disiplinler arası yaklaşım içinde incelenmekte ve farklı sektörlerde yüksek katma değerli çözümler sunduğu ifade edilmektedir (Mewada vd., 2014; Oza vd., 2016). Üretim yöntemlerindeki çeşitlilik ve karbon noktaların fotofiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerindeki esneklik, bu malzemelerin birçok endüstriyel ve bilimsel uygulamada tercih edilmesini sağlamaktadır (Li vd., 2012a). Küçük boyutları, yüksek yüzey alanları, fotolüminesan özellikleri ve genellikle düşük toksisite düzeyi, özellikle biyomedikal ve çevre teknolojilerinde cazip fırsatlar oluşturduğu şeklinde değerlendirilmektedir (Shi vd., 2012; S. Zhu vd., 2015a). Kullanılacak uygulama amacına göre, üretim ve modifikasyon parametrelerinin düzenlenmesiyle karbon noktalar istenen performansa uyarlanabilmektedir (Pandey vd., 2013).

Biyomedikal uygulamalarda, karbon noktaların düşük toksisite ve iyi biyoyumluluk seviyeleri dikkate alınmaktadır (Mewada vd., 2014). Hücre içi görüntüleme ve in vivo

tanı süreçlerinde, kuvvetli fotoluminesan performanslarının faydalı olduğu belirtilmektedir. Işık uyarması altında farklı dalga boylarında parlak emisyon verebilen karbon noktalar, hücre içindeki yapıları etiketlemede ve izlenmesinde kullanılabilmektedir. Mikroskopik düzeyde elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler sayesinde, patolojik süreçlerin erken teşhisi veya ilaç etkileşimi araştırmaları yürütülebilmektedir. Floresan boyalara kıyasla düşük fotobleaching etkisi ve daha kararlı sinyal verme kabiliyeti, karbon noktaların avantajlı özellikleri arasında sıralanmaktadır (Shi vd., 2012). Hücre yüzeyine veya sitoplazmaya özgü bağlanma gerçekleştirecek ligandlar eklenerek, hedefe yönelik tanı ve tedavi protokolleri geliştirildiği bildirilmektedir (Pandey vd., 2013) .

İlaç taşıma ve kontrollü salınım sistemlerinde de karbon noktaların potansiyel kullanım alanları üzerinde durulmaktadır (Mewada vd., 2014; Pandey vd., 2013). Yüzey fonksiyonelleştirme teknikleri aracılığıyla belirli ilaç moleküllerinin karbon noktalara yüklenmesi ve dokulara özgü hedeflenmesi sağlanabilmektedir. İlacın vücutta dolaşımı sırasında yan etki riskini azaltmak ve verimliliği artırmak amacıyla, pH veya sıcaklık duyarlı mekanizmalar kurgulandığı ifade edilmektedir. Karbon noktaların küçük boyutları ve geniş yüzey alanları, yüksek ilaç yükleme kapasitesine zemin hazırlamaktadır. Bozunabilir veya kalıcı matrislerin tasarımında, doplama işlemleri ve polimer kaplama stratejileri de eklenerek farklı salınım profilleri elde edilebilmektedir. Bu uygulamaların halen laboratuvar ve klinik öncesi aşamalarda incelendiği, fakat gelecekte daha yaygın kullanım şansının değerlendirilmekte olduğu söylenmektedir (Oza vd., 2016).

Fotodinamik terapi alanında, karbon noktaların ışığa tepki vererek reaktif oksijen türleri üretme kapasitesi araştırılmaktadır (Pandey vd., 2013) . Kanser hücreleri veya patojen mikroorganizmalar üzerinde lokalize edilen karbon noktalar, belirli dalga boyundaki ışık altında aktiveleştirilerek hücre zarı hasarı ya da DNA hasarı oluşturabilmektedir. Konvansiyonel fotodinamik terapi ajanlarına kıyasla daha düşük yan etki ve hassas hedefleme imkânları sunduğu, bazı çalışmalarda öne çıkarılmaktadır. Bu yaklaşımın, özellikle çoklu ilaç direncine sahip hücre gruplarına karşı alternatif bir tedavi yöntemi olarak dikkat çektiği bildirilmektedir (Mishra vd., 2015). Fotodinamik etkinin verimliliği, karbon noktaların yüzey kimyası ve optik

özellikleriyle yakından ilişkili olduğu için, üretim sürecinin titizlikle kontrol edilmesi gerekmektedir.

Çevre ve su arıtma uygulamaları, karbon noktaların bir diğer önemli kullanım alanını yansıtmaktadır. Yüzey fonksiyonel grupları ve yüksek adsorpsiyon kapasiteleri sayesinde, ağır metal iyonlarının veya organik kirleticilerin tutulmasında etkili olabileceği ifade edilmektedir (Li, Zhang, vd., 2011a). Klasik aktif karbon uygulamalarına ek olarak, karbon noktalar su içerisinde dağılabilmekte ve böylelikle yüksek etkileşim yüzeyi sağlayabilmektedir. Koagülasyon-flokülasyon süreçlerinde katkı malzemesi olarak kullanılması, kirlilik giderme verimini artırabilir şeklinde değerlendirilmektedir. Ağır metal iyonlarıyla kovalent veya koordinatif etkileşime girebilen yüzey grupları, seçici adsorpsiyon yöntemlerinde avantaj sunmaktadır (Shi vd., 2012). Fotokatalitik arıtma yaklaşımlarında ise karbon noktaların foton soğurma ve yük taşıma becerileri, organik kirleticilerin hızlı parçalanmasına katkıda bulunabilmektedir (Xie vd., 2014). Bu süreçlerde, güneş ışığı veya yapay ışık kaynakları kullanılarak çevre dostu ve enerji tasarruflu arıtma teknolojileri geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Sensör teknolojilerinde, karbon noktaların fotoluminesan ve elektrokimyasal özellikleri kullanılmaktadır (Li vd., 2012a; A. Zhu vd., 2012a). Kimyasal ve biyolojik sensörlerde, hedef molekülle etkileşime girdiğinde emisyon özelliği değişen karbon noktalar, yüksek duyarlılık sağlayabilmektedir. Örneğin, ağır metal iyonu veya toksik bileşiklerin tespiti sırasında, karbon noktaların parlaklığı veya dalga boyu kayması üzerinden kantitatif analiz yapılması mümkündür (Shi vd., 2012). Biyosensör tasarımlarında, antikor veya aptamer benzeri tanıma elemanlarının karbon nokta yüzeyine sabitlenmesi, seçici algılama kapasitesini yükseltmektedir (A. Zhu vd., 2012a). Elektrokimyasal sensörlerde ise iletkenlik artırıcı katkı olarak karbon noktaların eklenmesi, sensör elektrotlarında düşük çalışma potansiyeli ve yüksek akım yoğunluğu gibi avantajlar sunmaktadır (Li, Zhang, vd., 2011b). Tıp alanında glikoz, laktat veya diğer metabolitlerin gerçek zamanlı analizi konusunda yapılan çalışmaların, karbon nokta tabanlı sensörlerin performansını test ettiği gözlemlenmektedir.

Enerji depolama ve dönüştürme teknolojilerinde, karbon noktaların elektrokimyasal kararlılığı ve yüksek yüzey alanı özellikleri dikkat çekmektedir (S. Zhu vd., 2015a). Pil ve süperkapasitör elektrotlarında, aktif maddeye eklenen karbon noktaların elektron iletimini kolaylaştırarak kapasite değerlerini iyileştirdiği vurgulanmaktadır (Xie vd., 2014). Lityum-iyon veya sodyum-iyon pillerde, hızlı şarj-deşarj süreçlerinde yaşanan performans kayıplarının azalması için karbon noktaların tampon malzeme olarak katkı sağladığı bildirilmektedir (S. Zhu vd., 2015a). Süperkapasitör uygulamalarında, gözenekli yapı içindeki karbon noktalar, daha fazla yük depolama alanı sunarak enerji yoğunluğunu artırabilmektedir (S. Zhu vd., 2015a; Ma vd., 2013). Yakıt pili teknolojilerinde, elektrokatalitik aktivitenin geliştirilmesi amacıyla karbon noktaların metal nanoparçacıklarla hibrit yapı oluşturduğu araştırmalar öne çıkmaktadır (Xie vd., 2014).

Güneş pilleri ve fotovoltaiik cihazlarda, karbon noktalar ışık soğurma ve yük taşıma özelliklerinden ötürü incelenmektedir (X. Zhang vd., 2013). Geleneksel yarıiletken malzemelere kıyasla daha düşük üretim maliyeti ve daha kolay işlenebilirlik sunma potansiyeli bulunduğu ifade edilmektedir (Ma vd., 2013). Organik ve hibrit solar hücrelerde, karbon noktaların aktif tabakaya katılması veya ara yüzey katmanı olarak kullanılması, şarj taşıyıcılarının transferinde iyileşme sağlamaktadır. Farklı dalga boylarını soğurabilme becerisi, özellikle geniş tayfın değerlendirilmesi gereken çok katmanlı fotovoltaiik uygulamalarında dikkat çekmektedir. Yüksek kararlılık düzeyi ve su bazlı mürekkeplere karıştırılabilme imkânları, baskılı elektronik sektöründe de karbon noktaların değerlendirilmesini gündeme getirmektedir (Mishra vd., 2015).

Optoelektronik cihazlar, ışık yayan diyotlar (LED), lazerler ve ekran teknolojileri gibi alanlarda karbon noktaların fosfor materyali olarak potansiyeli araştırılmaktadır (X. Zhang vd., 2013). Parlak ve kararlı bir emisyon elde edilebilmesi, uzun çalışma ömrü ve düşük enerji tüketimi açısından avantaj sağlamaktadır. Geleneksel inorganik fosforların toksisite ve yüksek maliyet problemleri, karbon noktaların bu alanda çekiciliğini artırmaktadır. Renk ayarının doplama ve yüzey modifikasyonlarıyla sağlanması, tam renkli LED ve ekran uygulamaları için yeni fırsatlar sunmaktadır (Mishra vd., 2015). Isıl kararlılık veya oksidasyona direnç bakımından geliştirmeler gerekebildiği, bu alandaki prototip çalışmalarının hızla sürdürüldüğü belirtilmektedir.

Katalitik süreçlerde, karbon noktaların aktif merkezler veya yük taşıyıcı platformlar olarak görev aldığı araştırmalar bulunmaktadır (Xie vd., 2014). Metal nanoparçacıkların homojen dağılımını sağlayan karbon noktalar, katalizör verimini artırabilmektedir. Katalitik hidrojen üretimi, yakıt pili reaksiyonları veya organik sentezlerde karbon noktalar destek materyali olarak işlev görebilmektedir. Yüzeylerindeki oksijen içeren gruplar veya heteroatom dopları, reaktif moleküllerle etkileşimde kilit rol oynayabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda çalışabilen katalitik reaksiyonlar, enerji tasarrufu sağlayarak endüstriyel prosesleri iyileştirme potansiyeline sahiptir (S. Zhu vd., 2015a) Su bölünmesi (water splitting), karbondioksit dönüşümü (CO_2 dönüşüm reaksiyonları) gibi yeşil kimya süreçlerinde de karbon nokta bazlı katalizörlerin test edildiği bildirilmektedir.

Savunma sanayi ve güvenlik alanında, karbon noktalar kimyasal sensörler ve biyosensörler geliştirmenin yanı sıra kamuflaj malzemeleri veya gizli işaretleme (security ink) teknolojilerinde incelenmektedir (Oztan vd., 2021). Malzemenin farklı dalga boylarında floresan emisyon vermesi ve çevre koşullarına duyarlı renk değişimi göstermesi, güvenlik etiketleri veya sahteciliği önleyici uygulamalar için avantaj yaratmaktadır. Aşırı koşullarda stabil kalabilme kapasitesi, askeri malzemelerde kullanım imkânını genişletmektedir. Kamuflaj kaplamalarında ise yüzeyin termal veya UV özelliklerini ayarlama karbon noktaların rol oynayabileceği, ön araştırma sonuçlarında yer almaktadır (Oztan vd., 2021).

Gıda endüstrisinde, karbon noktaların gıda izleme ve kalite kontrol amaçlı sensör platformlarında kullanıldığı çalışmalar yürütülmektedir (Li, Zhang, vd., 2011a). Gıdaların taze kalma sürecini takip eden sistemlerde, karbon nokta tabanlı sensörler ısı, nem veya kimyasal parametre değişimlerini tespit edebilmektedir. Paketleme malzemelerine entegre edilen bu sensörler, ürün bozulmasını erken aşamada belirleyerek gıda güvenliğini artırabilir şeklinde değerlendirilmektedir. Antimikrobiyal katkı olarak karbon noktaların kullanılması, yüzeyde bakteri üremesini engellemeye yönelik bazı araştırma projelerinde yer almaktadır (Shi vd., 2012). Gıdaya temas eden malzemelerde toksisite konusu hassas olduğu için, bu çalışmalarda kapsamlı güvenlik testlerinin yapılması önem kazanmaktadır.

Tekstil ve akıllı kumaş uygulamalarında, karbon noktaların ışıma özelliğinden yararlanılmakta, aynı zamanda hidrofobik veya antimikrobiyal kaplama olarak işlev görmeleri için yüzey düzenlemeleri denenmektedir (Mishra vd., 2015). Giyilebilir elektroniklerde, esnek sensör devreleri ve güneş enerjisi yakalayıcı katmanlar tasarlamak amacıyla karbon nokta gömülü liflerin üretimi hedeflenmektedir. Spor giyim ve medikal tekstillerde, vücut sıcaklığı veya kimyasal salgıları algılayan akıllı sensörlerin karbon noktalarla geliştirilmesi üzerinde durulmaktadır. Gözenekli yapılara nüfuz edebilen bu nanomalzemelerin, kumaş dokusunu bozmayacak şekilde entegre edilmesi ve dayanıklılık testlerinden geçmesi gerekmektedir (Mishra vd., 2015).

Boyar madde ve mürekkep endüstrilerinde, karbon noktaların floresan özelliklerinin renk paletini zenginleştirdiği ve dayanıklı boyalar üretme konusunda katkı sunduğu bildirilmektedir (Ma vd., 2013). Kağıt, plastik ve metal yüzeylere uygulanan mürekkepler, ışık altında farklı renk tonları ve parlaklık düzeyleri gösterebilmektedir. Güvenlik etiketleri, optik kodlama ve dekoratif baskılar için düşük maliyetli ve çevre dostu çözümler sunulduğu belirtilmektedir (Mishra vd., 2015). Su bazlı formülasyonlarla kolayca karıştırılabilme özelliği, endüstriyel mürekkep üretimi süreçlerinde karbon noktaların daha geniş kullanımına olanak tanımaktadır.

Uzay ve havacılık uygulamalarında, hafiflik, termal kararlılık ve yüksek yüzey alanı gereksinimleri, karbon noktaların ısı koruma kaplamalarında, elektromanyetik kalkanlamada veya gelişmiş kompozit malzemelerde destek malzemesi olarak incelenmesiyle sonuçlanmaktadır (Oztan vd., 2021). Titreşim sönümleme ve ısı dağıtımı gibi özelliklerin iyileştirilmesinde, karbon nokta katkısının test edildiği raporlarda yer almaktadır. Yoğun radyasyon veya düşük basınç koşullarında malzemenin kararlılığının sürdürülmesi, uzun süreli görevlerde avantaj sağlamaktadır. Kriyojenik ortamlarda yakıt hattı veya ekipman bileşenlerinde karbon nokta tabanlı kaplamaların kullanılabilmesi, sızdırmazlık ve ısı yalıtımı gibi ek faydalar sunabilmektedir (Xie vd., 2014).

İnşaat ve yapı malzemesi sektöründe, beton ve çimento esaslı karışımlara eklenen karbon noktaların mekanik ve fonksiyonel özellikleri güçlendirme potansiyeli araştırılmaktadır (Mishra vd., 2015). Mikro çatlak oluşumunu engellemek veya su geçirmezliği artırmak amacıyla, nano ölçekli katkıların kullanıldığı belirtilmektedir. Karbon noktalar, beton içindeki gözeneklere nüfuz edebilmekte ve matris-arayüz etkileşimlerini düzenleyebilmektedir. Korozyon önleme ve betonarme donatıların korunması açısından, karbon noktaların elektriksel iletkenlik ve korozyona karşı bariyer oluşturma rolü irdelenmektedir. Uzun vadede, daha hafif ve dayanıklı yapı malzemeleri geliştirilmesiyle inşaat sektöründe sürdürülebilirlik ve ekonomik tasarruf hedeflendiği ileri sürülmektedir.

Tarım ve gıda üretimi alanında, bitki büyümesini teşvik edici katkı olarak karbon noktaların kullanımı konusunda araştırmalar bulunmaktadır (Li, Zhang, vd., 2011a). Toprağa veya besin çözeltilerine eklenen karbon noktaların, bitki köklerinin su ve besin maddelerini daha etkili şekilde almasına katkı sunabileceği belirtilmektedir. Bitki metabolizmasını düzenleyici veya patojenlere karşı direnç kazandırıcı mekanizmaların, karbon noktaların yüzey kimyası ile bağlantılı olabileceği vurgulanmaktadır. Tarım ilaçlarının kontrollü salınımı amacıyla karbon noktaların etkinleştirildiği veya pestisit kalıntılarının temizlenmesinde kullanılan arıtma süreçlerine dahil edildiği uygulama örnekleri de rapor edilmektedir (Shi vd., 2012).

Estetik ve kozmetik ürünlerde, karbon noktaların antioksidan özellikleri ve ışık saçma kabiliyeti gündeme gelmektedir (Mishra vd., 2015). Cilt bakım ürünleri, güneş kremleri veya saç boyalarında, nano katkıların performansı arttırdığı öne sürülmektedir. Ciltteki UV korumasını güçlendirme, leke giderici etki veya yaşlanma karşıtı içerik olarak karbon noktaların değerlendirilmesi fikri, laboratuvar düzeyinde test aşamasındadır. Kozmetik sektöründe toksisite ve güvenlik standartlarının yüksek olması nedeniyle, karbon nokta katkılı ürünlerin piyasaya çıkma süreci uzayabilmektedir.

Tüm bu uygulamaların hayata geçirilmesinde, üretim ve karakterizasyon süreçlerinin standardizasyonu önem kazanmaktadır (Y. Zhu vd., 2013). Karbon noktaların boyut dağılımı, doplama miktarı ve yüzey gruplarının kimyası, uygulama performansını

doğrudan etkilemektedir. Farklı laboratuvarlarda geliştirilen sentez protokollerinin bir arada değerlendirilebilmesi ve sektörel ölçekte kabul görececek sertifikasyon mekanizmalarının oluşturulması gerektiği öne sürülmektedir (Shi vd., 2012). Ürün güvenilirliği ve kalite kontrolü, geniş kullanım alanlarına sahip bu malzemenin endüstriyel başarıya ulaşmasında belirleyici bir etken olarak görülmektedir.

Daha yüksek verim, kararlılık ve spesifik fonksiyonlar elde etmek amacıyla, melez malzeme tasarımları yapılmaktadır (Mishra vd., 2015). Karbon noktaların polimer, seramik veya metal hibritlerle birleştirilmesi, yeni nesil kompozitlerin performansını artırabilmektedir. Bu yaklaşım, hem çoklu avantajları bir arada sunmaya hem de farklı disiplinlerin gereksinimlerini karşılamaya yönelik kapsamlı bir platform sağlamaktadır. Örnek olarak, iletken polimer matrisine yerleştirilen karbon noktaların, esnek elektronik sensörler ve hafif koruyucu ekipmanlar tasarlamak için kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır(X. Zhang vd., 2013; Zhou vd., 2013b).

Küresel ölçekte, karbon noktaların üretim ve uygulama hacminin hızla yükseldiği tahmin edilmektedir (Mewada vd., 2014). Çevre kirliliği, enerji krizi ve tıbbi zorluklar gibi önemli sorunlara yenilikçi çözümler bulunması amacıyla, bu nanomalzemenin geliştirilmesi ve adaptasyonu üzerinde yoğunlaşmıştır (Oza vd., 2016). Ticari ürünlerin pazara sunulabilmesi için, ürünlerin uzun vadeli stabilitesi, toksisite profili, maliyet analizi ve sürdürülebilirlik kriterleri göz önüne alınmaktadır (Pandey vd., 2013). Devlet teşvikleri ve özel sektör yatırımları, inovasyon ekosisteminde karbon nokta odaklı Ar-Ge projelerini artırmaktadır (Shi vd., 2012; Xie vd., 2014).

Araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde kullanılan çok yönlü karakterizasyon teknikleri, karbon noktaların özelliklerini derinlemesine inceleme ve iyileştirme imkânı sunmaktadır (Y. Zhu vd., 2013). Yüksek çözünürlüklü mikroskopi yöntemleri, yüzey kimyasını ve kristal yapı özelliklerini ortaya koyarken, spektroskopik analizler emisyon mekanizmalarını, kuantum verimini ve doplama düzeylerini incelemeye olanak tanımaktadır. Bilgisayar tabanlı simülasyonların ve modellemelerin de devreye girmesiyle, hedeflenen uygulamaya uygun optimizasyon süreçleri hızlanmaktadır (Mishra vd., 2015).

Karbon noktaların gelecek uygulama yelpazesinde, yapay zekâ destekli tasarım ve veri analizleriyle birlikte daha özgün çözümlerin ortaya konulacağı umulmaktadır (X. Zhang vd., 2013). Üretim parametrelerinin sistematik varyasyonları ve geri bildirim mekanizmaları, gerçek zamanlı optimizasyon yaklaşımlarını getirmektedir. Küçük ölçekli pilot tesislerden seri üretim hatlarına geçiş yapabilmek, market talebine cevap veren ürün çeşitliliğini sağlamak ve rekabetçi fiyat politikaları oluşturmak, karbon noktaların endüstriyel konumunu güçlendirecektir (Xie vd., 2014).

Tüm bu açılardan bakıldığında, karbon noktalar pek çok sektörde teknolojik sıçramalara imkân tanıyan bir malzeme olarak değerlendirilmektedir (Li vd., 2012b). Biyomedikal tanı ve tedaviden su arıtma teknolojilerine, enerji depolamadan optoelektronik cihazlara kadar uzanan geniş çalışma alanı, malzeme bilimi ve mühendislik alanlarının birlikteliğiyle şekillenmektedir (Y. Zhu vd., 2013). İlerleyen dönemde daha fazla iş birliği ve çok disiplinli araştırma projeleriyle, karbon noktaların yenilikçi ürünlerde daha görünür hâle gelmesi hedeflenmektedir. Üretim ve uygulama süreçlerinin sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve ekonomik etkinlik boyutlarıyla birlikte düşünülmesi, bu güçlü potansiyelin hayata geçirilmesinde büyük önem taşımaktadır (Mewada vd., 2014).

BÖLÜM 4

BİYOBOZUNURLUK

4.1. BİYOBOZUNUR POLİMER KAVRAMI

Biyobozunur polimer kavramı, doğal ortamlarda veya canlı organizmalarda kimyasal ve biyolojik süreçler aracılığıyla parçalanabilen malzemeleri ifade etmek üzere tanımlanmaktadır (Niaounakis, 2015; Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Polimer yapı taşlarının enzimatik veya hidrolitik reaksiyonlar sonucu daha küçük moleküllere dönüştürülmesi, bu sürecin temelini oluşturmaktadır. Elde edilen küçük moleküller genellikle karbondioksit, su ve biyokütle gibi çevreye uyumlu yan ürünler içermektedir. Bu özellik, atık yönetimi ve çevre koruma konularında önemli bir avantaj sağlamaktadır (Niaounakis, 2015).

Üretim sürecinde kullanılan hammaddeler ve polimerizasyon koşulları, biyobozunur polimerlerin kimyasal yapısını ve bozulma hızını belirlemektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Doğal kaynaklı polimerlerin (örneğin nişasta, selüloz veya protein temelli malzemelerin) yanı sıra sentetik bileşenlerle üretilen biyobozunur polimer türleri de bulunmaktadır. Sentez aşamasında, polimerin zincir yapısı ve fonksiyonel grupları, farklı bozulma mekanizmalarının etkinleşmesine imkân tanımaktadır. Belli sıcaklık, pH veya enzim varlığında daha hızlı bozunabilen türler, özellikle medikal ve farmasötik uygulamalarda tercih edilmektedir. Endüstriyel ölçekte üretim koşullarının iyileştirilmesi sayesinde, maliyet etkin ve sürdürülebilir ürünlerin piyasaya sunulduğu gözlemlenmektedir (Niaounakis, 2015).

Atık yönetimi ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda biyobozunur polimerlerin önemi giderek artmaktadır (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Geleneksel plastiklerin doğaya karışması uzun yıllar alırken, biyobozunur özellikli polimerler nispeten daha kısa süre içinde parçalanmaktadır (Geyer vd., 2017). Çöp sahaları,

kompostlama tesisleri ve diğer bertaraf sistemlerinde bu süreç daha hızlı ilerleyebilmektedir. Günlük hayatta kullanılan ambalaj malzemeleri, tek kullanımlık kaplar veya tıbbi atıklar gibi ürün gruplarında çevre dostu alternatiflerin yaygınlaşması dikkat çekmektedir. Bu gelişmeler, sürdürülebilir bir ekonomi modeli oluşturmayı ve ekolojik etkileri azaltmayı hedefleyen girişimlerle desteklenmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017).

4.2. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN SINIFLANDIRILMASI

4.2.1. Doğal Kaynaklı Polimerler

Doğal kaynaklı polimerler, canlı organizmalar tarafından sentezlenen veya doğada bolca bulunan biyopolimerlerden oluşmaktadır (Niaounakis, 2015; Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Selüloz, nişasta, kitin ve kitosan gibi örnekler, bu gruba dâhil edilen başlıca bileşenler arasında yer almaktadır. Özellikle bitkisel ve hayvansal kökenli hammaddelerden elde edilen polimerlerin, çevresel ve biyolojik uyum açısından avantaj sağladığı belirtilmektedir (Geyer vd., 2017). Sürdürülebilirlik odaklı uygulamalar için doğal kaynaklı polimerlerin kullanılmasının, ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirme potansiyeli taşıdığı ifade edilmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Bu malzemelerin elde edilmesi sırasında, biyolojik sistemlerde veya tarımsal ürünlerde mevcut bol miktarda kaynakların değerlendirilmesi gözetilmektedir (Niaounakis, 2015).

Selüloz, bitki hücre duvarının temel yapısında yer alan ve en çok bulunan organik polimerlerden biridir. Lifsel özellikleri ve mekanik dayanımı nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulunduğu görülmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Su tutma kapasitesi, biyobozunabilirliği ve kimyasal modifikasyonlara elverişli yapısı, selüloz esaslı malzemeleri endüstriyel ve akademik çalışmalarda tercih edilen bir seçenek hâline getirmektedir (Niaounakis, 2015). Kağıt endüstrisinde selülozun hâlihazırda yoğun kullanımı dikkate alındığında, bu polimerin esnek ve uyarlanabilir nitelikleri, çok yönlü uygulamalara uyum sağlamaktadır. Aynı zamanda, selüloz türevlerinin (örneğin selüloz asetat veya karboksimetilselüloz) üretimi yoluyla, daha spesifik işlevler kazandırılmış ürünlerin geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

Niřasta, bitkilerde karbonhidrat deposu olarak işlev gören bir diğer doğal kaynaklı polimerdir. Amiloz ve amilopektin adı verilen iki temel glikoz zincirinden oluşan nişastanın, termoplastik hâle getirilmesi ve biyobozunur ambalaj materyallerinin tasarlanması konularında ilgi çekici olduğu bildirilmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Mısır, patates, buğday ve manyok gibi tarımsal kaynaklardan elde edilen nişasta eřitleri, evre dostu alternatiflerin oluşturulmasında kullanılmaktadır (Niaounakis, 2015). Isı ve basınç uygulanması sonucu, nişastanın yapı taşları arasında farklı bağlanma düzenekleri oluşmakta ve termoset nitelikli malzemelere doğru gelişmeler sağlanmaktadır. Elde edilen ürünlerin su ve nem hassasiyeti, çeşitli katkı maddeleri veya karışımlar kullanılarak iyileştirilebilmektedir (Geyer vd., 2017).

Kitin ve kitosan, deniz kabuklularının dış iskeletinde ve bazı mantar türlerinde bulunan azotlu polisakkaritler olarak anılmaktadır. Biyomedikal ve farmasötik uygulamalarda, özellikle kitosanın biyoyumluluğu ve antibakteriyel özellikleri ne çıkmaktadır (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Kan pıhtılaştırma mekanizmasında aktif rol oynayabildiği ve yara iyileşmesini desteklediği için, doku mühendisliği ve yara örtüleri gibi alanlarda kullanımının yaygınlaştığı gözlemlenmektedir (Niaounakis, 2015). Kitin, kitosana dönüştürüldüğünde hem çözünürlük hem de işlenebilirlik açısından daha elverişli bir hl almakta, böylece geniş bir malzeme yelpazesi içinde yer bulmaktadır. Kimyasal düzenleme ve çapraz bağlama yöntemleriyle, farklı sertlik düzeylerine veya gözenek yapısına sahip ürünler tasarlanmaktadır (Geyer vd., 2017).

Doęal kaynaklı polimerlerin evre dostu özellikleri, geri dönüştürülebilirlik ve biyoznrlk gibi faktörlerin yanı sıra, endüstriyel ölçekte retilabilir olmasıyla da ilişkilendirilmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Tarımsal artıkların değerlendirilmesi, atık miktarının azaltılmasına ve sürdürülebilir bir üretim modelinin benimsenmesine katkı sunmaktadır. Tıbbi, paketleme, tarım ve tekstil gibi farklı sektörlerde, doğal polimerlerin sunduğu çok yönlülük dikkate alınmakta, süreç ve ürün geliştirmeye yönelik yeni araştırmalar yürütülmektedir (Niaounakis, 2015). Farklı işlemlerle modifiye edilen doğal kaynaklı polimerler, mevcut özelliklerin geliştirilmesine ve daha spesifik performans kriterlerinin karşılanmasına olanak

tanınmaktadır. Bu durum, gelecekte daha yenilikçi ve doğa dostu polimerik ürünlerin tasarlanması açısından önemli bir potansiyel barındırmaktadır (Geyer vd., 2017).

4.2.2. Sentetik Biyobozunur Polimerler

Sentetik biyobozunur polimerler, yapısal ve fonksiyonel özelliklerini belirli sentetik yöntemler aracılığıyla kazanarak çevreye zarar vermeyen, biyolojik ortamlarda parçalanabilen malzemelerdir (Niaounakis, 2015; Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Bu polimerler, kontrollü üretim yöntemleri sayesinde, biyolojik bozunma sürecini hızlandırabilen ve belirli özelliklere sahip olabilen malzemeler olarak geniş bir uygulama alanına sahiptir. Sentetik biyobozunur polimerler, genellikle tereftalik asit, laktik asit veya glikolik asit gibi monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilir. Bu tür polimerler, mekanik dayanım, biyoyumluluk ve biyolojik bozunma hızlarını optimize etmek için kimyasal modifikasyonlara tabi tutulabilir (Geyer vd., 2017). Öne çıkan sentetik biyobozunur polimerlerden biri polilaktik asit (PLA) olup, yüksek biyolojik uyumluluğa sahip, biyolojik olarak çözünür bir polimerdir (Niaounakis, 2015). PLA, tıbbi uygulamalarda, doku mühendisliği ve ilaç salınımı sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polikaprolakton (PCL), hidrojen bağları ve biyoyumlu yapısal özelliklerinden ötürü dikkat çeken bir diğer sentetik polimerdir. Bu polimer, uzun süreli biyolojik bozunma süreci sağlayarak tıbbi bağlama ve iyileşme uygulamalarında fayda sağlamaktadır. Sentetik biyobozunur polimerler, endüstriyel ve biyomedikal alanlarda, çevre dostu ve ekonomik avantajlarıyla alternatif malzemelere olan talebi giderek artırmaktadır. Ayrıca, bu polimerlerin modifikasyonlarıyla hızla çözünebilen veya özellikleri istenilen şekilde değiştirilebilen malzemeler üretilebilmektedir (Geyer vd., 2017).

Sentetik biyobozunur polimerler, kontrollü koşullar altında gerçekleştirilen polimerizasyon veya kopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda elde edilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Niaounakis, 2015). Bu polimerlerin kimyasal yapısı, bozunma hızları ve mekanik özellikleri, başlangıç monomerlerinin seçimi ve üretim parametrelerinin düzenlenmesiyle şekillendirilmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Üretim sürecinde, belirli fonksiyonel gruplar veya zincir uzatma modülleri eklenerek, istenen bozulma mekanizmasına ve biyolojik uyumluluğa uygun

yapıların oluşturulması amaçlanmaktadır. Termal ve kimyasal dayanımın yanı sıra biyobozunma davranışı da ürün tasarımında önemli bir kriter olarak değerlendirilmektedir (Geyer vd., 2017).

Polilaktik asit (PLA), poli(laktik-ko-glikolik asit) (PLGA), polikaprolakton (PCL) ve polihidroksialkanoatlar (PHA) gibi örnekler, sentetik biyobozunur polimer grubuna dâhil edilmektedir. Özellikle medikal uygulamalarda, doku mühendisliği ve ilaç salınım sistemleri için bu polimerlerin kullanıldığı bildirilmektedir (Niaounakis, 2015). Bozulma esnasında açığa çıkan monomerlerin veya ara ürünlerin toksik olmaması, bu uygulamaların güvenilirliği bakımından avantaj sağlamaktadır (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Üretimde kullanılan monomerlerin biyoyumlu olmasına ve polimerizasyon yöntemlerinin kontrol edilebilirliğine özen gösterilmektedir. Gelişmiş malzeme özelliklerine sahip kopolimerlerin tasarlanmasıyla, hem biyolojik hem de mekanik açıdan üstün performans sergileyen ürünler elde edilmektedir (Geyer vd., 2017).

Endüstriyel ölçekte üretim yapılabilmesi, sentetik biyobozunur polimerlerin yaygınlaşmasına önemli katkı sunmaktadır (Niaounakis, 2015). Malzeme mühendisliği alanındaki gelişmeler, optimizasyon çalışmalarını desteklemekte ve farklı uygulamalara yönelik özel niteliklerin kazanılmasını mümkün kılmaktadır. Ambalaj endüstrisinden kişisel bakım ürünlerine kadar uzanan çeşitlilik içinde, çevre dostu ve biyobozunur özellikleri sayesinde bu polimerlerin kullanımı artış göstermektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Bu eğilimin, atık yönetimi sorunlarının çözümüne ve sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesine katkı sağlama potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir (Geyer vd., 2017).

4.3. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN ÜRETİM SÜREÇLERİ

Biyobozunur polimerlerin üretim süreçleri, hammaddenin seçilmesi ve işlenmesiyle başlayan bir dizi aşamayı kapsamaktadır (Karakuş & Ayhan, 2019a). Doğal kaynaklı veya sentetik kökenli monomerlerin temin edilmesinin ardından, uygun polimerizasyon tepkimeleriyle istenen moleküler yapı elde edilmektedir. Uygulanan yöntem, zincir uzunluğuna, zincir yapısına ve polimerin fonksiyonel özelliklerine göre

belirlenmektedir. Sıcaklık, basınç ve katalizör kullanımı gibi faktörler, reaksiyon verimini ve ürün kalitesini etkilemektedir. Üretimin laboratuvarından endüstriyel ölçeğe taşınabilmesi için, reaksiyon mekanizmalarının iyi anlaşılması ve kontrol edilebilirlik düzeyinin yüksek olması gerekmektedir.

Polimerizasyon sonrasında, ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla ek işlemler uygulanabilmektedir (Karakuş vd., 2021). Kompozit veya kopolimer yapılar elde etmek için farklı monomer veya katkı maddeleriyle karışımlar hazırlanmakta, böylece daha dayanıklı ve çok yönlü malzemeler üretilebilmektedir. Katı hâlde presleme, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerle, polimerlerin çeşitli biçimlere dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Yüzey modifikasyonu ve kimyasal çapraz bağlama teknikleri ise malzemenin ıslanabilirlik, bariyer direnci ve bozunma hızına yönelik iyileştirmeler sunmaktadır.

Üretimin her aşamasında, kalite ve sürdürülebilirlik kriterlerinin karşılanması hedeflenmektedir. Hammadde temininde yenilenebilir kaynaklara yönelinmesi, enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik optimizasyon çalışmaları ve atık yönetimi stratejileri üzerinde durulduğu belirtilmektedir. Geliştirilen biyobozunur polimerlerin, son kullanıma uygun özelliklere sahip olması ve belirlenen ortamlarda güvenle bozunması beklenmektedir. Bu süreçlerin başarılı şekilde uygulanması, çevre dostu malzemelere artan gereksinimi karşılamaya ve endüstriyel kullanım alanlarını genişletmeye imkân tanımaktadır (Erkul & Uçaroğlu, 2023).

4.4. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Biyobozunur polimerlerin çevresel etkileri, geri dönüştürülebilir doğası ve sürdürülebilir atık yönetimi süreçlerine katkıları bağlamında değerlendirilmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Geleneksel petrol bazlı plastiklere kıyasla daha hızlı parçalanma özellikleri sergilediği, bu nedenle doğada daha kısa sürede yok olduğu belirtilmektedir (Erkul & Uçaroğlu, 2023; Karakuş & Ayhan, 2019b). Bu malzemelerin bozunması sırasında su, karbondioksit ve biyokütle benzeri bileşenlerin ortaya çıktığı ve ekosisteme dâhil olabildiği ifade edilmektedir. Çöp sahalarında veya kompostlama tesislerinde biyobozunur polimerlerin ayrışma sürecinin, metan gazı

salınımını azaltabildiği ve toprağın organik madde içeriğini zenginleştirebildiği ileri sürülmektedir (Erkul & Uçaroğlu, 2023).

Kullanım sonrası bertaraf edilen plastikler, çevre ve halk sağlığı açısından uzun vadeli sorunlar doğurabilmektedir. Biyobozunur polimerlerin kullanımının yaygınlaşması, mikroplastik kirliliğinin önlenmesine yönelik önemli bir adım olarak görülmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017). Ürünlerin deniz ortamına karışması hâlinde, balık ve diğer deniz canlıları üzerindeki olumsuz etkilerin daha düşük düzeyde kalabileceği düşünülmektedir. Ek olarak, hammaddenin tarımsal kaynaklardan elde edilmesi hâlinde, yenilenebilirlik ilkesi doğrultusunda üretim döngüsünün daha az karbon ayak izine sahip olacağı tahmin edilmektedir (Karakuş & Ayhan, 2019a). Farklı üretim koşullarında ortaya çıkan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları, materyalin genel çevresel performansını etkilemekte ve araştırma-geliştirme çalışmalarına yön vermektedir.

Malzemenin bozunma süresi, sıcaklık, nem ve mikroorganizma çeşitliliği gibi faktörlere bağlı olduğundan, gerçek ortamda performans değerlendirmesi için kapsamlı test yöntemlerine gereksinim duyulduğu ifade edilmektedir (Erkul & Uçaroğlu, 2023). Bazı biyobozunur polimerlerin belirli ortamlarda daha yavaş parçalandığı ve dolayısıyla atık yönetiminde beklenenden uzun süre kalabildiği rapor edilmektedir. Standartların ve sertifikasyon süreçlerinin geliştirilmesiyle, kullanım alanlarına göre en uygun materyallerin seçilmesine ve çevresel etkilerin en aza indirilmesine yönelik çalışmaların devam edeceği öngörülmektedir (Rujnić-Sokele & Pilipović, 2017).

4.5. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN AVANTAJLARI VE SINIRLAMALARI

Biyobozunur polimerlerin avantajları arasında, çevre dostu ve yenilenebilir kaynaklardan üretilme potansiyeli öne çıkmaktadır (Kılınç vd., 2017; Çelebi & Karagöz, 2019). Doğada bozunabilir nitelik taşımaları, atık yönetimi ve ekosistem korunması açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Parçalanma esnasında çevreye zararlı maddelerin salınımını minimal düzeyde tutma becerisi, sürdürülebilirlik ve halk

sağlığı perspektifinden değerlendirilmekte ve olumlu geri dönüşler alınmaktadır (Söbeli vd., 2019). Hammadde tedarik sürecinde yenilenebilir kaynaklara yönelinmesi, karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sunmakta ve farklı endüstriyel uygulamalarda kullanım çeşitliliğine imkân tanımaktadır (Kılınç vd., 2017).

Mekanik özelliklerin gelişmiş olması, bazı uygulama alanlarında geleneksel plastiklerin yerine biyobozunur polimerlerin tercih edilmesini desteklemektedir (Çelebi & Karagöz, 2019). Su ve gaz geçirgenliği gibi parametrelerin üretim koşullarıyla ayarlanabilmesi, ambalaj sektöründe yararlı uygulamalara zemin hazırlamaktadır. Tıbbi alanda, vücut içi veya dışında kullanılabilen biyomalzemeler tasarlanması amacıyla bu malzemelerden faydalandığı belirtilmektedir. Bozunma sürelerinin öngörülebilir aralıklarda tutulabilmesi, kontrollü salınım veya doku mühendisliği gibi alanlarda avantaj sağladığı yönünde yorumlanmaktadır (Kılınç vd., 2017).

Bazı sınırlamalar ise üretim ve işlenme süreçlerinde ortaya çıkmaktadır. Üretim maliyetlerinin yüksek olması, geniş ölçekli ticari uygulamalarda rekabet gücünü düşürebilmektedir (Çelebi & Karagöz, 2019). Mekanik dayanım ve ısı direnci bakımından, her sektörde arzu edilen performansa erişilemeyebilmektedir. Çevresel koşullara göre bozunma sürelerinin değişkenlik göstermesi, endüstriyel tasarımlarda homojen kalite sağlamayı zorlaştırmaktadır (Söbeli vd., 2019). Bazı ortamlarda yeterince hızlı parçalanmaması, atık yönetimi açısından beklentilerin altında kalan durumlar yaratabilmektedir (Kılınç vd., 2017). Standartların ve sertifikasyon süreçlerinin henüz yeterince yaygınlaşmaması, biyobozunur polimerlerin güvenilirlik ve uygunluk analizlerinde ek çalışmalar gerektirmektedir (Çelebi & Karagöz, 2019).

4.6. BİYOBOZUNUR POLİMERLERİN UYGULAMA ALANLARI

Biyobozunur polimerlerin geniş kullanım alanları, çevre dostu özellikleri ve sürdürülebilirlik temelli beklentileri karşılması nedeniyle farklı sektörlerde yoğun ilgi görmektedir (Peelman vd., 2013; Siracusa vd., 2008). Atık yönetimi, ürün performansı ve insan sağlığı konularının her geçen gün daha fazla önem kazandığı iş modellerinde, bu malzemelerin yerini sağlamlaştırdığı belirtilmektedir (Niaounakis, 2019a). Üretim

süreçlerinde yenilenebilir hammaddelere yönelim ve bozunma sonrası oluşan yan ürünlerin doğaya uyumu, biyobozunur polimerlerin popülerlik kazanmasına katkıda bulunmaktadır. Araştırma-geliştirme faaliyetlerinde, maliyet düşürücü ve performans yükseltici metotların uygulanmasıyla birlikte kullanım hacminin genişleyerek büyümesi hedeflenmektedir. Farklı disiplinlerde sürdürülen çalışmalar, bu polimerlerin özelliklerinin iyileştirilmesine ve yeni uygulama alanlarının keşfedilmesine olanak tanımaktadır.

4.6.1. Ambalaj Endüstrisi

Ambalaj endüstrisi, biyobozunur polimerlerin en yaygın uygulama alanlarından biri olarak gösterilmektedir (Siracusa vd., 2008). Tek kullanımlık paketlenme materyallerinin doğada uzun süre kalması ve mikroplastik kirliliğine yol açması, biyobozunur seçeneklere talebi artırmaktadır. Geleneksel petrol bazlı plastiklerin aksine, biyobozunur malzemeler ortam koşullarına bağlı olarak daha kısa sürede parçalanabilmekte ve çevreye çok daha az kalıcı zarar vermektedir (Peelman vd., 2013). Bu doğrultuda, nişasta ve selüloz türevleri veya polilaktik asit (PLA) gibi sentetik biyobozunur polimer türleri, ambalaj sektöründe tercih edilmektedir. Koruyucu özelliklerin yüksek olması, gıda maddelerinin raf ömrünü desteklemesi ve malzemenin baskı kabiliyeti gibi faktörler, ürün tasarımında dikkate alınmaktadır.

Üretim süreçlerinde, ekstrüzyon ve enjeksiyon gibi termoplastik yöntemler kullanılmaktadır (Niaounakis, 2019a). Bazı biyobozunur polimer türlerinin, ısıya ve neme olan hassasiyeti nedeniyle işlem parametrelerinin hassas şekilde ayarlanması gerekmektedir. Yüksek nem içeriği, polimer zincirinin parçalanmasına ve ürün formunun istenmeyen bir şekilde bozulmasına neden olabilmektedir. Bu durum, üretim hattında kurutma, katkı ekleme ve özel koruyucu ambalajlama gibi önlemlerle kontrol altına alınmaktadır (Peelman vd., 2013). Katkı malzemeleri arasında plastikleştiriciler, antioksidanlar ve dolgu maddeleri yer almakta, bu sayede mekanik dayanım ve esneklik özellikleri uyarlanabilmektedir.

Ambalaj teknolojilerinin sürekli gelişmesi, bariyer özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalarla desteklenmektedir (Siracusa vd., 2008). Oksijen ve su buharı

geçirgenliğinin kontrol altına alınması, gıdaların bozulma süreçlerini geciktirmekte ve ürün kalitesini korumaktadır. Çok katmanlı filmlerin tasarlanmasıyla, hem biyobozunur hem de koruyucu özellikler dengelenmektedir. Tasarlanan ürünlerin endüstriyel kompostlama veya ev tipi kompostlama koşullarında ayrışması hedeflenmekte, ilgili standart ve sertifikasyon süreçleri kapsamında performans değerleri ölçülmektedir (Niaounakis, 2019a). Ambalaj atıklarının geri dönüşüm veya kompostlama aşamalarına dâhil edilmesi, atık miktarını ve karbon ayak izini azaltarak sürdürülebilir bir yaklaşıma katkı sağlamaktadır.

4.6.2. Tıbbi ve Eczacılık Uygulamaları

Tıbbi ve eczacılık uygulamalarında, biyobozunur polimerler büyük oranda biyoyoum ve kontrollü bozunma davranışları nedeniyle değerlendirilmektedir (Nair & Laurencin, 2007). Dikiş iplikleri, ortopedik implant kaplamaları, yara örtüleri ve doku mühendisliği iskeleleri en sık rastlanan örnekler arasında sıralanmaktadır (Middleton & Tipton, 2000). Bozunma sırasında ortaya çıkan yan ürünlerin toksik olmaması ve vücut dokularının doğal süreçleriyle uyumlu olması, tedavi süreçlerinin verimliliğini artırmaktadır. Vücut içerisinde giderek parçalanan bir dikiş ipliğinin, ek bir cerrahi müdahaleye gerek kalmadan işlevini tamamlaması hasta konforu bakımından önemli bir gelişme olarak görülmektedir.

İlaç salınım sistemlerinde de biyobozunur polimerlerin rolü vurgulanmaktadır (Armentano vd., 2013; Nair & Laurencin, 2007). Aktif maddelerin polimer matrise yüklenmesi ve önceden belirlenen bir salınım profili doğrultusunda serbest bırakılması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, uzun vadeli ve istikrarlı ilaç tedavisi sağlayarak, hasta uyumunu kolaylaştırmakta ve yan etki profilini düşürmektedir. Farklı monomerlerin kopolimerizasyonu, salınım hızını ve bozunma süresini kontrol eden zincir yapılarının tasarlanmasını mümkün kılmaktadır. Mikrokapsül veya mikropartikül formlarındaki taşıyıcı sistemler, enjeksiyon yoluyla uygulanabilmekte ve doku içi yayılımı düzenlenebilmektedir.

Doku mühendisliği alanında, biyobozunur polimer esaslı iskelelerin hücre proliferasyonu ve farklılaşması üzerinde olumlu etkileri olduğu rapor edilmektedir

(Armentano vd., 2013). Üç boyutlu poroz yapılar, hücrelere doğal dokuya benzer bir ortam sunmakta ve damarlaşma süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Polilaktik-ko-glikolik asit (PLGA) veya polikaprolakton (PCL) gibi polimerlerin kullanılmasının yaygın olduğu, bu polimerlerin mekanik dayanımla biyobozunur özellikleri dengelediği bildirilmektedir (Middleton & Tipton, 2000). İlerleyen dönemde, akıllı polimerlerin biyomimetik tasarımlar ve büyüme faktörleriyle birleştirilerek rejeneratif tıp alanında daha sofistike çözümler sunacağı öngörülmektedir.

Eczacılık sektöründe ambalajlama ve dozaj formlarına yönelik çalışmalar da göze çarpmaktadır (Armentano vd., 2013). İlaç etken maddelerinin dış etkenlerden korunması ve raf ömrünün uzatılması için, biyobozunur ambalaj malzemeleri tercih edilmektedir. İnce filmler, kapsüller ve blister paketler, kolay geri dönüştürülebilir olmaları ve düşük çevresel etki yaratmaları sebebiyle değer kazanmaktadır. Yasal düzenlemeler ve kalite standartlarının artan gereksinimleri, bu malzemelerin üretim ve sertifikasyon süreçlerinin titizlikle yürütülmesini gerektirmektedir (Nair & Laurencin, 2007).

4.6.3. Tarım Sektöründe Kullanımı

Tarım sektöründe de biyobozunur polimerlerin kullanımına dair çeşitli örnekler bulunmaktadır (Akçalı & Bulut, 2020). Gübre kapsülleri, bitki büyüme düzenleyicileri ve tarım ilaçlarının kontrollü salınımı gibi uygulamalarda, ürünlerin toprağa kademeli olarak karışması sağlanmakta ve bitki köklerinin besin maddelerine sürekli erişimi hedeflenmektedir. Geleneksel plastik ve kağıt bazlı ürünlerin kullanımında görülen atık oluşumu ve toprak kirliliği, biyobozunur seçeneklerle azaltılabilmektedir. Ambalaj veya uygulama malzemelerinin tarla şartlarında kendiliğinden ayrışması, toprağı zenginleştirerek ekolojik döngüye katkı vermektedir (Yoruç & Uğraşkan, 2017).

Seralarda veya açık arazi koşullarında kullanılan malç filmleri, bu malzemelerin bir başka ilgi çeken uygulaması olarak sunulmaktadır (Karakuş & Ayhan, 2019b). Bitki etrafında oluşturulan yüzey kaplaması, yabancı otların büyümesini engellemekte ve toprağın nemini korumaktadır. Geleneksel plastik malçların sökümü ve bertaraf

edilmesi ek bir iş gücü ve maliyet gerektirdiği için, tarım arazilerinde biyobozunur filmlerin tercih edildiği aktarılmaktadır. Toprakta kontrollü biçimde bozunması, mevsim sonunda ilave işlem yapılmadan toprağın yeniden işlenmesini mümkün kılmaktadır (Akçalı & Bulut, 2020).

Tarım ilaçlarının uygulanmasında, mikroenkapsülasyon tekniklerinin kullanımıyla pestisitlerin veya fungusitlerin dozajı ve salınım süresi ayarlanabilmektedir (Yoruç & Uğraşkan, 2017).Yüksek dozda kimyasal kullanımından kaçınılması ve hedef organizmalara seçici etki gösterilmesi, çevre koruma ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Yavaş salınım özelliği sayesinde kimyasal maddelerin toprak ve su kaynaklarına karışması asgari düzeye inmekte, böylece çevresel etki sınırlandırılmaktadır (Karakuş & Ayhan, 2019b).

4.6.4. Diğer Uygulama Alanları

Biyobozunur polimerlerin farklı sektörlerdeki uygulamaları, ulaşım, inşaat, tekstil, elektronik ve savunma gibi geniş bir yelpazeye yayılmaktadır (Niaounakis, 2019b). Araç parçalarında hafiflik ve dayanım elde etmek amacıyla kompozit yapılar üzerinde çalışmalar yürütüldüğü, bu yaklaşımın yakıt tüketimini azaltarak karbon salınımını düşürme potansiyeline sahip olduğu dile getirilmektedir (Gunawan vd., 2020). Uçak ve otomobil iç parçalarının biyobozunur takviyelerle üretilmesi, geri dönüşüm ve bertaraf aşamalarında avantaj sağlayabilmektedir. Yüksek ısıya ve mekanik yüke maruz kalabilecek bölgelerde, sentetik biyobozunur polimerlerin kimyasal modifikasyonlara tabi tutulmasıyla performansın yükseltilebileceği belirtilmektedir.

İnşaat sektöründe, beton katkısı veya yalıtım malzemesi olarak kullanılan polimer türlerinin, çevresel standartları karşılaması talep edilmektedir (Niaounakis, 2019b). Biyobozunur polimerlerin bu alandaki kullanımı henüz sınırlı olmakla birlikte, geri dönüştürülebilirlik ve düşük karbon ayak izi avantajı nedeniyle ilgi çektiği ifade edilmektedir. Mantolama ve yalıtım amacıyla geliştirilen köpük ve levha materyalleri, proje bazında test edilmekte ve uzun vadeli dayanıklılık analizlerine tabi tutulmaktadır. Yapı malzemelerinde atık yönetimi zorunlulukları arttıkça,

biyobozunur içeriklerin kullanımının önemli ölçüde yükselebileceğine işaret edilmektedir.

Tekstil sektöründe, elyaf üretimi ve kaplama işlemlerinde biyobozunur polimerlerden yararlanıldığı rapor edilmektedir (Ahmed & Ikram, 2016)) Pamuk veya yün gibi doğal liflerle harmanlanarak kumaşlara işlenmesi, su itici veya antibakteriyel yüzey kaplamalarının uygulanması, ürünlerin kullanım konforu ve hijyen seviyesini olumlu etkilemektedir. Spor kıyafetlerden koruyucu giysilere kadar çeşitli segmentlerde, biyobozunur kumaşların popülaritesi artış göstermektedir. Geri dönüştürülebilir veya kompostlanabilir tekstil atıkları, moda endüstrisinin çevreye verdiği zararı azaltma çabalarına katkı sunmaktadır.

Elektronik ve savunma alanlarındaki kullanımlar, genellikle yüksek fonksiyonel özellikler isteyen projelerle bağlantılıdır (Gunawan vd., 2020).. Yüksek dielektrik özellikler, esneklik ve hafiflik arayışı, bu malzemelerin nano ve mikro ölçekte tasarlanmasını gerektirmektedir. Baskılı devre kartları, sensör bileşenleri ve geçici elektronik cihazlar üzerinde prototip çalışmaları yürütüldüğü bildirilmektedir. Biyobozunur devre malzemeleri, kullanım ömrünün sonunda kontrollü biçimde çözünerek elektronik atık miktarının azalmasına katkı sağlayabilmektedir. Savunma sektöründe ise, top mermisi kovanları veya tek kullanımlık askeri malzemelerin doğa dostu seçeneklerle ikame edilmesi, uzun vadeli stratejik planlamalar arasında yer almaktadır (Niaounakis, 2019b).

Sürekli gelişen biyobozunur polimer teknolojisi, çok disiplinli bir yaklaşımın benimsenmesini gerektirmektedir. Üretim zincirinin her aşamasında, malzeme bilimi, kimya, biyoloji ve mühendislik alanlarının iş birliğiyle ortaya çıkan yenilikçi çözümler, ürünlerin performansını ve çevre dostu özelliklerini artırmaktadır. Malzeme seçimi ve tasarımı, uygulama gereksinimlerine göre şekillendirildiğinde, farklı sektörlerde rekabetçi ürünlerin geliştirildiği gözlemlenmektedir. Ar-Ge yatırımlarının artırılması ve standartların yaygınlaştırılması, biyobozunur malzemelerin piyasadaki payının büyümesine katkı vermekte ve yeni nesil üretim süreçlerinin temelini oluşturmaktadır.

Ulaşım, inşaat, tekstil, elektronik ve savunma gibi pek çok sektörde benimsenen bu malzemelerin gerçek potansiyeli, maliyet etkinliği ve ürün çeşitliliğinin artırılmasıyla daha net biçimde ortaya çıkacaktır (Ahmed & Ikram, 2016). İş gücü eğitimi ve altyapı geliştirmeleriyle desteklenen bu dönüşüm, sanayi ve çevre arasındaki dengeyi sağlamayı amaçlayan politikaların da temelini teşkil etmektedir. Biyobozunur polimerlerin üretim ve kullanımının küresel ölçekli büyüme ivmesi, atık yönetimi ve ekolojik dengeye ilişkin çabaları güçlendirmekte, geleceğin malzeme teknolojilerinin yapı taşlarını oluşturmaktadır (Niaounakis, 2019b).

4.7. PVA (POLİVİNİL ALKOL)

Polivinil alkol (PVA), biyomedikal uygulamalardaki olumlu özellikleriyle tanınan çok yönlü bir polimer olarak öne çıkmaktadır. Yüksek suda çözünürlüğü, biyoyumluluğu, çözünürlüğü, toksik olmaması ve etkileyici mekanik özellikleriyle tanınan PVA, araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Suda çözünebilen sentetik bir polimer olan PVA, 200 ila 3000 arasında değişen yüksek polimerizasyon derecesi, esneklik, önemli şişme kapasitesi ve kimyasal stabilite gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Bu özellikler PVA'yı yara pansumanı, kemik kırığı rejenerasyonu, diş hekimliği ve cilt dokusu onarımı gibi çeşitli tıbbi kullanımlar için ideal bir aday haline getirir ve yapışkan filmlerde, tekstillerde ve kaplamalarda etkili bir bileşen olarak hizmet ederek uygulamada kolaylık ve çok yönlülük sunar (Gökmeşe vd., 2013). Özellikle, PVA bazlı yara örtüleri nemli bir yara ortamı sağlar ve eksüdaları etkili bir şekilde emerek iyileşme sürecini kolaylaştırır. Sınırlı biyolojik aktiviteleri ve mekanik zayıflıkları gibi dezavantajlarına rağmen, PVA yara örtüsü uygulamaları için umut verici bir seçenek olmaya devam etmektedir. Sentezi, poli(vinil asetat)'ın hidrolizini içerir ve hidroliz derecesi ve moleküler ağırlık gibi faktörlere bağlı olarak çeşitli özelliklere sahip bir polimer verir. PVA hidrojelleri, doku ve organ rejenerasyonu için iskeleler olarak hizmet vererek doku mühendisliği çabalarında ilgi görmüştür. Doğası gereği biyolojik olarak parçalanamayan PVA, hidroksil grubu varlığı ve hidroliz derecesi gibi faktörlerden etkilenen belirli çevresel koşullar altında biyolojik olarak parçalanabilirlik gösterir. Ek olarak, PVA çözünürlük, mekanik mukavemet ve termal davranış gibi özellikleri etkileyen uygun su afinitesi ve kristallik sergiler. Çok yönlülüğü, kolay hazırlanması, mükemmel film oluşturma kapasitesi, yapıştırıcı ve

emülsifiye edici özellikleri ve kimyasallara ve kokulara karşı direncine kadar uzanır (Teodorescu vd., 2019).

PVA nanolifleri çeşitli alanlarda farklı uygulamalara sahiptir. Endüstriyel filtrasyonda, hava ve su filtrasyon sistemlerini destekleyerek verimliliği ve membran kalınlığını artırır. COVID-19 salgınının ortasında, PVA nanolifleri antibakteriyel ve antiviral özellikleriyle üstün koruma sağlayarak gelişmiş kişisel koruyucu ekipmanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Algılama teknolojilerinde, gelişmiş gaz ve biyosensör yetenekleri sağlayarak hızlı ve hassas algılama sağlarlar. Kanseri tedavisinde, PVA nanolifleri hedefe yönelik ilaç dağıtımını kolaylaştırarak tümör büyümesini engeller ve tedavi etkinliğini artırır (Türkoğlu vd., 2024).

BÖLÜM 5

MALZEMELER VE YÖNTEMLER

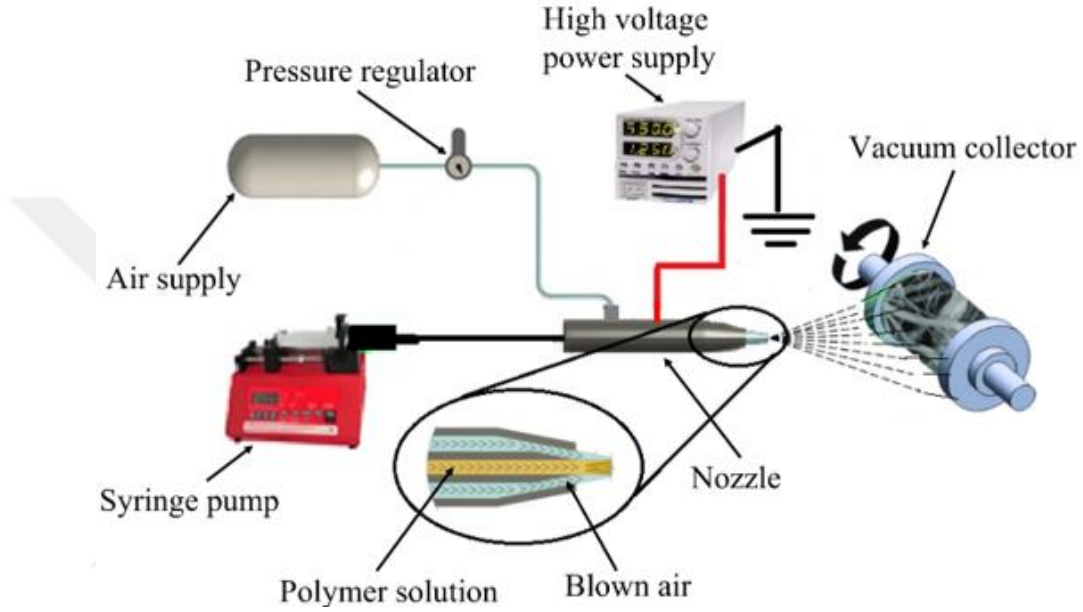
5.1. MALZEMELER

Polivinil alkol (PVA) (%87.8 saflık, 20°C'de 0.4-0.6 g/cm³ yoğunluk ve 160–240 °C erime noktası), ZAG Kimya (Türkiye) şirketinden temin edilmiştir. Karboksimetil selüloz (CMC) (Walocel CRT 30 PA), Dow Wolff Cellulosics GmbH (ABD) şirketinden alınmıştır. %99.8 saflıkta etanol, Sigma Aldrich'tan satın alınmıştır. Ambalaj uygulamaları için kullanılan ceviz yağı (Çotanak, Türkiye), Türkiye'deki yerel bir marketten temin edilmiştir. Patojenik bakteriler, Escherichia coli (E. coli) ATCC 35218 ve Staphylococcus aureus (S. aureus) ATCC 29213, Türkiye'deki Yozgat Bozok Üniversitesi Boğazlıyan Meslek Yüksekokulu'ndaki kültür koleksiyonundan temin edilmiştir. Ultra saf distile su kullanılmıştır. Polimerler, herhangi bir ek fiziksel ve/veya kimyasal modifikasyona tabi tutulmadan kullanılmıştır.

5.2. CD'LERİN SENTEZİ

Buzda bekletilmiş atılmış kabak atıkları, gece boyunca +4 °C'de soğutulmuş çözünme işlemi geçirdi. Ardından, atık kabak atıklarından türetilen karbon noktaları (SPCD'ler), tek adımlı hidrotermal teknik kullanılarak üretildi. İlk olarak, 10 g atılmış kabak, 90 mL saf su ile karıştırılarak homojen bir karışım elde edildi. Bu homojenleştirilmiş karışım, 250 mL'lik Teflon kaplamalı bir hidrotermal reaktöre yerleştirildi ve 6 saat boyunca 200 °C'de ısıtıldı, reaktör, basınca dayanıklı paslanmaz çelik dış kaplama ile korundu. Reaktör soğutulduktan sonra, elde edilen siyah sıvı, reaksiyona girmemiş bileşenlerin ve kirleticilerin uzaklaştırılması için kaba filtre kağıdıyla süzüldü. Filtrasyonun ardından, çözeltinin santrifüjlenmesi 1664 g'da 30 dakika süreyle gerçekleştirildi ve elde edilen süpernatant, 0.22 µm gözenek çapına

sahip bir PTFE filtresi ile daha fazla işleme tabi tutuldu. Elde edilen sarımsı çözeltinin, gelecek karakterizasyon analizleri ve nanolif üretimi için gerekli olduğunda kullanılmak üzere +4 °C’de amber renkli şişelerde saklanması sağlandı. Karbon noktalarının iletim elektron mikroskobu (TEM), emilim spektrumu analizi ve hücre canlılık testi (MTT) için ayrıntılı metodolojiler sunulmuştur.



Şekil 5.1. Elektro-üfleme yöntemi şematik çizimi

5.3. KARBON NOKTALARIN KARAKTERİZASYONU

5.3.1. TEM Analizi

Karbon noktalar, 100 kV hızlanma geriliminde çalışan bir Hitachi TEM HT 7800 kullanılarak görüntülenmiştir. Örnekler karbon ile kaplanmış bakır bir ızgara üzerine yerleştirilmiş ve ardından havada kurutulmuştur. Hazırlanan numuneler TEM kullanılarak inceleme ve değerlendirmeye tabi tutulmuştur (Yılmaz Öztürk vd., 2020).

5.3.2. Absorpsiyon Spektrum Analizi

Karbon noktalarının 200-500 nm dalga boyu aralığındaki absorpsiyon spektrumları Shimadzu UV 1800 (Kyoto, Japonya) kullanılarak belirlenmiştir.

5.3.3. Hücre Canlılığı Deneyi (MTT)

MTT deneyi için Beas2B (RRID, CVCL-0168) normal akciğer hücre hattı ve HC (Sigma Aldrich, 402-05A) normal kondrosit hücre hattı kullanılmıştır. Tüm hücre hazırlama prosedürleri steril bir ortamda laminar kabin içinde gerçekleştirilmiştir. Hücre hatları 37°C, %5 CO₂ koşullarında %10 FBS ve %2 PenStrep solüsyonu içeren takviyeli DMEM ortamında konfluent olduktan sonra kullanılmıştır. Ölçüm plakaları kuyu başına 10.000 hücre ile tohumlanmıştır. Yaklaşık 16 saatlik ön inkübasyonun ardından test molekülleri eklenmiş ve ölçümler 24 saatlik inkübasyonun ardından gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen test bileşiklerinin hücre proliferasyonu ve NCI-60 sağkalım parametre değerleri üzerindeki etkilerini ölçmek için MTT testi kullanılmıştır. Bu test protokolü, test maddeleri ve hücre hatlarının 24 saat inkübasyonundan sonra uygulanmıştır (Alheety vd., 2023). Sonuçlar % hücre inhibisyonu olarak raporlanmış ve çözücü (DMSO) ile muamele edilen hücrelerin optik yoğunluğu %100 olarak kabul edilmiştir. Test maddelerinin NCI-60 sağkalım parametrelerini belirlemek için her bir test maddesinin artan konsantrasyonlarının (0,1, 0,2, 0,4, 0,8, 1,6 ve 3,2 mg/mL) belirli bir aralıktaki hücreleri üzerinde MTT yöntemi kullanılmıştır (Adan vd., 2016). Test edilecek test maddelerinin hücre sitotoksik veya sitostatik olup olmadığı LDH yöntemi ile belirlenmiştir. Test edilen maddeye bağlı olarak inkübasyon süresi boyunca ölen hücre sayısındaki artış, kültür süpernatantında LDH artışına neden olacaktır. Laktat dehidrojenaz (LDH) çoğu hücrede bulunan ve stabil olan sitoplazmik bir enzimdir. Bu amaçla, LDH hücre sitotoksikite kiti üreticinin prosedürüne göre kullanılmıştır. Kısaca, LDH enzim aktivitesi sonucu oluşan formazan miktarındaki değişim ölçülmüş ve aşağıdaki formüle göre değerlendirilmiştir; % Hücre canlılığı= [(Madde Absorbansı - Düşük Kontrol / Yüksek Kontrol - Düşük Kontrol) x 100]. Hücreler 96 kuyucuklu plakalara kuyu başına 5.000 hücre yoğunluğunda yerleştirilmiş ve 24 saat bekletilmiştir. 24 saat boyunca her 6 saatte bir konsantrasyona bağlı olarak bu bileşikler eklenmiş ve hücrelerin morfoloji

değişiklikleri faz kontrast mikroskobu ile taranmıştır. İşlem sonunda kontrol ve muamele edilmiş hücrelerin görüntüleri ters mikroskoba bağlı bir dijital kamera kullanılarak fotoğraflanmıştır.

5.4. ÇÖZELTİLERİN HAZIRLANMASI

Numuneler şu şekilde kodlanmıştır: saf polivinil alkol (PVA) nanolifli örtüler PVA, polivinil alkol ve karboksimetil selüloz karışımı nanolifli örtüler PVA/CMC, SPCD eklenmiş PVA/CMC nanolifli örtüler PVA/CMC/SPCDs. %12 (a/a) konsantrasyonunda PVA, su ve etanol (3:2) karışımında çözüldü. Aynı çözücü kullanılarak %12 konsantrasyonda PVA/CMC (5:1) çözeltisi hazırlandı. Son olarak, PVA/CMC/SPCDs örneği, PVA/CMC çözeltisinin toplam polimer miktarının %5'i kadar karbon noktası (CDs) eklenerek hazırlandı. Tüm bileşenlerin tam çözünmesini sağlamak için çözeltiler 90°C'de 6 saat süreyle karıştırıldı.

5.5. NANOLİFLİ ÖRTÜLERİN ÜRETİMİ

Nanolifli örtülerin üretimi, elektro-üfleme tekniği kullanılarak gerçekleştirildi. Çözeltiler, bir şırınga pompasına bağlı 20 mL'lik bir şırınga ile bir nozuldan ekstrüze edildi. Güç kaynağı, nozul ve makine çerçevesine bağlandı. EBS sürecinin şematik temsili Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Kesme kuvveti oluşturmak için 1.5 bar sabit hava basıncı, 15 kV uygulanan voltaj ve 15 mL/saat besleme hızı korundu. Elde edilen nanolifler, nozuldan 35 cm uzaklıkta dönen bir toplama cihazına bırakıldı. Toplanmanın ardından, nanolifli örtüler 140 °C'de 2 saat süreyle kurutma işlemine tabi tutuldu.

5.6. NANOFİBRÖZ MATLARIN KARAKTERİZASYONU

5.6.1. SEM Analizi

Lifli matların yapılarını analiz etmek için bir Carl Zeiss Ultra Plus Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) kullanılmıştır. Nanofiber çaplarının değerlendirilmesi, matın homojenliğini değerlendirmek için kritik bir ölçüt olarak

hizmet etmektedir. PVA, PVA/CMC ve SPCD yüklü PVA/CMC kompozitinden elde edilen nanoliflerin çapları Image J yazılımı kullanılarak 100 rastgele nanolif okuması yapılarak belirlenmiştir.

5.6.2. FTIR Analizi

Çeşitli bileşenler arasındaki ilişkileri değerlendirmek için bir Bruker Alpha FTIR Spektrometresi kullanılarak lifli matlar için Fourier-transform kızılötesi spektrumları (FTIR) toplanmıştır. Bu işlem 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında 24 taramanın kaydedilmesini içermiştir.

5.6.3. TGA Analizi

Nanofibröz matların termal bozunma modellerini araştırmak üzere termogravimetrik analiz (TGA) yapmak için bir termogravimetrik analiz cihazı (STA 7300, Hitachi, Japonya) kullanılmıştır. Numuneler oda sıcaklığından 550 °C'ye kadar, dakikada 10 °C'lik kademeli bir artış ve 2 mL/dak hızında azot gazı akışı ile ısıtılmıştır.

5.6.4. Su Temas Açısı Ölçümü

Her bir numunenin yüzey hidrofobik özelliklerini değerlendirmek için, temas açıları oda sıcaklığında yaklaşık 0,0085 mL saf su ile sapsız damla tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler video temas açısı ölçümü (Theta Lite) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için numuneler 50 mm × 50 mm boyutlarında hazırlanmıştır.

5.6.5. Suda Çözünürlük Ölçümü

Nanolifler 1,5 cm × 1,5 cm olarak kesilmiş ve tartılmış (W₀), ardından oda sıcaklığında 24 saat boyunca 10 mL damıtılmış suya daldırılmıştır. Çözünmemiş nanolifler sudan çıkarıldıktan sonra, sabit ağırlığa kadar 70 °C'de bir fırında tutuldu. Kurutulan numuneler tekrar tartılmıştır (W_i). Numunelerin suda çözünürlüğü aşağıdaki denkleme göre belirlenmiştir.

$$\text{Suda çözünürlük (\%)} = (W_0 - W_i) / W_0 \times 100$$

5.6.6. Hava Geçirgenliği Testi

Nanofiber matların hava geçirgenliği, 50 mm çapında dairesel bir bölge içinde 25 °C sıcaklıkta Prowhite Air Test II cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Her test sırasında numuneye 100 Pa hava basıncı uygulanmıştır (Doğan, C., Doğan, N., & Akgül, Y. (2022).

5.6.7. Çekme Testi

Çekme mukavemeti ve kopma uzaması gibi mekanik özellikleri ölçmek için 1 KN yükleme kapasitesine sahip Shimadzu üniversal test cihazı kullanılmıştır. Çekme testi 1 mm/dak çaprazkafa hızında gerçekleştirilmiştir.

5.6.8. Biyobozunurluk Testi

Biyobozunurluk testi, Mouzahim ve diğerleri tarafından oluşturulan ve nanolifli numunelerin 4 cm derinlikte 8 cm'lik bir toprak ve su süspansiyonuna 60 gün süreyle daldırılmasını ve periyodik olarak fotoğraflanmasını içeren tekniğe karşılık gelmiştir (El Mouzahim vd., 2023).

5.6.9. İn-vitro Antioksidan Aktivite

Örneklerin in vitro antioksidan aktiviteleri 2,2 difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) ve 2,2'-azino-bis-3etilbenzotiyazolin-6-sülfonik asit (ABTS) süpürme yöntemleri ile Eşitlik (2) kullanılarak belirlenmiştir:

$$\% \text{ Antioxidant activity} = (\text{absorbance of blank} - \text{absorbance of sample}) / (\text{absorbance of blank}) \times 100$$

DPPH testinde, metanol (25 ppm) ile hazırlanan 3,9 mL DPPH çözeltisi ile 0,1 mL numune karıştırılmıştır. Karanlık bir yerde oda koşullarında 30 dakika inkübasyondan

sonra 515 nm'de absorbans ölçülmüştür. ABTS testi için, sulu ABTS (7 mmol/L) ve potasyum persülfat (2,45 mmol/L) çözeltileri karıştırıldı ve oda ortamında karanlık bir yerde inkübe edildi. Karışım daha sonra 734 nm'deki absorbans 0.7 ± 0.02 'ye ulaşana kadar fosfat tampon tuzlu su (pH 7.6) ile seyreltilmiştir. 1950 µL seyreltilmiş çözelti 50 µL numune ile karıştırılmıştır. 6 dakika inkübasyondan sonra absorbans 734 nm'de ölçülmüştür. Hem DPPH hem de ABTS için boşluklar, numune yerine aynı miktarda etanol kullanılarak hazırlanmıştır (Doğan, C., Doğan, N., & Akgül, Y. (2022))

5.6.10. İn-vitro Antimikrobiyal Aktivite

Nanoliflerdeki antimikrobiyal aktivitelerin değerlendirilmesinde agar disk difüzyon yöntemi kullanılmıştır. Bu test, gram-negatif bakteri *E. coli* ve gram-pozitif bakteri *S. aureus* dahil olmak üzere çeşitli mikroorganizmalara karşı gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, her mikroorganizma bir halka kullanılarak Mueller Hinton Broth (MHB) içine aktarılmış ve 35°C'de 18 saat boyunca inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrasında optik yoğunluk (OD600) 108 CFU/mL'ye eşdeğer bir absorbans elde edecek şekilde ayarlanmıştır. Ardından, 100 µL bakteri hücresi süspansiyonu Mueller Hinton Agar üzerine aşılanmış, steril bir çubukla eşit şekilde yayılmış ve 5 dakika boyunca emilmeye bırakılmıştır. Önceden 6 mm çapında diskler halinde kesilmiş olan nanolifler 30 dakika boyunca UV ışığına maruz bırakılmıştır. İşlem görmüş bu diskler daha sonra patojen aşılanmış ortam üzerine yerleştirilmiş ve 35°C'de inkübe edilmiştir. İnkübasyonun ardından, disklerin etrafında oluşan berrak bölgelerin çapları bir kumpas kullanılarak ölçülmüş ve analiz için kaydedilmiştir (Doğan, C., Doğan, N., & Akgül, Y. (2022)).

5.7. GIDA UYGULAMASI VE STABİLİTE TESTLERİ

Nanoliflerin gerçek bir gıda sistemi üzerindeki antioksidan potansiyelini incelemek amacıyla, ticari ceviz yağı 60 °C'de hızlandırılmış bir depolama deneyine tabi tutulmuştur. 14 gram ceviz yağı, 50 mL'lik cam şişelere konulmuştur. 5 cm çapında yuvarlak nanolif parçaları, cam şişenin ağzını kapatmak için bir lastik bant ile yapıştırılmış ve ardından plastik kapaklarla sıkıca kapatılmıştır. Kontrol grubu olarak, başka bir ceviz yağı örneği, nanolif kaplaması olmadan kapakla kapatılmıştır. Ceviz

yağının içindeki baş boşluk, ortam havası ile doludur. Tüm örnekler, 60 °C’de karanlık bir ortamda, orbital bir çalkalayıcı kullanılarak sürekli 150 rpm hızında çalkalanmak suretiyle 3 gün boyunca depolanmıştır. Stabilite testi için, peroksit değeri (POV) ve tiyobarbitürik asit-reaktif maddeler (TBARS) değerlendirmeleri için belirli aralıklarla, 1 ile 3 gün arasında numuneler alınmıştır. Özetle, hem peroksit değeri hem de tiyobarbitürik asit-reaktif maddeler için özet bir analiz prosedürü takip edilmiştir. POV belirlemesi için, 0.1 g yağ örneği, her biri 10 µl olan demir iyonu ve amonyum iyonu ile reaksiyona sokulmuş ve 20 dakika boyunca karanlıkta bekletilmiştir. Ardından, süpernatantın absorpsiyonu 510 nm’de ölçülmüştür. Yağ örneklerinin hesaplanan POV’leri, hidrojen peroksit izopropilbenzen standardı eğrisinden türetilmiş ve sonuçlar mmol/kg yağ cinsinden ifade edilmiştir (Pei vd., 2022). TBARS analizinde ise, örneklerin absorpsiyonu 532 nm’de ölçülmüştür. Elde edilen absorpsiyon değerleri, TBARS değerlerini mg malondialdehit (MDA)/kg yağ olarak hesaplamak için 2.77’lik sabit faktörle çarpılmıştır (John et al., 2005).

5.8. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

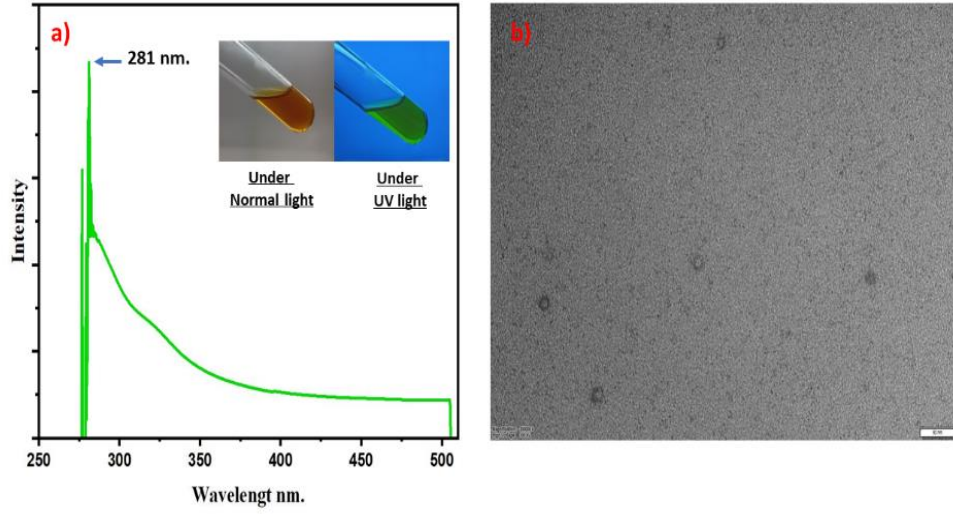
Elde edilen sonuçlar, tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuş ve ortalama $\pm$ standart sapma olarak sunulmuştur. Veriler arasındaki farkların anlamlılığı ($p < 0.05$), IBM-SPSS 22.0 istatistik paket yazılımı (SPSS Inc., Chicago, IL, ABD) kullanılarak belirlenmiştir. Grup ortalamaları, Duncan çoklu karşılaştırma testi ile karşılaştırılmıştır. Tüm analizler, tutarlı deneysel koşullar altında üçlü tekrarlarla gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. SPCD'LERİN KARAKTERİZASYONU

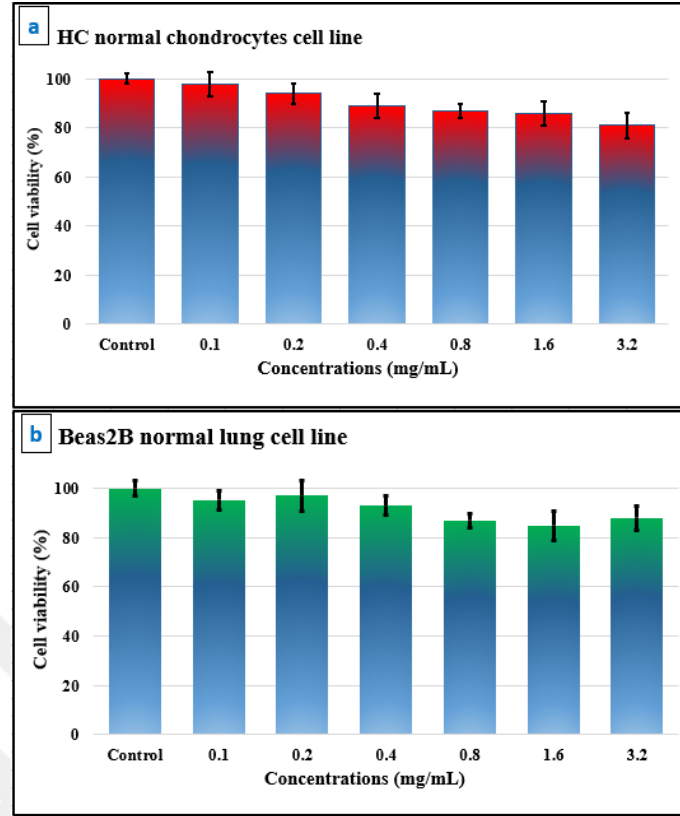
Atık kabaktan türetilen karbon noktaları (SPCD'ler) içeren elde edilen çözeltinin sarımsı-kahverengi bir rengi vardır ve UV ışığına maruz kaldığında derin yeşil bir ton alır (Şekil 6.1). Bu dikkat çekici renk değişimi, karbon noktalarının neden olduğu 6kuantum sınırlama etkisiyle açıklanabilir ve belirli aydınlatma koşullarında benzersiz optik özelliklerini gösterir (Khan vd., 2023; Khoshkalampour vd., 2023). Özellikle, SPCD'lerin yaklaşık 280 nm'de, C=O veya C-OH bağlarının $n-\pi^*$ geçişine karşılık gelen benzersiz bir pike sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.1). Bu güçlü pik, atık kabaktan uygulanan karbürizasyon tekniğiyle karbon noktalarının başarılı bir şekilde sentezlendiğine dair güçlü bir kanıt sunmaktadır. Bu karbon noktalarının optik özellikleri, onları aktif gıda ambalajı uygulamaları için çekici adaylar haline getirmektedir. Absorpsiyon piki, ultraviyole aralığıyla örtüşmektedir, bu da bunların verimli UV emici olarak etkinliklerini göstermektedir. Bu özellik, ambalajlanmış gıda bileşenlerinin fotooksidasyonunu en aza indirmede özellikle önemlidir, çünkü UV ışığına maruz kalmak, besin içeriğinin bozulmasına ve hoş olmayan tat değişikliklerine yol açabilir (Zhao vd., 2023). Ayrıca, TEM araştırması, üretilen SPCD'lerin boyutlarının nanometrik aralıkta olduğunu doğrulamıştır (Şekil 6.1).



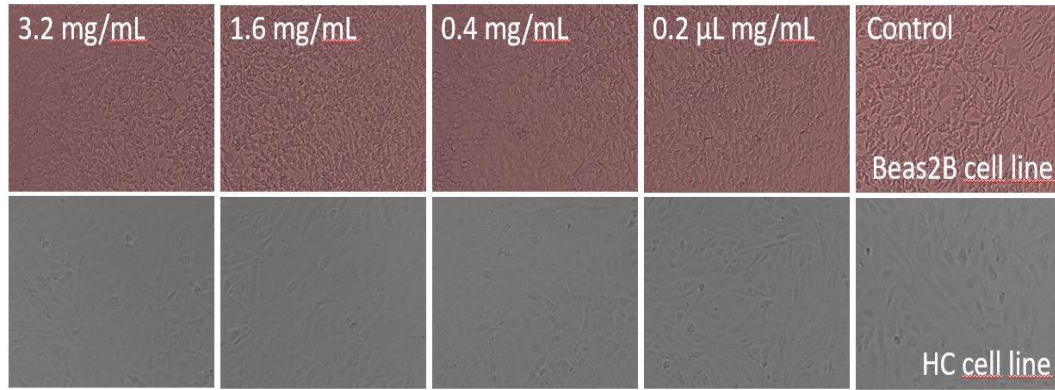
Şekil 6.1. (a) Atık kabak türevi karbon noktalarının UV-vis emilim spektrumları ve (b) İletim elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü

6.2. SPCD'LERİN SİTOTOKSİSİTESİ

Aktif gıda ambalaj sistemlerinde kullanılan bileşenlerin toksisitesi, gıda güvenliği açısından çok önemlidir. Bu çalışmada, GRAS listesinde yer alan PVA ve CMC gibi materyaller polimer olarak kullanılmıştır. Bu nedenle, atık kabak bazlı karbon noktalarının Beas2B normal akciğer hücre hattı ve HC normal kondrosit hattı üzerindeki in vitro sitotoksitesini değerlendirmek için MTT testi yapılmış ve sonuçlar 6.2'de gösterilmiştir. Hücre canlılığı, her iki hücre hattında konsantrasyon bağımlı bir şekilde hafifçe azalmıştır. Ancak, yüksek konsantrasyonlarda bile, hücre canlılığı kondrosit hattında %81'in altına ve akciğer hücre hattında %85'in altına düşmemiştir. Her iki hücre hattında da SPCD konsantrasyonuna bağlı olarak hücre yoğunluğunda önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Tüm bu bulgular göz önünde bulundurulduğunda, sentezlenen SPCD'lerin düşük toksisiteye sahip ve iyi biyoyumluluğa sahip olduğu söylenebilir. SPCD'lerin sitotoksiste sonuçları ve ambalaj uygulamalarındaki kullanımı, SPCD'lerin çok düşük toksisiteye sahip olduğunu doğrulamıştır (Ezati vd., 2022; K. Wang vd., 2013).



Şekil 6.2. SPCD'lerin Beas2B normal akciğer hücre hattı (a) ve HC normal kondrosit hattı (b) üzerindeki sitotoksikite analizi

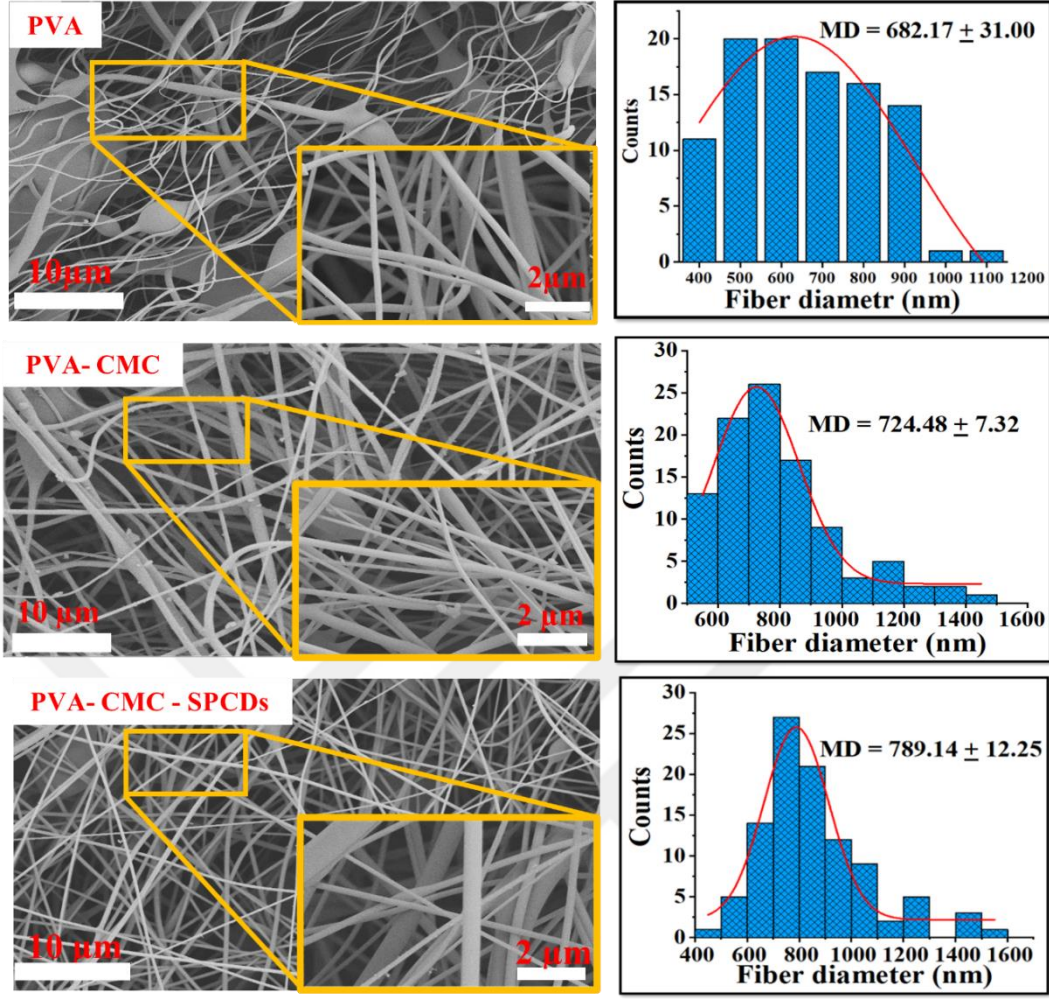


Şekil 6.3. SPCD'lerin Beas2B normal akciğer hücre hattı ve HC normal kondrosit hattı morfolojileri üzerindeki etkisi

6.3. NANOLİFLİ ÖRTÜLERİN KARAKTERİZASYONU

6.3.1. Morfolojik Analiz

Nanoliflerin çaplarını ölçmek, örtülerin uniformitesini değerlendirmek için önemli bir araçtır. Her bir nanolifli örtü için çap dağılımı Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Bu mikrografiklerde, liflerin kesintisiz ve rastgele yönlendirilmiş olduğu gözlemlenmiştir. Liflerin ortalama boyutları, sırasıyla PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs nano-kompozit lifli örtüler için 682.17 ± 31.00 nm, 724.48 ± 73.20 nm ve 784.14 ± 12.25 nm olarak belirlenmiştir. PVA, çapları 400 ile 1200 nm arasında değişen en uniform nanolifi üretme kapasitesine sahiptir. CMC'nin PVA'ya eklenmesi, PVA/CMC liflerinin ortalama çapında hafif bir artışa ve çapların daha çeşitli bir dağılımına yol açmıştır. Bu fenomenin makul bir açıklaması, CMC'nin doğal bir kalınlaştırıcı olmasından dolayı PVA-CMC karışım çözeltisinin viskozitesini artırmış olmasıdır ve bu durum, PVA'daki OH grupları ile CMC'deki karboksimetil grupları arasındaki hidrojen bağlamasından kaynaklanmaktadır (Arefian vd., 2020; BOR\UUVKOVÁ vd., 2012). İlginç bir şekilde, CD'lerin eklenmesinin, PVA/CMC nanoliflerinin çapında hafif bir değişikliğe yol açtığı gözlemlenmiştir; çapları 724.48 ± 7.32 nm'den 789.14 ± 12.25 nm'ye yükselmiştir. Genel olarak, önceki çalışmalar, CD'lerin nanoliflere eklenmesinin genellikle çaplarını azalttığını ve bunun da CD'lerin elektriksel iletkenliğinden kaynaklandığını belirtmiştir (Lee vd., 2016). Ancak, düşük oranlarda CD eklenmesinin nanolif çaplarını artırabileceği de bildirilmiştir (Sattariazar vd., 2023). Sonuç olarak, tüm örneklerin, çok az boncuk oluşumu ile hafifçe uniform nanolifler sergilediği ve çapların tutarlı bir dağılımına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.4. PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs nanolifli örtülerinin SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımı.

6.3.2. FTIR Analizi

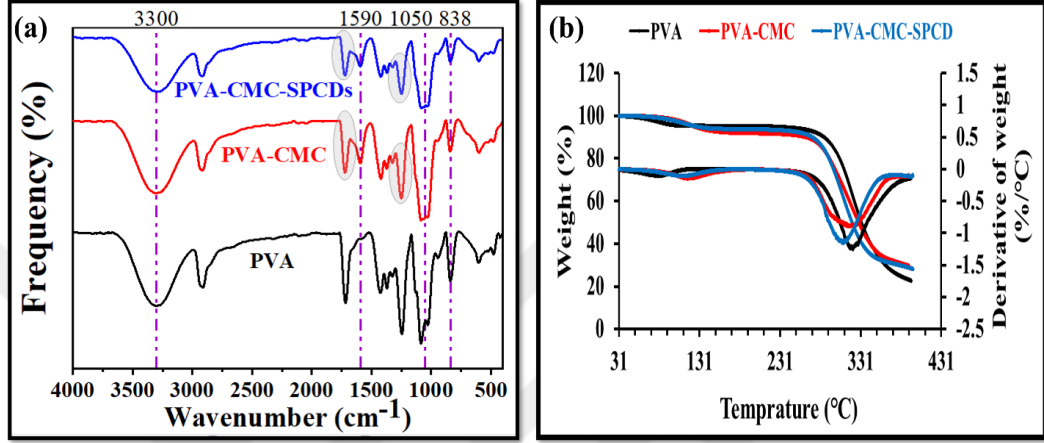
Şekil 6.5 (a), PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs nanolif örtülerinin Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizini göstermektedir. PVA'nın FTIR spektrumunda, 1683, 1596, 1442, 1293 ve 1039 cm^{-1} 'de belirgin pikler gözlemlenmiştir. Bu pikler sırasıyla C = O karbonil grubunun, karboksilat iyonik gruplarının, C - H₂ grubunun ve asetil gruplarındaki C - O'nun gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir (Rezaei vd., 2016). Ayrıca, 3300 cm^{-1} 'de gözlemlenen bant, O - H gruplarının gerilme titreşimine atfedilmektedir, 2931 cm^{-1} ve 2914 cm^{-1} 'deki bantlar ise C-H gerilmesini göstermektedir. C=O grubunun gerilme titreşimi 1732 cm^{-1} 'de yer alırken, 1590 cm^{-1} ve 1373 cm^{-1} 'deki titreşimler, sırasıyla C-H'nin

makaslama ve sallanma hareketleriyle ilişkilidir. O-H grubunun bükülme titreşimi 1324 cm⁻¹'de, CH₂'nin bükülme titreşimi ise 1245 cm⁻¹'de gözlemlenmiştir. Ayrıca, C-O-C grubunun gerilme titreşimleri sırasıyla 1099 cm⁻¹, 1056 cm⁻¹ ve 1021 cm⁻¹'de atfedilmiştir. C-OH grubunun dışa doğru bükülme titreşimi ise 596 cm⁻¹'de belirgindir (Morsi vd., 2019; Pashameah vd., 2022). CMC/PVA nanoliflerinde, sırasıyla C=O ve CO'nun gerilme titreşimlerine karşılık gelen 1670 ve 1081 cm⁻¹'de karakteristik pikler gözlemlenmiştir. Ayrıca, 1428 cm⁻¹'deki pik, CH'nin bükülme titreşimleriyle ilişkilidir (Allafchian vd., 2020). Genel olarak, PVA/CMC/SPCDs örneklerinde, PVA/CMC nanolif örtülerinde gözlemlenenlere benzer pikler gösterilmiştir. Bu durum, nanoliflere hapsolmuş olan CD'lerden kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, CD'lerin eklenmesi, 1723 cm⁻¹ ve 1242 cm⁻¹'deki emilim bantlarının yoğunluğunun azalmasına ve 3300 cm⁻¹'deki emilim bandındaki pikin genişlemesine yol açmıştır. Benzer bulgular, Chohye Lee ve ark. tarafından da gösterilmiştir (Lee vd., 2016).

6.3.3. TGA Analizi

TGA analizi, PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs dahil olmak üzere nanolif örtülerinin termal stabilitesini incelemek için kullanılmıştır. Şekil 6.5(b), araştırmanın sonuçlarını göstermektedir. Numuneler, ortam sıcaklığından 450°C'ye kadar bir sıcaklık aralığında, azot akış gazı ortamında test edilmiştir. Numunelerin bozulma desenini karakterize eden iki belirgin aşama vardır. İlk aşamada, gevşek bağlı suyun salınımı gözlemlenirken, ikinci aşama esas olarak polimer zincirlerinin bozulmasını içerir. Şekil 6.5(b)'de gösterildiği gibi, PVA nanolif örtülerinin TG eğrisinde iki ana ağırlık kaybı aşaması gözlemlenmiştir: İlk ağırlık kaybı (37°C - 112°C) aralığında, (59.85°C - 160.57°C) arasında yaklaşık %4, %8 ve %59.1'lik ağırlık kaybı, adsorbe olmuş su moleküllerinin ve PVA'nın uçucu bileşiklerinin buharlaşmasından kaynaklanmıştır. PVA-CMC nanolif örtüsünün TG eğrisi de iki ana ağırlık kaybı olayını göstermektedir. İlk ağırlık kaybı (49°C ile 172°C arasında) yaklaşık %3.3 olup, adsorbe olmuş su moleküllerinin ve uçucu bileşiklerin buharlaşmasına bağlıdır. En büyük ağırlık kaybı (%61.93) ise 220.42–390°C sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu önemli kayıp, her iki polimerin (PVA ve CMC) yoğun bozulmasına atfedilmektedir ve polimer zinciri etkileşimlerinin, hidrojen bağlarının, CMC sakkarit halkalarının dehidratasyonu ile PVA ve CMC'nin termal bozulması ve de-polimerizasyonu

süreçlerini içerir (Darbasizadeh et al., 2019; Nabat et al., 2021). PVA-CMC/SPCDs nanolif örtüsü için, ağırlık kaybı deseni, PVA-CMC nanolif örtüsünün deseniyle yakın bir benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik, PVA-CMC nanolif örtüsü içinde SPCD moleküllerinin iyi dağılmış bir düzenini, minimal yapısal değişikliklerle birlikte, çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilen bulgularla tutarlıdır (Zare-Akbari vd., 2016).



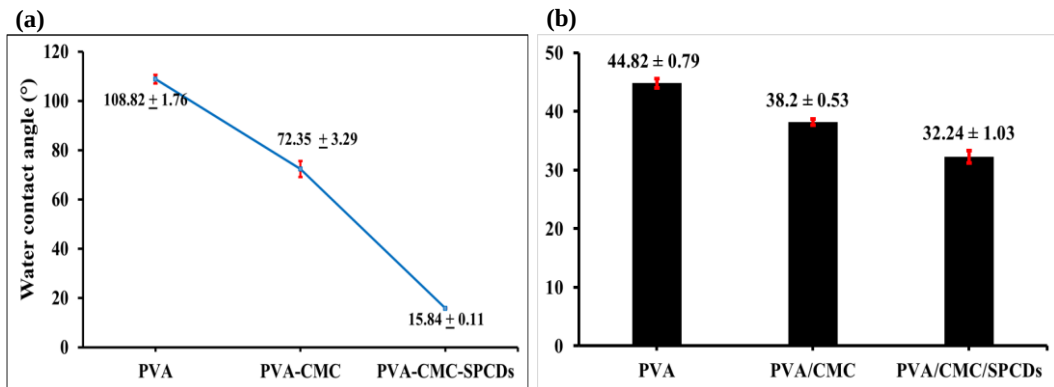
Şekil 6.5. PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs örneklerinin FTIR spektrumu (a), ve TGA ile DTG eğrileri (b).

6.3.4. Su Temas Açısı Ölçümleri

Polimerik nanoliflerin hidrofilik veya hidrofobik özellikleri, belirli uygulamalar için uygunluklarını belirlemede kritik bir rol oynar. Bir maddenin hidrofilikliği, su temas açısının (WCA) ölçülmesiyle değerlendirilebilir. Nanolif örtülerinin hidrofilik/hidrofobik özelliklerini değerlendirmek amacıyla, PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs örneklerinin WCA'ları ölçülmüştür. Şekil 6.6(a) her bir örnek için temas açılarını göstermektedir. Özellikle, PVA için su temas açısı 108.82° olarak ölçülmüş ve PVA/CMC nanolifleri için ($72.35 \pm 3.29^\circ$) küçük bir azalma gözlemlenmiştir. CMC içeriğinin eklenmesi, kompozit nanoliflerin su temas açılarının (WCA) anlamlı derecede düşmesine neden olmuştur. Bu azalma, CMC'nin suya daha yüksek bir afiniteye sahip olduğunu ve bunun muhtemelen ana zincirindeki bol hidroksil gruplarına atfedilebileceğini göstermektedir (Sarkar vd., 2018). PVA/CMC/SPCDs örneklerinde, karbon noktalarının (CD'ler) hidrofilik özelliklerine bağlı olarak temas açısında bir azalma beklenmiştir (Shafiei vd., 2019).

6.3.5. Su Çözünürlük Sonuçları

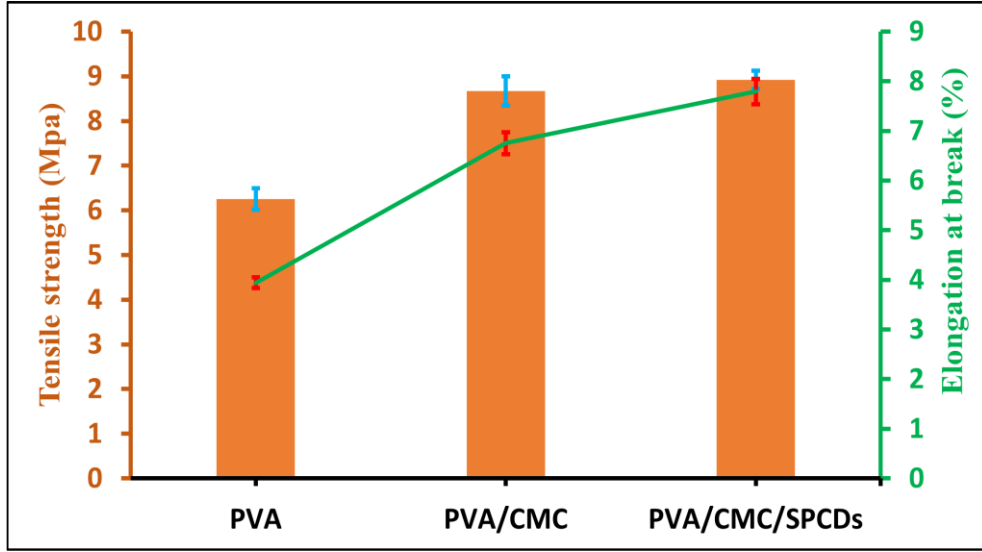
Nanolif örtülerinin su çözünürlüğü, biyopolimerler için önemli bir parametre olup, nanoliflerin nemli ortamlardaki davranışını anlamaya ve biyolojik bozunabilirlik aralıklarını yansıtmaya yardımcı olur. Nanolif örtüsü aktif yenilebilir kaplama olarak işlev görüyorsa, yüksek su çözünürlüğü genellikle istenebilir. Bunun tersine, örtü ikinci bir gıda ambalaj malzemesi olarak kullanılacaksa, düşük su çözünürlüğü tercih edilir (Rubilar vd., 2013). Şekil 6.6(b), nanolif örtülerinin su çözünürlüğünü göstermektedir. Test sonuçları, PVA örneğinin daha yüksek çözünürlük gösterdiğini ve bunun PVA nanoliflerinin yapısındaki OH grubuna atfedilebileceğini göstermektedir (Ramakrishna, 2005). Buna karşın, CMC eklenmesi ve harcanmış balkabağı karbon noktalarının (SPCDs) dahil edilmesi, nanolif örneklerinin su çözünürlüğünün azalmasına neden olmuştur. CMC eklenmesiyle çözünürlükteki azalma, PVA'daki OH grupları ile CMC'deki karboksimetil grupları arasındaki hidrojen bağlarıyla açıklanabilir. Bu etkileşim, su ile etkileşime girebilecek daha az hidrofilik (OH) grup bulunan bir matris oluşturur ve bu da çözünürlüğü azaltır (El Sayed, 2014). Ayrıca, SPCD'lerin dahil edilmesi, nanolif örtülerinde daha yoğun bir ağ oluşturarak suyun matriksin içinde difüzyonunu engeller ve hidrofilik (OH) gruplarının su molekülleriyle temasını engeller (Ozdemir & Floros, 2008). Sonuç olarak, CMC ve SPCD'lerin birleşik etkileri, nanolif örneklerinde su çözünürlüğünün kontrollü bir şekilde azalmasına yol açmıştır.



Şekil 6.6. PVA, PVA-CMC ve PVA-CMC-SPCDs nanolifli matlarının su temas açısı (a) ve su çözünürlüğü (b) değerleri.

6.3.6. Mekanik Özellikler

Şekil 6.7, PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs nanolifli matlarının tipik çekme dayanımı ve kopma uzamasını göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi, PVA nanoliflerinin çekme dayanımı 6,25 MPa ve kopma uzaması %3,94'tür. Dikkat çeken bir şekilde, PVA ile CMC karıştırıldığında hem çekme dayanımı hem de kopma uzaması artmıştır. PVA/CMC nanolifleri, PVA nanoliflerine kıyasla daha yüksek çekme dayanımına sahip olup, artan çekme gerilmesi göstermektedir. Bu, CMC'nin birincil yapısında bir kristalin ızgaranın bulunduğunu düşündürmektedir. PVA/CMC nanolifli matlarının mekanik özelliklerinde gözlemlenen ilginç değişiklikler, birden fazla katkı sağlayan faktörden kaynaklanabilir. Öncelikle, elastik modül ve çekme dayanımı, esasen polimer zincirleri arasındaki moleküler dolaşıklıklar ve etkileşimlerle etkilenir, bu da bu zincirlerin yük altında kaymasına neden olur. İkincil olarak, kopma uzaması yalnızca lifler içindeki moleküller arasındaki etkileşimlere değil, aynı zamanda lifler arasındaki etkileşimlere de bağlıdır, bu da çekme testleri sırasında nanoliflerin yeniden yönelmesini etkiler (Hashmi vd., 2021). Dahası, bireysel lifler arasında kimyasal bağların kurulması, nanolifli yapıya artan sertlik kazandırmış ve uygulanan kuvvet altında bir lifin yeniden yönelmesi ile diğer liflerin yeniden yönelmesi arasında bir bağlantı oluşturmuştur (Siimon vd., 2015). CD'lerin PVA/CMC nanolifli matlarına dahil edilmesinin ardından hem çekme dayanımı hem de kopma uzamasında hafif bir artış gözlemlenmiş ve sırasıyla 8,92 MPa ve %7,79'a ulaşmıştır. Bu iyileşme, CD'lerin yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupların bolluğuna bağlanabilir. Bu fonksiyonel gruplar, CD'ler ile polimer matris arasındaki intermoleküler etkileşimler, örneğin hidrojen bağları aracılığıyla etkileşimi kolaylaştırarak, çekme dayanımı ve kopma uzamasındaki artışa yol açar (Chen vd., 2022). Buda, bu nanolifli matların yeterli mekanik güce sahip olduğu ve onları gıda ambalajı uygulamaları için uygun hale getirdiği sonucuna varılmasına yol açmaktadır.



Şekil 6.7. PVA, PVA/CMC ve PVA/CMC/SPCDs nanofiber matların çekme dayanımı ve kopma uzama oranı.

6.3.7. Antioksidan Aktivite

Gıda ambalaj sistemlerine işlevsel bir malzeme olarak CD'lerin eklenmesi, filmlerin antioksidan yeteneklerini büyük ölçüde artırması ve gıda ürünlerini oksidatif hasara karşı daha iyi koruması beklenmektedir (Bao vd., 2023). Saf PVA ve PVA/CMC karışım örnekleri, CD'leri içermeyen, düşük düzeyde antioksidan aktiviteye sahipti (Şekil 6.8(a)). Bu durum, polimerlerdeki büyük sayıda hidroksil grubunun varlığı ile ilgilidir; bu gruplar elektron verici olarak işlev görerek DPPH ve ABTS radikallerine elektron transferi yapabilirler (Belhaj vd., 2017). CD'lerin eklenmesi, PVA/CMC nanofiberlerinin antioksidan aktivitesini önemli ölçüde artırmıştır. Bu, literatürde farklı polimerlerle üretilen CD'lerin eklenmesiyle yapılan çeşitli çalışmalarla uyumludur (Bao vd., 2023; Khan vd., 2023; Khoshkalampour vd., 2023). SPCD'lerin yüksek antioksidan verimliliği, yüzey fonksiyonel gruplarının serbest radikal temizleme aktivitelerine aktif katılımına atfedilmektedir. Bu çalışma, SPCD'lerin nanofiberlere işlevsel bir malzeme olarak entegrasyonunun, kaplanmış malzemenin antioksidan kapasitesini artırmak için etkili bir teknik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu iyileşme, özellikle gıda ürünlerini oksidatif bozulmadan koruma bağlamında dikkat çekicidir. SPCD'lerin nanofiberlere entegrasyonu, oksidatif stresin etkisini en aza indirerek gıda maddelerinin kalitesini ve dayanıklılığını korumaya

yönelik materyalleri güçlendirmede önemli bir potansiyel sergileyen etkili ve seçici bir teknik olarak ortaya çıkmaktadır.

6.3.8. Antimikrobiyal Aktivite

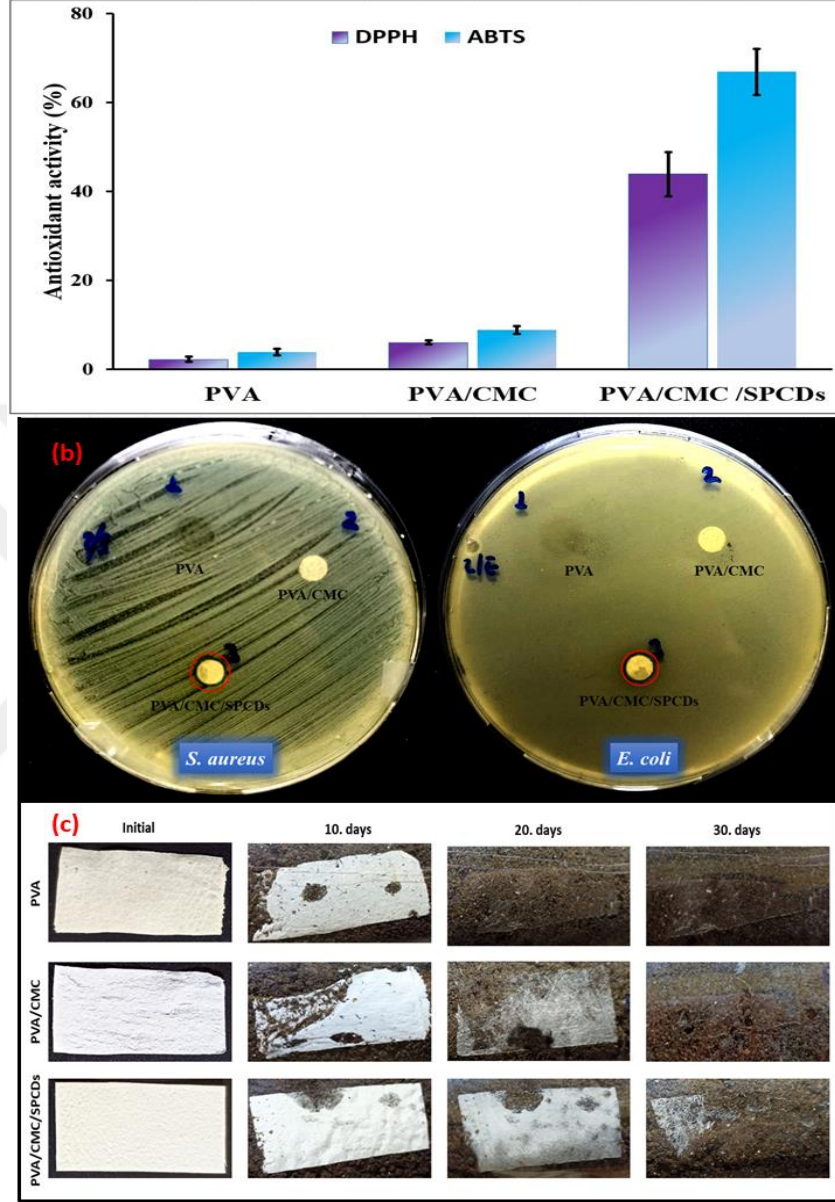
Bu çalışma, elektro-üfleme nanofiberlerinin ve bunların iki kritik gıda kaynaklı patojene gram negatif *E. coli* ve gram pozitif *S. aureus* üzerindeki etkisini inceleyen in vitro antibakteriyel verimlilik alanına girmiştir. PVA ve PVA/CMC ile yapılan nanofiberler, her iki bakteriyel suşa karşı da belirgin bir antibakteriyel aktivite göstermedi. Tam aksine, SPCD'lerin nanofiber yapısına entegrasyonu, önemli bir antibakteriyel etki sergileyerek *E. coli* ve *S. aureus*'a karşı sırasıyla 9.4 ± 2.8 mm ve 7.9 ± 1.3 mm büyüklüğünde inhibisyon alanları oluşturmuştur (Şekil 6.8(b)). Bu antibakteriyel yeteneğin moleküler temeli, yerleştirilen CD'ler ile bakteriyel organizmalar arasındaki etkileşimde, nemli ortamda meydana gelen dinamik etkileşime dayanır. CD'lerin, etkileşimleri aracılığıyla süperoksit ve hidroksil radikalleri dahil olmak üzere son derece reaktif oksijen türleri üretir. Bu güçlü reaktif türler, bakteriyel hücre duvarlarını aşma yeteneğine sahip olup, bakteriyel organizmaların ölümüne neden olur (Innocenzi & Stagi, 2023). Geçmişte, gıda ambalajı alanında karbon noktalarının kullanımı, genellikle çözücü dökme prosedürlerine dayanıyordu. Bu çalışmalar, CD'lerin hem gram pozitif hem de gram negatif bakterilere karşı geniş spektrumlu antibakteriyel özelliklerini vurgulamış olsa da (Ghirardello vd., 2021; Li vd., 2022), döküm sırasında CD'lerin kümelenmesi ve filmin iki boyutlu yapısı nedeniyle CD'lerin sınırlı dağılımı gibi zorluklar, genel etkinliklerini önemli ölçüde kısıtlamıştır (Das Purkayastha vd., 2014). Bu çalışmada, elektro-üfleme nanofiberlerinin alışılmadık üç boyutlu tasarımı ve büyük yüzey alanı kullanılmıştır. Bu sıra dışı yapısal yapı, CD'lerin nanofiber kaplama malzemesi içinde etkili bir şekilde difüze olabilmesi için optimum bir ortam sağlamıştır. Bu ince tasarım, nanofiberlerin mikroorganizmalar üzerinde daha fazla kontrol sağlamasına olanak tanır. Geleneksel döküm yöntemleriyle ilişkili sınırlamaları aşarak, elektro-üfleme nanofiberleri, yalnızca standart dökümün zorluklarına çözüm sunmakla kalmaz, aynı zamanda CD'lerin antibakteriyel etkinliğini artırmada dönüşüm sağlayan bir ortam olarak potansiyelini vurgular. Bu yenilikçi yaklaşım sadece geleneksel döküm tekniklerinin kısıtlamalarına yeni bir çözüm sunmakla kalmıyor, aynı zamanda

elektro-üflemleri nanoliflerin CD'lerin antibakteriyel performansını optimize etmedeki umut verici rolünün altını çiziyor ve böylece gıda ürünlerinin korunmasındaki potansiyel uygulamalarını güçlendiriyor.

6.3.9. Biyolojik Bozunma Süresi

Nanofiberlerin biyolojik bozunabilirliği, toprak gömme yöntemi kullanılarak yapılan ve Şekil 6.8 (c)'te gösterilen 45 günlük detaylı bir araştırma ile incelenmiştir. Bu araştırma, çevresel etkilerini anlamak için kritik olan bozunma mekanizmaları ve zaman dilimlerini ortaya koymuştur. Hidroliz, bozunmanın baskın yolu olarak ortaya çıkmış ve bu süreç, suyun varlığı ile doğrudan ilişkilidir. Su hem toprak matrisi içinde hem de malzeme yüzeyinde bulunan her yerde bulunarak, polimer film bozulması için gerekli olan mikroorganizmaların büyümesini ve çoğalmasını desteklemede önemli bir rol oynamıştır. Aynı zamanda, hidroliz süreci, su molekülleriyle olan hidrojen bağlarının kopması sonucu polimer sırtının parçalanarak daha küçük ve yönetilebilir parçalara dönüşmesiyle ilerlemiştir. Kaplama malzemesine eklenen hidrofilik bileşenler, bu karmaşık bozunma sürecini hızlandırmıştır (González & Igarzabal, 2013). Üretilen her çeşit nanofiber, kendi bileşimleri ve içsel özellikleriyle yakından ilişkili olan bireysel bozunma profilleri göstermiştir. Sadece PVA'dan üretilen nanofiberler, 22 günlük kısa bir süre içinde hızlı ve tamamen bozulmuşlardır. Buna karşılık, PVA/CMC örneği, PVA ve CMC arasında sürekli hidrojen bağlarının oluşması nedeniyle biraz daha geç, 33. gün civarında görünür bir bozunma göstermiştir. Dikkate değer bir şekilde, SPCD'ler ile zenginleştirilmiş nanofiberler, 42. günde tamamlanan daha uzun bir bozunma süresi sergilemiştir. Bu uzamış bozunma süresi, PVA/CMC/SPCDs kompozitinin içsel olarak güçlü antibakteriyel özellikleri ile ilişkilendirilebilir; bu özellikler, bozunma sürecinde gerekli olan mikroorganizmaların aktivitelerini engelliyor olabilir. Bu karmaşık bulgular, üretilen nanofiberlerin sadece ürünler değil, aynı zamanda sürdürülebilir ambalaj için önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Doğal bozunabilirlikleri, onları çevre dostu alternatifler olarak sunduğu gibi, sürdürülebilir ambalaj çözümleri alanında değişim ajanları olarak potansiyellerini de vurgulamaktadır. Bu nanofiberlerin entegrasyonu, standart sentetik malzemelerle ilişkilendirilen çevresel ayak izini büyük ölçüde

azaltma kapasitesine sahiptir ve ambalajlamada daha sürdürülebilir ve çevresel olarak duyarlı bir yaklaşım için yolu açmaktadır.

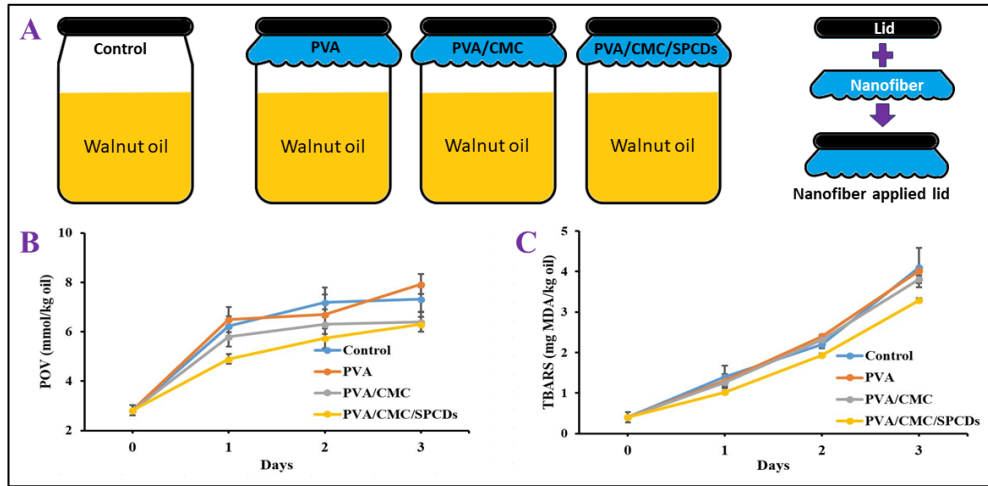


Şekil 6.8. Nanolif matlarının antioksidan (a), antimikrobiyal (b) ve bozunma (c) özellikleri

6.4. GIDA UYGULAMA VE STABİLİTE TESTLERİ

Ceviz yağı, besleyici avantajları ve bilişsel fonksiyonları iyileştirme yeteneği ile tanınan önemli bir doğal bitkisel yağdır. Ana yağ asidi içeriğinin yanı sıra, ceviz yağı

fenoller, steroller, skualen, melatonin, vitaminler ve mineraller gibi birçok biyolojik aktif bileşen içerir. Yağın farklı bileşenleri, antioksidan, kanser önleyici ve kolesterol düşürücü özellikler gibi sağlık üzerindeki faydalı etkilerine katkıda bulunmaktadır (Song vd., 2022). Ceviz yağı esas olarak tekli doymamış yağ asitleri ve çoklu doymamış yağ asitleri içeren triasilgliserollerden oluşur. Bununla birlikte, oksidatif bozulma süreci önemli bir engel teşkil etmekte olup, ceviz yağının saklanabileceği süreyi kısaltmaktadır. Oksidasyonu önlemek, yağ üretimi, taşınması ve depolanması sürecinde son derece önemlidir. Stratejiler arasında oksijen maruziyetini azaltmak, inert atmosferler oluşturmak ve yağa sentetik veya doğal antioksidanlar eklemek yer alır (Masoodi vd., 2022). Sıvı ceviz yağını inert bir atmosferde korumak mümkün olsa da, şişe açıldıktan sonra bu genellikle tüketiciler için uygulanabilir değildir. Bu çalışmada kullanılan ceviz yağları, atmosfer havası eşliğinde 60 °C sıcaklıkta depolanmaya maruz bırakılmıştır, özel bir inert atmosfer kullanılmamıştır. Özellikle, nanolifler, ceviz yağıyla doğrudan temas etmeyecek şekilde kavanozları kapatmadan önce yeni bir yöntemle uygulanmıştır, bu durum Şekil 6.9(a)'da gösterilmiştir. Bu yenilikçi strateji, oksidasyonu azaltmayı ve gerçek yaşam koşullarını simüle eden ortamda ceviz yağının bütünlüğünü korumayı amaçlamaktadır.



Şekil 6.9. Hızlandırılmış depolama sırasında ceviz yağının peroksit (b) ve Tiyoobarbiturik Asit Reaktif Maddeler (c) değerleri ile nanolifli gıda uygulaması şematik görselleştirmesi (a).

Gerçekten de, peroksitler, yağların oksidasyon sürecindeki ana ürünler olarak önemli bir rol oynar. Bu peroksitler, hidroperoksitler, siklik peroksitler ve epiperoksitler gibi

çeşitli formlarda ortaya çıkar. Üretimleri, yağlardaki oksidatif bozulmanın başlangıç aşamalarını gösterir ve oksidatif süreçlerin miktarının önemli göstergeleri olarak hizmet eder. Peroksit seviyelerinin izlenmesi ve ölçülmesi, yağların tazeliğini ve stabilitesini değerlendirmede kritik öneme sahiptir, çünkü bunların birikimi, istenmeyen tat, koku ve besin kalitesi değişikliklerine yol açabilir (Choe & Min, 2006). Hızlandırılmış depolama süreci boyunca, örneklerin peroksit değeri (POV), başlangıçta 2.82 ± 0.21 mmol/kg olarak ölçüldü ve tüm örneklerde ilk gün önemli bir artış gösterdi, ardından 2. ve 3. günlerde daha ılımlı bir artış izledi. Depolamanın ilerleyen aşamalarında POV artış hızındaki yavaşlama, ikincil oksidasyon ürünlerinin oluşumuna doğru bir kaymaya işaret edebilir. Hem 1. hem de 2. günlerde, PVA/CMC örneği SPCD'ler, ilavesiz karşılığına göre POV artışını daha belirgin bir şekilde baskıladı. Ancak, 3. gün sonunda PVA/CMC/SPCD'ler ile PVA/CMC örnekleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktu. SPCD'lerin kendi oksidasyon karşıtı aktivitelerinin yanı sıra, önceki bir çalışma, karboksimetil selüloz (CMC)'nin hidroperoksit radikallerini etkili bir şekilde yakalayabileceğini ve böylece hidroperoksit birikimini geciktirebileceğini bildirmiştir (Kang HyeJin vd., 2013). Depolamanın tüm aşamalarında, hem SPCD'ler hem de CMC'nin oksidasyonu azaltma üzerinde baskılayıcı bir etkisi olduğu ve örneklerin oksidatif stabilitesini artırmak için katkı maddesi olarak potansiyel taşıdığı sonucuna varılabilir.

TBARS testi, özellikle malondialdehit üzerine odaklanarak, ikincil lipid peroksidasyon ürünlerini ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir kolorimetrik yöntemdir. Beklendiği gibi, TBARS değerleri depolama süresi boyunca tutarlı bir şekilde artış gösterdi. İlk gün 0.4 ± 0.13 mg MDA/kg olan bu değer, kontrol, PVA ve PVA/CMC örneklerinde benzer bir eğilim izleyerek depolama süresinin son gününde ortalama 3.98 ± 0.22 mg MDA/kg'a ulaştı. Özellikle, depolama süresi boyunca SPCD'ler entegre edilmiş örneğin TBARS değeri, diğer örneklerden sürekli olarak daha düşük oldu. Son gün, bu fark yaklaşık %18'e ulaştı. Özetle, SPCD'lerin elektrofiber nanoliflere entegre edilmesi, yağlarda doğrudan temas olmaksızın oksidasyonu azaltmak için etkili bir çözüm sunuyor gibi görünmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, karbon noktaları (CD'ler) içeren kompozit nanofibröz matlar, yenilikçi ve hızlı bir elektro-üfleme tekniği kullanılarak üretilmiştir. Çalışma, çevre dostu ve sürdürülebilir aktif gıda ambalajı üretimi için önemli bir adım sunmaktadır. Karbon noktaları, atık malzemelerden (harcanan balkabağı) üretilmiş ve yapılan araştırmalar, bu karbon noktalarının kondrosit ve akciğer hücrelerine karşı oldukça düşük toksisiteye sahip olduğunu ortaya koymuştur. FTIR analizi, bu karbon noktalarının nanofibröz matlara başarılı bir şekilde entegre olduğunu doğrulamıştır. SEM ve TGA analizleri ise, karbon noktalarının nanofiberlerin morfolojisi ve termal stabilitesi üzerinde herhangi bir olumsuz etki yaratmadığını göstermiştir.

Nanofibröz matların hidrofilik özellikleri ve suya karşı çözünürlük dirençleri, CD'lerin hidrofilik özellikleri ve hidrojen (OH) gruplarının su molekülleriyle etkileşimini engelleme özellikleri sayesinde artmıştır. Bu da matların suya karşı dayanıklılığını güçlendirmiştir. Ayrıca, PVA/CMC/SPCD'ler örneği, PVA/CMC örneğinden daha yüksek mukavemet göstermiş, ancak biyolojik bozunma süresinde bir gecikme yaşanmıştır. Bu durum, kompozit matların dayanıklılığını artırırken, çevresel etkilerin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

CD'lerin eklenmesi, nanofibröz matların antimikrobiyal ve antioksidan özelliklerini artırmış ve bu matlar, gıda ürünlerinin depolama koşullarına karşı daha dayanıklı hale gelmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, çevre dostu ve sürdürülebilir aktif gıda ambalajı için büyük bir potansiyel sunmakta olup, ambalaj endüstrisinde kapsamlı ve pratik bir çözüm önerisi getirmektedir. Bununla birlikte, daha fazla optimizasyon ve uzun vadeli testler ile biyolojik bozunma süresinin iyileştirilmesi gerektiği de gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Adan, A., Kiraz, Y., & Baran, Y. "Cell Proliferation and Cytotoxicity Assays [Text]." **Bentham Science Publishers**. (2016).
- Ahmed, S., & Ikram, S. "Chitosan Based Scaffolds and Their Applications in Wound Healing". **Achievements in the Life Sciences**, 10(1), 27-37. (2016).
- Akçalı, K., & Bulut, M. O. "Tekstilde kullanılan bazı biyopolimerlerin tarım alanında uygulanabilirliğinin incelenmesi." **Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences** 3.2: 94-102. (2020).
- Alghoraibi, I., & Alomari, S. "Different methods for nanofiber design and fabrication." **Handbook of nanofibers** 1 46. (2018)
- Alheety, N. F., Mohammed, L. A., Majeed, A. H., Aydin, A., Ahmed, K. D., Alheety, M. A., Guma, M. A., & Dohare, S. "Antiproliferative and antimicrobial studies of novel organic-inorganic nanohybrids of ethyl 2-((5-methoxy-1H-benzo [d] imidazol-2-yl) thio) acetate (EMBIA) with TiO₂ and ZnO." **Journal of Molecular Structure** 1274: 134489. (2023)
- Allafchian, A., Hosseini, H., & Ghoreishi, S. M. "Electrospinning of PVA-carboxymethyl cellulose nanofibers for flufenamic acid drug delivery". **International Journal of Biological Macromolecules**, 163, 1780-1786. (2020).
- Arefian, M., Hojjati, M., Tajzad, I., Mokhtarzade, A., Mazhar, M., & Jamavari, A. "A review of Polyvinyl alcohol/Carboxymethyl cellulose (PVA/CMC) composites for various applications." **Journal of Composites and Compounds**, 2(3), 69-76. (2020).
- Armentano, I., Dottori, M., Fortunati, E., Mattioli, S., & Kenny, J. M. "Biodegradable polymer matrix nanocomposites for tissue engineering:" A review. **Polymer degradation and stability**, 95(11), 2126-2146. (2013).
- Aslam, M., Kalyar, M. A., & Raza, Z. A. "Polyvinyl alcohol: A review of research status and use of polyvinyl alcohol based nanocomposites." **Polymer Engineering & Science**, 58(12), 2119-2132. (2018).
- Aytaç, Z. "Electrospinning of Cyclodextrin Functionalized Nanofibers and Their Applications" **PhD Thesis, Bilkent Üniversitesi** (Turkey)]. (2016).
- Babaarslan, E. "Nano Polimerlerin Sentezi Karakterizasyonu ve Toksik Özelliklerinin İncelenmesi" **[Master's Thesis, Ankara Üniversitesi** (Turkey)]. (2014).
- Baker, S. N., & Baker, G. A. "Luminescent Carbon Nanodots: Emergent Nanolights." **Angewandte Chemie International Edition**, 49(38), 6726-6744. (2010).

Bao, J., Hu, Y., Farag, M. A., Huan, W., Wu, J., Yang, D., & Song, L. "Carbon dots, cellulose nanofiber, and essential oil nanoemulsion from *Torreya grandis* aril added to fish scale gelatin film for tomato preservation". ***International Journal of Biological Macromolecules***, 245, 125482. (2023).

Baweja, H., & Jeet, K. "Economical and green synthesis of graphene and carbon quantum dots from agricultural waste." ***Materials Research Express***, 6(8), 0850g8. (2019).

Belhaj, D., Frikha, D., Athmouni, K., Jerbi, B., Ahmed, M. B., Bouallagui, Z., Kallel, M., Maalej, S., Zhou, J., & Ayadi, H. "Box-Behnken design for extraction optimization of crude polysaccharides from Tunisian *Phormidium versicolor* cyanobacteria (NCC 466): Partial characterization, in vitro antioxidant and antimicrobial activities." ***International journal of biological macromolecules***, 105, 1501-1510. (2017).

Biçer, A., & Biçer, K. B. " Kırmızı soğandan karbon kuantum noktaların sentezi ve fotolüminesans özelliklerinin incelenmesi." ***Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 24(1), 48-56. (2020).

Cao, X., Zhao, Y., Leng, J., Bai, X., Qu, Y., Jiang, L., Chen, D., & Wang, J. "One-pot synthesis of carbon dots/hydrochar and visible-light-driven photocatalysts for aerobic oxidative coupling of benzylic amines." ***Chemical Synthesis***, 5(1), N-A. (2024).

Chen, X., Qin, Y., Song, X., Li, H., Yang, Y., Guo, J., Cui, T., Yu, J., Wang, C.-F., & Chen, S. "Green Synthesis of Carbon Dots and Their Integration into Nylon-11 Nanofibers for Enhanced Mechanical Strength and Biocompatibility." ***Nanomaterials***, 12(19), 3347. (2022).

Choe, E., & Min, D. B. "Mechanisms and Factors for Edible Oil Oxidation." ***Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety***, 5(4), 169-186. (2006).

Çelebi, M., & Karagöz, İ. "Biyobozunur Polimerler Ve Özellikleri; Nişasta, Poli (Glikolik Asit), Poli (Laktik Asit) Ve Poli (ε Kaprolakton)." ***Gece Akademi Yayıncılık, Mühendislik Alanında Yeni Ufuklar***, 249-266. (2019).

Das Purkayastha, M., Manhar, A. K., Das, V. K., Borah, A., Mandal, M., Thakur, A. J., & Mahanta, C. L. "Antioxidative, Hemocompatible, Fluorescent Carbon Nanodots from an “End-of-Pipe” Agricultural Waste: Exploring Its New Horizon in the Food-Packaging Domain." ***Journal of Agricultural and Food Chemistry***, 62(20), 4509-4520. (2014).

de Lima Silva, I. D., de Moraes, L. E. P. T., Caetano, V. F., De Andrade, M. F., Hallwass, F., Brito, A. M. S. S., & Vinhas, G. M. "Development of antioxidant active PVA films with plant extract of *Caesalpinia ferrea* Martius". ***Lwt***, 144, 111215. (2021).

Demirkıran, A. "Nanoteknolojinin insan sağığına faydalı ve zararlı yönleri." **Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 9(2), 136-148. (2019).

Dinç, S. "Kestane balından sentezlenen karbon noktaların tetrasiklin analizinde kullanılabilirliğinin araştırılması." **Uludağ Arıcılık Dergisi**, 17(2), 49-58. (2017).

Djebari, S., Wrona, M., Boudria, A., Salafranca, J., Nerin, C., Bedjaoui, K., & Madani, K. "Study of bioactive volatile compounds from different parts of Pistacia lentiscus L. extracts and their antioxidant and antibacterial activities for new active packaging application." **Food Control**, 120, 107514. (2021).

Doğan, C., Doğan, N., & Akgül, Y. "Şeker..." **Google Akademik**. (2022).

El Mouzahim, M., Eddarai, E. M., Eladaoui, S., Guenbour, A., Bellaouchou, A., Zarrouk, A., & Boussen, R. "Taze kesilmiş elma dilimlerinin korunması için kitosan, doğal kaolinit kili ve *Ficus.carica* yaprak özütü bazlı gıda ambalaj kompozit filmi." **International Journal of Biological Macromolecules**, 233, 123430. (2023).

Elnabawy, E., Sun, D., Shearer, N., & Shyha, I. "Electro-blown spinning: New insight into the effect of electric field and airflow hybridized forces on the production yield and characteristics of nanofiber membranes." **Journal of Science: Advanced Materials and Devices**, 8(2), 100552. (2023).

Erkul, Ş. N., & Uçaroğlu, S. "Topraklarda Polilaktik Asitin (Pla) Biyobozunması." **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, 28(1), 25-40. (2023).

Ezati, P., Rhim, J.-W., Molaei, R., Priyadarshi, R., & Han, S. "Cellulose nanofiber-based coating film integrated with nitrogen-functionalized carbon dots for active packaging applications of fresh fruit." **Postharvest Biology and Technology**, 186, 111845. (2022).

Fang, Z., Zhao, Y., Warner, R. D., & Johnson, S. K. "Active and intelligent packaging in meat industry." **Trends in Food Science & Technology**, 61, 60-71. (2017).

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). "Production, use, and fate of all plastics ever made." **Science Advances**, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Ghirardello, M., Ramos-Soriano, J., & Galan, M. C. (2021). "Carbon dots as an emergent class of antimicrobial agents." **Nanomaterials**, 11(8), 1877.

Ghosh, S., & Webster, T. J. "Metallic nanoscaffolds as osteogenic promoters: Advances, challenges and scope." **Metals**, 11(9), 1356. (2021).

González, A., & Igarzabal, C. I. A. "Soy protein–Poly (lactic acid) bilayer films as biodegradable material for active food packaging." *Food Hydrocolloids*, 33(2), 289-296. (2013).

Gökmeşe, F., Uslu, İ., & Aytimur, A. "Preparation and Characterization of PVA/PVP Nanofibers as Promising Materials for Wound Dressing." *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(12), 1259-1265. (2013).

Gunawan, N. R., Tessman, M., Schreiman, A. C., Simkovsky, R., Samoylov, A. A., Neelakantan, N. K., Bemis, T. A., Burkart, M. D., Pomeroy, R. S., & Mayfield, S. P. (2020). "Rapid biodegradation of renewable polyurethane foams with identification of associated microorganisms and decomposition products." *Bioresource Technology Reports*, 11, 100513.

Hashmi, M., Ullah, S., Ullah, A., Saito, Y., Haider, M. K., Bie, X., Wada, K., & Kim, I. S. "Carboxymethyl cellulose (CMC) based electrospun composite nanofiber mats for food packaging." *Polymers*, 13(2), 302. (2021).

Innocenzi, P., & Stagi, L. "Carbon dots as oxidant-antioxidant nanomaterials, understanding the structure-properties relationship. A critical review." *Nano Today*, 50, 101837. (2023).

İnternet: Bor\u00f1u\u00f1kov\u00e1, K., Wiener, J., & Jakubi\u00e7kov\u00e1, M. "Preparation and properties of microporous structures based on cmc. " <https://www.academia.edu/download/87375234/758.pdf> (2012).

Jafarzadeh, S., Jafari, S. M., Salehabadi, A., Nafchi, A. M., Kumar, U. S. U., & Khalil, H. A. "Biodegradable green packaging with antimicrobial functions based on the bioactive compounds from tropical plants and their by-products." *Trends in Food Science & Technology*, 100, 262-277. (2020).

Kang, H. J., Kim, S. J., You, Y. S., Lacroix, M., & Han, J. "Inhibitory effect of soy protein coating formulations on walnut (*Juglans regia* L.) kernels against lipid oxidation." *LWT-Food science and technology*, 51(1), 393-396. (2013).

Karabulut, M., Atay, E., & Mete, A. A. "Kitin ile g\u00fc\u00e7lendirilen elektroe\u011frilmi\u015f nanoliflerin aktif ambalaj malzemesi olarak kullanılabilirli\u011finin incelenmesi." *Gıda*, 44(6), 1237-1252. (2019).

Karaku\u015f, E., & Ayhan, Z. "Gıda atıklarından \u00e7evre dostu biyobozunur ambalaj malzemesi \u00fcretimi." *Gıda*, 44(6), 1008-1019. (2019).

Karaku\u015f, E., KiBar Balballi, E., Ara, İ., & Ayhan, Z. "Polisakkarit ve Protein Bazlı Aktif Biyokompozit Malzemelerin Gıda Ambalajlama A\u00e7ısından De\u011ferlendirilmesi." *Akademik Gıda*, 19(1), 74-88. (2021).

Khan, A., Ezati, P., & Rhim, J.-W. "Chitosan/gelatin-based multifunctional film integrated with green tea carbon dots to extend the shelf life of pork." **Food Packaging and Shelf Life**, 37, 101075. (2023).

Khoshkalampour, A., Ghorbani, M., & Ghasempour, Z. "Cross-linked gelatin film enriched with green carbon quantum dots for bioactive food packaging." **Food Chemistry**, 404, 134742. (2023).

Kılınç, M., Tomar, O., & Çağlar, A. "Biyobozunur gıda ambalaj malzemeleri." **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 17(3), 988-996. (2017).

Kong, C. S., Yoo, W. S., Lee, K. Y., & Kim, H. S. "Nanofiber deposition by electroblowing of PVA (polyvinyl alcohol)." **Journal of Materials Science**, 44(4), 1107-1112. (2009).

Kumar, L., & Gaikwad, K. K. "Carbon dots for food packaging applications." **Sustainable Food Technology**, 1(2), 185-199. (2023).

Lee, C., Pant, B., Alam, A.-M., An, T., Chung, H.-J., Hong, S.-T., Park, S.-J., Park, M., & Kim, H.-Y. "Biocompatible and photoluminescent keratin/poly(vinyl alcohol)/carbon quantum dot nanofiber: A novel multipurpose electrospun mat." **Macromolecular Research**, 24(10), 924-930. (2016).

Li, H., He, X., Liu, Y., Huang, H., Lian, S., Lee, S.-T., & Kang, Z. "One-step ultrasonic synthesis of water-soluble carbon nanoparticles with excellent photoluminescent properties." **Carbon**, 49(2), 605-609. (2011).

Li, H., Kang, Z., Liu, Y., & Lee, S.-T. "Carbon nanodots: Synthesis, properties and applications." **Journal of materials chemistry**, 22(46), 24230-24253. (2012).

Li, H., Zhang, Y., Wang, L., Tian, J., & Sun, X "Nucleic acid detection using carbon nanoparticles as a fluorescent sensing platform." **Chemical Communications**, 47(3), 961-963. . (2011).

Li, H., Zhang, Y., Wang, L., Tian, J., & Sun, X "Nucleic acid detection using carbon nanoparticles as a fluorescent sensing platform." **Chemical Communications**, 47(3), 961-963. . (2011).

Li, P., Sun, L., Xue, S., Qu, D., An, L., Wang, X., & Sun, Z. "Recent advances of carbon dots as new antimicrobial agents." **SmartMat**, 3(2), 226-248. (2022).

Ma, Z., Zhang, Y.-L., Wang, L., Ming, H., Li, H., Zhang, X., Wang, F., Liu, Y., Kang, Z., & Lee, S.-T. "Bioinspired Photoelectric Conversion System Based on Carbon-

Quantum-Dot-Doped Dye–Semiconductor Complex." *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(11), 5080-5084. (2013).

Madheswaran, D., Sivan, M., Valtera, J., Kostakova, E. K., Egghe, T., Asadian, M., Novotny, V., Nguyen, N. H. A., Sevcu, A., Morent, R., De Geyter, N., & Lukas, D. "Composite yarns with antibacterial nanofibrous sheaths produced by collectorless alternating-current electrospinning for suture applications." *Journal of Applied Polymer Science*, 139(13), 51851. (2022).

Makris, D. P., & Şahin, S. "Polyphenolic antioxidants from agri-food waste biomass." *Antioxidants* (C. 8, Sayı 12, s. 624). (2019).

Mali, P., & Sherje, A. P. "Cellulose nanocrystals: Fundamentals and biomedical applications." *Carbohydrate Polymers*, 275, 118668. (2022).

Masoodi, L., Gull, A., Masoodi, F. A., Gani, A., Nissar, J., Ahad, T., Nayik, G. A., Mukarram, S. A., Kovács, B., & Prokisch, J. "An overview on traditional vs. Green technology of extraction methods for producing high quality walnut oil." *Agronomy*, 12(10), 2258. (2022).

Mewada, A., Pandey, S., Thakur, M., Jadhav, D., & Sharon, M. "Swarming carbon dots for folic acid mediated delivery of doxorubicin and biological imaging." *Journal of Materials Chemistry B*, 2(6), 698-705. (2014).

Middleton, J. C., & Tipton, A. J. "Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices." *Biomaterials*, 21(23), 2335-2346. (2000).

Milligan, M. W., Lu, F., Buntin, R. R., & Wadsworth, L. C. "The use of crossflow to improve nonwoven melt-blown fibers." *Journal of Applied Polymer Science*, 44(2), 279-288. (1992).

Min, S., Ezati, P., Yoon, K. S., & Rhim, J.-W. "Gelatin/poly (vinyl alcohol)-based functional films integrated with spent coffee ground-derived carbon dots and grapefruit seed extract for active packaging application." *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 123493. (2023).

Mishra, M. K., Chakravarty, A., Bhowmik, K., & De, G. "Carbon nanodot–ORMOSIL fluorescent paint and films." *Journal of Materials Chemistry C*, 3(4), 714-719. (2015).

Morsi, M. A., Oraby, A. H., Elshahawy, A. G., & Abd El-Hady, R. M. "Preparation, structural analysis, morphological investigation and electrical properties of gold nanoparticles filled polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose blend." *Journal of materials research and technology*, 8(6), 5996-6010. (2019).

Nair, L. S., & Laurencin, C. T. "Biodegradable polymers as biomaterials." ***Progress in polymer science***, 32(8-9), 762-798. (2007).

Niaounakis, M.. "Biopolymers: Applications and trends." ***William Andrew***. (2015)

Niaounakis, M. "Recycling of flexible plastic packaging." ***William Andrew***. (2019).

Niaounakis, M. "Recycling of Flexible Plastic Packaging." ***William Andrew***. (2019).

Oza, G., Ravichandran, M., Merupo, V.-I., Shinde, S., Mewada, A., Ramirez, J. T., Velumani, S., Sharon, M., & Sharon, M. "Camphor-mediated synthesis of carbon nanoparticles, graphitic shell encapsulated carbon nanocubes and carbon dots for bioimaging." ***Scientific reports***, 6(1), 21286. (2016).

Ozdemir, M., & Floros, J. D. "Optimization of edible whey protein films containing preservatives for water vapor permeability, water solubility and sensory characteristics". ***Journal of Food Engineering***, 86(2), 215-224. (2008).

Oztan, C., Ginzburg, E., Akin, M., Zhou, Y., Leblanc, R. M., & Coverstone, V. "3D printed ABS/paraffin hybrid rocket fuels with carbon dots for superior combustion performance." ***Combustion and flame***, 225, 428-434. (2021).

Pandey, S., Thakur, M., Mewada, A., Anjarlekar, D., Mishra, N., & Sharon, M. "Carbon dots functionalized gold nanorod mediated delivery of doxorubicin: Tri-functional nano-worms for drug delivery, photothermal therapy and bioimaging." ***Journal of Materials Chemistry B***, 1(38), 4972-4982. (2013).

Panzella, L., Moccia, F., Nasti, R., Marzorati, S., Verotta, L., & Napolitano, A. "Bioactive phenolic compounds from agri-food wastes: An update on green and sustainable extraction methodologies." ***Frontiers in nutrition***, 7, 60. (2020).

Pashameah, R. A., El-Sharnouby, M., El-Askary, A., El-Morsy, M. A., Ahmed, H. A., & Menazea, A. A. "Optical, Structural, Electrical Characterization of (Polyvinyl Alcohol–Carboxymethyl Cellulose–Manganese Dioxide) Nanocomposite Fabricated via Laser Ablation." ***Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials***, 32(8), 2863-2872. (2022).

Peelman, N., Ragaert, P., De Meulenaer, B., Adons, D., Peeters, R., Cardon, L., Van Impe, F., & Devlieghere, F. "Application of bioplastics for food packaging." ***Trends in Food Science & Technology***, 32(2), 128-141. (2013).

Pei, X., Yin, F., Zhong, X., Liu, H., Song, L., Zhao, G., Wang, Y., & Zhou, D. "Effects of different antioxidants and their combinations on the oxidative stability of DHA algae oil and walnut oil." ***Food Science & Nutrition***, 10(8), 2804-2812. (2022).

Peng, H., & Travas-Sejdic, J. "Simple Aqueous Solution Route to Luminescent Carbogenic Dots from Carbohydrates." **Chemistry of Materials**, 21(23), 5563-5565. (2009).

Pettignano, A., Charlot, A., & Fleury, E. "Carboxyl-functionalized derivatives of carboxymethyl cellulose: Towards advanced biomedical applications." **Polymer Reviews**, 59(3), 510-560. (2019).

Pires, S. M., & Devleeschauwer, B. "Estimates of global disease burden associated with foodborne pathogens." **Foodborne infections and intoxications** (ss. 3-17). (2021).

Prasannan, A., & Imae, T. "One-Pot Synthesis of Fluorescent Carbon Dots from Orange Waste Peels." **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 52(44), 15673-15678. (2013).

Ramos, M., Beltrán, A., Peltzer, M., Valente, A. J., & del Carmen Garrigós, M. "Release and antioxidant activity of carvacrol and thymol from polypropylene active packaging films." **LWT-Food Science and Technology**, 58(2), 470-477. (2014).

Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Parisi, O. I., Cirillo, G., Curcio, M., Iemma, F., Puoci, F., Vinci, G., & Picci, N. "New EU regulation aspects and global market of active and intelligent packaging for food industry applications." **Food Control**, 21(11), 1425-1435. (2010).

Rezaei, A., Tavanai, H., & Nasirpour, A. "Fabrication of electrospun almond gum/PVA nanofibers as a thermostable delivery system for vanillin." **International Journal of Biological Macromolecules**, 91, 536-543. (2016).

Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., de Melo, N. R., & Sanches-Silva, A. "Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends." **Trends in food science & technology**, 61, 132-140. (2017).

Rubilar, J. F., Cruz, R. M., Silva, H. D., Vicente, A. A., Khmelinskii, I., & Vieira, M. C. "Physico-mechanical properties of chitosan films with carvacrol and grape seed extract." **Journal of Food Engineering**, 115(4), 466-474. (2013).

Rujnić-Sokele, M., & Pilipović, A. "Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review." **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, 35(2), 132-140. (2017).

Šamec, D., Loizzo, M. R., Gortzi, O., Çankaya, İ. T., Tundis, R., Santar, İ., Shirooie, S., Zengin, G., Devkota, H. P., Reboredo-Rodríguez, P., Hassan, S. T. S., Manayi, A., Kashani, H. R. K., & Nabavi, S. M. "The potential of pumpkin seed oil as a functional food—A comprehensive review of chemical composition, health benefits, and safety." **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 21(5), 4422-4446. (2022).

Sarkar, C., Chowdhuri, A. R., Kumar, A., Laha, D., Garai, S., Chakraborty, J., & Sahu, S. K. "One pot synthesis of carbon dots decorated carboxymethyl cellulose-hydroxyapatite nanocomposite for drug delivery, tissue engineering and Fe³⁺ ion sensing." *Carbohydrate polymers*, 181, 710-718. (2018).

Sarwar, Z., Krugly, E., Danilovas, P. P., Ciužas, D., Kauneliene, V., & Martuzevicius, D. "Fabrication and characterization of PEBA fibers by melt and solution electrospinning." *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6074-6085. (2019).

Sattariazar, S., Ebrahimi, S. N., & Aرسالani, N. "Enhancing the properties of electrospun polyvinyl Alcohol/Oxidized sodium alginate nanofibers with fluorescence carbon Dots: Preparation and characterization." *International Journal of Pharmaceutics*, 644, 123358. (2023).

Settanni, L., Palazzolo, E., Guarrasi, V., Aleo, A., Mammina, C., Moschetti, G., & Germanà, M. A. "Inhibition of foodborne pathogen bacteria by essential oils extracted from citrus fruits cultivated in Sicily." *Food control*, 26(2), 326-330. (2012).

Shafiei, S., Omid, M., Nasehi, F., Golzar, H., Mohammadrezaei, D., Rad, M. R., & Khojasteh, A. "Egg shell-derived calcium phosphate/carbon dot nanofibrous scaffolds for bone tissue engineering: Fabrication and characterization." *Materials Science and Engineering: C*, 100, 564-575. (2019).

Sharma, P. R., & Varma, A. J. "Functional nanoparticles obtained from cellulose: Engineering the shape and size of 6-carboxycellulose." *Chemical Communications*, 49(78), 8818-8820. (2013).

Sharma, R., Jafari, S. M., & Sharma, S. "Antimicrobial bio-nanocomposites and their potential applications in food packaging." *Food Control*, 112, 107086. (2020).

Sharma, S., Barkauskaite, S., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. "Essential oils as additives in active food packaging." *Food chemistry*, 343, 128403. (2021).

Shi, W., Li, X., & Ma, H. "A tunable ratiometric pH sensor based on carbon nanodots for the quantitative measurement of the intracellular pH of whole cells." *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 51(26), 6432-6435. (2012).

Siimon, K., Siimon, H., & Järvekülg, M. "Mechanical characterization of electrospun gelatin scaffolds cross-linked by glucose." *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 26(1), 37. (2015).

Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Dalla Rosa, M.. "Biodegradable polymers for food packaging: A review." *Trends in food science & technology*, 19(12), 634-643. (2008)

Sivan, M., Madheswaran, D., Valtera, J., Kostakova, E. K., & Lukas, D. "Alternating current electrospinning: The impacts of various high-voltage signal shapes and frequencies on the spinnability and productivity of polycaprolactone nanofibers." *Materials & Design*, 213, 110308. (2022).

Song, H., Cong, Z., Wang, C., He, M., Liu, C., & Gao, P. "Research progress on Walnut oil: Bioactive compounds, health benefits, extraction methods, and medicinal uses." *Journal of Food Biochemistry*, 46(12). (2022).

Söbeli, C., Uyarcın, M., Kayaardı, S., & Bayar, M. C. "Biyobozunur ambalaj materyallerinin gıda endüstrisinde kullanımı." *Plastik & Ambalaj Teknolojisi*, 57-63. (2019).

Sul, Y., Ezati, P., & Rhim, J.-W. "Preparation of chitosan/gelatin-based functional films integrated with carbon dots from banana peel for active packaging application." *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125600. (2023).

Sun, D., Ban, R., Zhang, P.-H., Wu, G.-H., Zhang, J.-R., & Zhu, J.-J. "Hair fiber as a precursor for synthesizing of sulfur-and nitrogen-co-doped carbon dots with tunable luminescence properties." *Carbon*, 64, 424-434. (2013).

Sun, Y.-P., Zhou, B., Lin, Y., Wang, W., Fernando, K. A. S., Pathak, P., Mezziani, M. J., Harruff, B. A., Wang, X., Wang, H., Luo, P. G., Yang, H., Kose, M. E., Chen, B., Veca, L. M., & Xie, S.-Y. "Quantum-Sized Carbon Dots for Bright and Colorful Photoluminescence." *Journal of the American Chemical Society*, 128(24), 7756-7757. (2006).

Sunar, B. S., & Haşçıçek, C. "Elektroeğrilmiş nanoliflerin ilaç taşıyıcı sistem olarak ve doku mühendisliğinde kullanımı." *Marmara Pharmaceutical Journal*, 21(3), 425-435. (2017).

Gündüz, G. Ş. "Çözelti Konsantrasyonu ile Nanolif Çapı Arasındaki İlişki." *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 775-786. (2023).

Teodorescu, M., Bercea, M., & Morariu, S.. "Biomaterials of PVA and PVP in medical and pharmaceutical applications: Perspectives and challenges." *Biotechnology advances*, 37(1), 109-131. (2019)

Tipper, M., & Guillemois, E. "Developments in the use of nanofibres in nonwovens." *Advances In Technical Nonwovens* (ss. 115-132). (2016).

Tuerhong, M., Yang, X. U., & Xue-Bo, Y. I. N. "Review on carbon dots and their applications." *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 45(1), 139-150. (2017).

Türkoğlu, G. C., Khomarloo, N., Mohsenzadeh, E., Gospodinova, D. N., Neznakomova, M., & Salaün, F. "PVA-Based Electrospun Materials—A Promising Route to Designing Nanofiber Mats with Desired Morphological Shape—A Review." *International Journal of Molecular Sciences*, 25(3), 1668. (2024).

Wang, K., Gao, Z., Gao, G., Wo, Y., Wang, Y., Shen, G., & Cui, D. "Systematic safety evaluation on photoluminescent carbon dots." *Nanoscale Research Letters*, 8(1), 122. (2013).

Wang, Y., & Hu, A. "Carbon quantum dots: Synthesis, properties and applications." *Journal of Materials Chemistry C*, 2(34), 6921-6939. (2014).

Xie, S., Su, H., Wei, W., Li, M., Tong, Y., & Mao, Z. "Remarkable photoelectrochemical performance of carbon dots sensitized TiO₂ under visible light irradiation." *Journal of Materials Chemistry A*, 2(39), 16365-16368. (2014).

Xu, Y., Wu, M., Liu, Y., Feng, X., Yin, X., He, X., & Zhang, Y. "Nitrogen-Doped Carbon Dots: A Facile and General Preparation Method, Photoluminescence Investigation, and Imaging Applications." *Chemistry – A European Journal*, 19(7), 2276-2283. (2013).

Yıldız, A., Demir, C., Bayramol, D. V., & Ağırhan, A. Ö. "Fe₃O₄@ HA@ Ag nanokompozitlerin hazırlanması, PVP ile nanolif üretimi ve karakterizasyonu." *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(7), 794-799. (2021).

Yılmaz Öztürk, B., Yenice Gürsu, B., & Dağ, İ. "Deniz kırmızı alglerinden Gelidium corneum kullanılarak yeşil sentezlenmiş gümüş nanopartiküllerinin antibiyofilm ve antimikrobiyal aktiviteleri." *Process Biochemistry*, 89, 208-219. (2020).

Yoruç, A. B. H., & Uğraşkan, V. "Yeşil Polimerler ve Uygulamaları." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(1), 318-337. (2017).

Yurtaydın, E. "Nanoliflerin filtrasyon uygulamaları..." *Google Akademik*. (2022).

Zare-Akbari, Z., Farhadnejad, H., Furughi-Nia, B., Abedin, S., Yadollahi, M., & Khorsand-Ghayeni, M. " PH-sensitive bionanocomposite hydrogel beads based on carboxymethyl cellulose/ZnO nanoparticle as drug carrier." *International journal of biological macromolecules*, 93, 1317-1327. (2016).

Zhang, H., Zhen, Q., Liu, Y., Liu, R., & Zhang, Y. "One-step melt blowing process for PP/PEG micro-nanofiber filters with branch networks." *Results in Physics*, 12, 1421-1428. (2019).

Zhang, X., Zhang, Y., Wang, Y., Kalytchuk, S., Kershaw, S. V., Wang, Y., Wang, P., Zhang, T., Zhao, Y., Zhang, H., Cui, T., Wang, Y., Zhao, J., Yu, W. W., & Rogach, A. L. "Color-Switchable Electroluminescence of Carbon Dot Light-Emitting Diodes." *ACS Nano*, 7(12), 11234-11241. (2013).

Zhao, L., Duan, G., Zhang, G., Yang, H., He, S., & Jiang, S. "Electrospun functional materials toward food packaging applications: A review." *Nanomaterials*, 10(1), 150. (2020).

Zhao, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Wang, H. "Application of carbon dots in food preservation: A critical review for packaging enhancers and food preservatives." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(24), 6738-6756. (2023).

Zhou, J., Yang, Y., & Zhang, C. "A low-temperature solid-phase method to synthesize highly fluorescent carbon nitride dots with tunable emission." *Chemical communications*, 49(77), 8605-8607. (2013).

Zhu, A., Qu, Q., Shao, X., Kong, B., & Tian, Y. "Carbon-dot-based dual-emission nanohybrid produces a ratiometric fluorescent sensor for in vivo imaging of cellular copper ions." *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 51(29), 7185-7189. (2012).

Zhu, H., Wang, X., Li, Y., Wang, Z., Yang, F., & Yang, X. "Microwave synthesis of fluorescent carbon nanoparticles with electrochemiluminescence properties." *Chemical Communications*, 34, 5118-5120. (2009).

Zhu, S., Meng, Q., Wang, L., Zhang, J., Song, Y., Jin, H., Zhang, K., Sun, H., Wang, H., & Yang, B. "Highly photoluminescent carbon dots for multicolor patterning, sensors, and bioimaging." *Angewandte Chemie International Edition*, 52(14). (2013).

Zhu, S., Song, Y., Zhao, X., Shao, J., Zhang, J., & Yang, B. "The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): Current state and future perspective." *Nano Research*, 8(2), 355-381. (2015).

Zhu, Y., Ji, X., Pan, C., Sun, Q., Song, W., Fang, L., Chen, Q., & Banks, C. E. "A carbon quantum dot decorated RuO₂ network: Outstanding supercapacitances under ultrafast charge and discharge." *Energy & Environmental Science*, 6(12), 3665-3675. (2013).

ÖZGEÇMİŞ

Özge ATAY Lisans eğitimine 2014 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tıp Mühendisliği Bölümü’nde başladı ve 2019 yılında tamamladı. Yüksek Lisans eğitimine 2021 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladı ve 2025 yılında “Akilli Ambalaj Olarak Kullanılmak Üzere Elektro Üfleme Yöntemi İle Nanoliflerin Üretimi ve Karakterizasyonu” adlı tezini savunarak tamamladı.