

**ELEKTRO ÇEKİM (ELEKTROSPİNNİNG)
YÖNTEMİ İLE KARBON SİYAHİ KATKILI
İLETKEN VE SAYDAM NANOLİFLİ YÜZEY
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Şaban ÇUNAYEV



T.C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRO ÇEKİM (ELEKTROSPİNNİNG) YÖNTEMİ İLE KARBON SİYAHİ
KATKILI İLETKEN VE SAYDAM NANOLIFLİ YÜZEY ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Şaban ÇUNAYEV

Orcid No: 0000-0002-6570-0951

Dr. Öğr. Üyesi Şebnem Düzyer Gebizli

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2021

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

09/09/2021

İmza

Şaban ÇUNAYEV

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRO ÇEKİM (ELEKTROSPİNNİNG) YÖNTEMİ İLE KARBON SİYAHİ KATKILI İLETKEN VE SAYDAM NANOLIFLI YÜZEY ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Şaban ÇUNAYEV

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şebnem Düzyer Gebizli

Bu tez çalışmasında iletken ve saydam nanolifli yüzeyler elektro çekim prosesi ile üretilmiştir. İletken yüzey eldesi için iletken olmayan polimer çözeltilerine iletken karbon siyahı katkısı yapılmıştır. Saydam yüzeyler elde edebilmek için ise karbon siyahı katkılı polimer çözeltilerinden nanolif üretimi cam lamalar üzerine 1-10 dakika arasında değişen sürelerde gerçekleştirilmiştir. Kolay üretilebilirliği ve bulunabilirliği nedeniyle iletken olmayan taşıyıcı polimer olarak poliakrilonitril (PAN) ve polikaprolakton (PCL) seçilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında iletken madde katkısı olmadan PAN ve PCL nanoliflerin üretimi gerçekleştirilmiş ve optimum polimer konsantrasyonu ile optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra polimer çözeltilerine karbon siyahı katkısı yapılarak optimum katkı oranı belirlenmiş ve üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretimler sonrası nanoliflerin yüzey, elektriksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu yapılmıştır. Nanolifli numunelerin yüzey karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektriksel karakterizasyonu dört-nokta cihazı ile ve optik karakterizasyonu ise Ultraviyole ve görünür ışık (UV-Vis) spektrofotometresi ile yapılmıştır. Depozisyon süresi arttıkça elektriksel direncin ve saydamlığın azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İletken nanolifler, elektro çekim, poliakrilonitril, polikaprolakton, karbon siyahı

2021, x + 89 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CARBON BLACK ADDED CONDUCTIVE AND TRANSPARENT NANOFIBERS BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE

Shaban CHUNAYEV

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Textile Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Şebnem Düzyer Gebizli

In this thesis, conductive and transparent nanofibrous mats were produced by the electrospinning process. Conductive carbon black was added to non-conductive polymer solutions to obtain conductive surfaces. In order to obtain transparent surfaces, nanofiber production from carbon black added polymer solutions was carried out on glass slides for a period of 1-10 minutes. Polyacrylonitrile (PAN) and polycaprolactone (PCL) were chosen as non-conductive carrier polymers due to their easy production and availability. In the first stage of the study, PAN and PCL nanofibers were produced without the addition of conductive material and optimum production parameters were determined with the optimum polymer concentration. Then, the optimum additive ratio was determined by adding carbon black to the polymer solutions and electrospinning was performed. Surface, electrical, optical and optoelectronic characterization of the nanofibers were performed after production. Surface characterization of nanofibers was conducted by a scanning electron microscope (SEM), electrical characterization was performed by a four probe device and optical characterization was carried out by an ultraviolet-visible (UV-vis) spectrophotometer. It was observed that as the deposition time increased, the electrical resistance and transparency decreased.

Keywords: Conductive nanofibers, electrospinning, polyacrylonitrile, polycaprolactone, carbon black

2021, x + 89 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesiyle beni aydınlatan yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Şebnem Düzyer Gebizli'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan Bursa Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği öğretim üyesi Doç. Dr. Serpil Koral Koç'a, laboratuvarlarında çalışma imkânı sunan Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ahmet Peksöz'e ve geçirgenlik ölçümlerinde yardımcı olan Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü doktora öğrencisi Seyit Rıza Tokgöz'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansıma başlamama öncü olan, gölgesini her zaman üzerimde hissettiğim, hakkımı bir ömür ödeyemeyeceğim canım aileme ve sevgili arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasındaki malzemelerin ve deneysel çalışmaların bir kısmı TÜBİTAK 118M670 no.lu proje ile desteklenmiştir.

Şaban ÇUNAYEV

09/09/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. İletkenlik kavramı (direnç, öz direnç, yüzeysel iletkenlik, hacimsel iletkenlik).....	3
2.2. Saydamlık (geçirgenlik) kavramı.....	6
2.3. Nanolif tanımı ve nanolif üretim yöntemleri.....	11
2.4. Elektro çekim ile nanolif üretimi.....	15
2.4.1. Elektro çekim yöntemi ile lif oluşumu.....	16
2.4.2. Elektro çekim prosesine etki eden parametreler.....	19
2.5. Elektro çekim ile iletken nanolif üretimi.....	31
2.6. Elektro çekim ile iletken katkılı nanolif üretimi.....	34
2.7. İletken katkı maddeli nanolif üretiminde kullanılan malzemeler.....	37
2.7.1. İletken olmayan polimerler.....	37
2.7.2. İletken katkı maddesi.....	41
2.8. İletken nanolif uygulamaları.....	44
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50
3.1. Materyal.....	50
3.2. Yöntem.....	50
3.2.1. Katkılı ve katkısız elektro çekim çözeltilerinin hazırlanması.....	51
3.2.2. Elektro çekim ile nanolifli yüzeylerin üretilmesi.....	53
3.2.3. Nanolifli yüzeylerin karakterizasyonu.....	55
3.2.4. Karbon siyahı katkılı iletken nanolifli yüzeylerin optoelektronik özelliklerinin belirlenmesi.....	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	58
4.1. PAN nanoliflerin karakterizasyonu sonuçları.....	58
4.1.1. Katkısız PAN nanoliflerin yüzey karakterizasyonu sonuçları.....	58
4.1.2. Karbon siyahı katkılı PAN nanoliflerin yüzey karakterizasyonu sonuçları.....	60
4.1.3. Karbon siyahı katkılı PAN nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu sonuçları.....	61
4.2. PCL nanoliflerin karakterizasyonu sonuçları.....	64
4.2.1. Katkısız PCL nanoliflerin yüzey karakterizasyonu sonuçları.....	64
4.2.2. PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) katkılı numunelerin yüzey karakterizasyon sonuçları.....	66
4.2.3. PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) katkılı nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu sonuçları.....	67
4.2.4. PCL/karbon siyahı (DMF:DCM) katkılı numunelerin yüzey karakterizasyon sonuçları.....	70
4.2.5. PCL/karbon siyahı (DMF:DCM) katkılı nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu sonuçları.....	71

5. SONUÇ.....	75
KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	89

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
~	Yaklaşık
Ag	Gümüş
AgNO ₃	Gümüş Nitrat
c	Işığın boşlukta yayılma hızı
cm	Santimetre
cP	Viskozite
dk	Dakika
e	Logaritmik sabit
e ⁻	Elektron
g	Gram
I	Akım
I	Yansıyan ışığın şiddeti
I ₀	Malzemenin yüzeyine gelen ışığın şiddeti
km	Kilometre
kV	Kilovolt
L	İletkenin uzunluğu
m	Metre
m ²	Metre kare
ml	Mililitre
mm	Milimetre
Mn	Molekül ağırlığı
n	Kırılma indisi
NaBH ₄	Sodyumborhidrür
nm	Nanometre
°	Derece
°C	Santigrat derece
pH	Hidrojen gücü
R	Direnç
R	Yansıma oranı
R _s	Levha direnci
S	İletkenin kesiti
s	Saniye
t	Film kalınlığı
T	Geçirgenlik
v	Işığın malzeme içinde yayılma hızı
V	Potansiyel (Volt)
V _c	Kritik voltaj değeri
x	Işığın geçtiği ortamın kalınlığı
α	Işığı soğurma katsayısı
ρ	İletkenin özdirenci
σ	Sigma
Φ _{TC}	Figure of merit
Ω	Ohm

Kısaltmalar Açıklama

CA	Selüloz asetat
CoCl ₂	Kobalt klorür
CS	Kitosan
DCM	Diklorometan
DMF	N,N-Dimetilformamid
GaInP	Galyum İndiyum fosfit
GO	Grafen oksit
H ₂ S	Hidrojen sülfür
HA	Hyaluronik asit
PAN	Poliakrilonitril
PANi	Polianilin
PCL	Polikaprolakton
PDMS	Polidimetilsiloksan
PEO	Polietilen oksit
PGS	Poli(gliserol sebakat)
PPy	Polipirol
PVA	Polivinil alkol
PVDF	Polivinil florür
PVP	Polivinil pirolidon
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TiO ₂	Titanyumdioksit
UV-vis	Ultraviyole ve görünür ışık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Elektronların hareketi.....	3
Şekil 2.2. a) Gümüş ve b) Alüminyum atom modeli.....	4
Şekil 2.3. Işık spektrumu.....	8
Şekil 2.4. Bazı lif çaplarının görsel kıyaslanması.....	12
Şekil 2.5. Saç teli, polen sporu ve nanolif kıyaslanması.....	12
Şekil 2.6. Nanolif uygulama alanları.....	13
Şekil 2.7. Elektro çekim metodu ile nanolif üretimi.....	15
Şekil 2.8. Elektro çekim işlemi esnasında jet oluşumu.....	17
Şekil 2.9. Elektro çekim esnasında polimer jetinin izlediği yol.....	18
Şekil 2.10. Elektro çekim yöntemi ile üretilen nanolifler	19
Şekil 2.11. Viskozite ile nanolif yapısının değişimi	22
Şekil 2.12. Viskozitenin elektro çekim çözeltisindeki polimer moleküllerine etisi.....	23
Şekil 2.13. Farklı çözücülerde çözünmüş PCL nanoliflerinin SEM görüntüleri	25
Şekil 2.14. Yüksek gözenekli nanolifler.....	26
Şekil 2.15. Jet konisinin artan voltajla değişimi.....	27
Şekil 2.16. Electrospinningde kullanılan bazı toplayıcı tipleri.....	29
Şekil 2.17. Elektro çekimle iletken nanolif üretim yöntemleri.....	32
Şekil 2.18. Nanoyüzeyin kaplanması.....	34
Şekil 2.19. Poliakrilonitril polimerinin polimerizasyonu.....	38
Şekil 2.20. Polikaprolakton halka açılımı.....	40
Şekil 2.21. Karbon siyahı.....	41
Şekil 2.22. Gerilme sensörü.....	46
Şekil 2.23. Basınç sensörü.....	48
Şekil 2.24. Güneş pili.....	49
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan elektro çekim düzeneği.....	53
Şekil 3.2. Tez kapsamında farklı depozyon sürelerinde üretimi yapılan karbon siyahı katkılı iletken nanoliflerin üretim şeması.....	55
Şekil 3.3. Dört-nokta prob sistemi a) cihazın genel görünümü, b) numune standı.....	56
Şekil 4.1. Ağırlıkça a) %6, b) %7, c) %8, d) %10 PAN içeren çözeltilerden elde edilen nanoliflerin SEM görüntüleri.....	59
Şekil 4.2. a) PAN / Karbon Siyahı çözeltisi, b) PAN / Karbon Siyahı nanoliflerin SEM görüntüsü, c) PAN / Karbon Siyahı nanolifler üzerindeki kalıntıların SEM görüntüsü.....	61
Şekil 4.3. PAN / Karbon Siyahı katkılı yüzeylerin görsel değerlendirmesi.....	62
Şekil 4.4. PAN / karbon siyahı katkılı yüzeylerin optik saydamlık grafiği.....	62
Şekil 4.5. Farklı depozyon sürelerinde üretilen PAN/karbon siyahı nanolifli yüzeylerin Φ_{TC} değerleri.....	64
Şekil 4.6. Katkısız (a) PCL / Kloroform, (b) PCL / DMF : DCM nanoliflerin SEM görüntüleri.....	65
Şekil 4.7. PCL / karbon siyahı (%1) (kloroform : DCM) katkılı nanoliflerin SEM görüntüsü.....	66
Şekil 4.8. PCL / karbon siyahı (kloroform : DCM) katkılı yüzeylerin görsel değerlendirmesi.....	67
Şekil 4.9. PCL / karbon siyahı (%1) (kloroform : DCM) katkılı yüzeylerin optik saydamlık grafiği.....	68

Şekil 4.10. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL / karbon siyahı (%1) (kloroform:DCM) nanolifli yüzeylerin Φ_{TC} değerleri.....	70
Şekil 4.11. PCL / karbon siyahı (DMF : DCM) katkıli nanoliflerin SEM görüntüsü.....	71
Şekil 4.12. PCL / karbon siyahı (DMF : DCM) katkıli yüzeylerin görsel değerlendirilmesi.....	72
Şekil 4.13. PCL / karbon siyahı (%1) (DMF : DCM) katkıli yüzeylerin optik saydamlık grafiği.....	72
Şekil 4.14. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL / karbon siyahı (DMF : DCM) nanolifli yüzeylerin Φ_{TC} değerleri.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Nanolif üretim teknikleri.....	14
Çizelge 2.2. Elektro çekim prosesine etki eden parametreler.....	20
Çizelge 3.1. Tez çalışmasında hazırlanan bütün polimer/çözücü sistemleri.....	51
Çizelge 3.2. Proje kapsamında hazırlanan çözeltilerin elektrospinnig parametreleri....	54
Çizelge 4.1. Katkısız PAN nanoliflerin çap değerleri ve dağılımları.....	60
Çizelge 4.2. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PAN / karbon siyahı nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik özellikleri.....	63
Çizelge 4.3. Katkısız PCL nanoliflerin çap değerleri ve dağılımları.....	65
Çizelge 4.4. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL / karbon siyahı (%1) (kloroform:DCM) katkıli nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik özellikleri.....	69
Çizelge 4.5. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL / karbon siyahı (%1) (DMF:DCM) katkıli nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik özellikleri.....	73

1. GİRİŞ

Elektro çekim (elektrospinning) yöntemi, bir polimeri uygun çözücüde çözerek polimer çözeltisini veya eriğini yüksek potansiyel alana tabi tutarak nano seviyelerde liflerin üretilmesine olanak sağlayan bir prosestir. Elektro çekim işlemi, elektrik yükleri metalik iğne yoluyla polimer çözeltisine geçtiğinde başlar. Polimer damlacık üzerindeki yüklerin indüklenmesi polimer çözeltisi içinde kararsızlığa neden olur. Aynı zamanda, yüklerin karşılıklı itilmesi ile yüzey gerilimine karşı gelen bir kuvvet ortaya çıkar ve polimer çözeltisinin elektrik alanı yönünde hareket etmesini sağlar (Evcin, Bezir ve Ersoy, 2019). Bu yöntem çözünebilen veya eriyebilen bütün polimerlere, polimer karışımlarına, metal ve seramiklere uygulanabilir. Literatürde poliakrilonitril (PAN), polikaprolakton (PCL), rayon, polietilen oksit (PEO), polivinil alkol (PVA), kevlar, polistren, selüloz asetat, kolajen, kitin, kitosan, poliamid 6, poliimidler gibi pek çok polimerden elektro çekim yöntemi kullanılarak nanolif üretilbildiği belirtilmiştir.

PAN nanolifleri, PAN polimeri uygun çözücülerde çözündürerek elektro çekim yöntemiyle üretilir. Literatürde elektro çekimle PAN nanoliflerinin üretimi ve uygulamaları üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur. PAN nanolifler kendi başına kullanılmakla birlikte, kompozit yapılar içerisinde takviye malzemesi, enerji depolamak için kullanılan iyon pillerinin içerisinde anot tabakası olarak ve kendisine karşı inert olan kimyasal ortamlarda ise filtrasyon amacıyla kullanılmaktadırlar. PAN nanoliflerinin içerisine çeşitli nanopartiküller katılarak farklı özelliklerde nanolifler üretilmektedir (Dincer ve Köse, 2019).

PCL, biyolojik olarak parçalanabilir bir poliesterdir ve halka açılımı ile üretilmektedir. PCL biyobozunurluk, biyouyumluluk ve geçirgenlik gibi birçok önemli özelliğinden dolayı paketleme ve biyomedikal uygulamaları başta olmakla birçok alanda kullanılmaktadır (Labet ve Thielemans, 2009). PCL, implantlarda ve kontrollü ilaç salım uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalsiyum fosfat bazlı seramikler ve biyoaktif camlar gibi malzemelerin katkısıyla PCL'in mekanik özelliklerinin iyileşmesi

sağlanmaktadır. Böylece, bu malzeme kemik dokusu mühendisliği gibi uygulamalar için uygun aday haline gelmektedir.

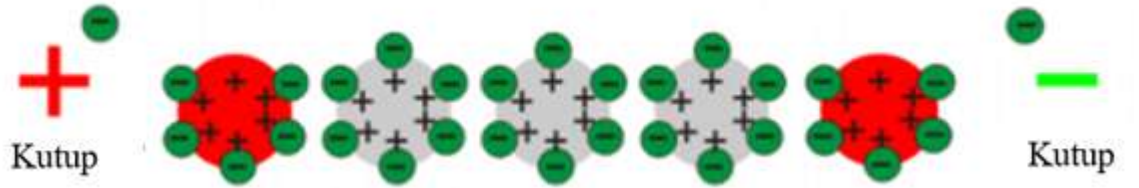
İletken olmayan polimerlerden nanolifler üretmek için polimer çözeltilerine elektro çekim öncesi iletken katkı maddeleri katılmaktadır. Bu çalışmada iletken katkı maddesi olarak karbon siyahı kullanılmıştır. Karbon siyahı plastik, elektronik, mürekkepler ve kaplamalar gibi sektörlerde kullanım alanı bulur.

Bu çalışmada elektro çekim yöntemi ile üretilmiş iletken katkı maddeli PAN ve PCL nanoliflerin iletkenlik ve saydamlık özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın ilk adımı olarak elektro çekim yöntemi ile içeriğinde ağırlıkça farklı oranlarda PAN ve PCL polimeri ve uygun miktarlarda katkı maddeleri içeren nanolifli yüzeyler üretilmiştir. Daha sonra bu nanolifli yüzeylerin yüzey, elektrik ve optik analizleri yapılmıştır. Nanoliflerin yüzey karakteristiklerini belirlemek için SEM ve kamera, elektriksel karakterizasyon için, dört nokta cihazı ve optik karakterizasyon için ise Uv-vis spektrofotometresi kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Tezin kuramsal temeller ve kaynak araştırması bölümünde; iletkenlik, saydamlık, nanoliflerin tanımı, nanolif üretim yöntemleri ve günümüzde nanolif üretim yöntemi olarak kullanımı oldukça yaygınlaşan elektro çekim yöntemi, düzeneği, yöntemine etki eden parametreler, nanoliflerin kullanım alanları ve bu çalışmada hammadde olarak kullanılan PAN ve PCL polimerlerinin, karbon siyahı katkı maddesinin özelliklerinden bahsedilmiştir. Çalışmanın materyal ve yöntem bölümünde; kullanılan malzemeler, cihazlar ve metotlar belirtilmiştir. Tezin son bölümünde ise bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiş ve bu sonuçların yorumları yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. İletkenlik kavramı (iletkenlik, direnç, özdirenç, yüzey direnci)

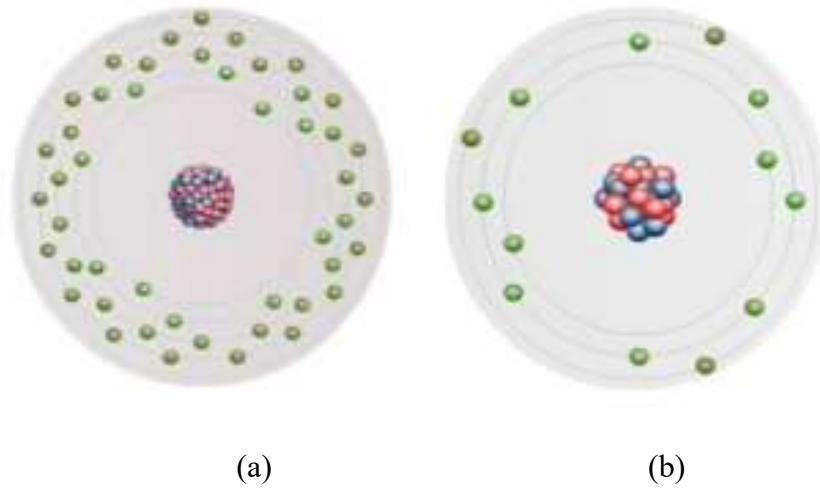
İletkenlik, elektrik enerjisinin bir noktadan başka bir noktaya geçişini, hareketini anlatan bir terimdir. Malzemelerin iletkenliği hakkında bilgi edinmek için onların mikroskopik yapılarına bakmak gerekir. İletken malzemelerde, elektronların yapı içerisinde birbirilerini uyarmaları ve bir akım oluşturacak şekilde hareket etmeleri iletkenliği oluşturur. Anlatılan bu etkileşim malzeme içerisinde yüklerin, yani gerilim ile uyarılmış elektronların hareket etmesiyle gerçekleşir. İletkenlik için elektronların uzun mesafelere hareket etmesine gerek duyulmaz, bu akım her atomdaki uyarılmış elektronun bir sonraki atom veya moleküle geçişiyle malzemenin bir ucundan diğer ucuna anında ulaşmış olur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Elektronların hareketi (Anonim, 2021)

İletkenlik, tüm maddeler için aynı değildir ve molekül yapısına bağlı olarak bazı farklılıklar göstermektedir. Bu farklılık taşıyıcı yükler üzerinden açıklanacak olursa katı maddelerde iletkenlik serbest elektronlar ile, sıvı ve gazlarda ise iyonlar üzerinden gerçekleşir. Bir maddenin iletken olması için en önemli faktör maddelerin atomik yapılarıdır. Atomlardan elektronun kopması ve komşu atoma doğru domino etkisiyle hareketi sonucunda akımın gerçekleşmesi için atomlarının son yörüngelerinde üç ya da daha az elektronun olması gerekmektedir (Anonim, 2021).

En iyi iletkenler olarak bilinen metallerin yapıları incelendiğinde atomlarının son yörüngelerinde serbest elektronların olduğu görülmektedir. Metallerin çoğunda iletkenliğin bu elektronlar üzerinden gerçekleşmesi bu maddelerin doğal iletkenler olarak adlandırılmasına neden olmuştur. Metallerin son yörüngedeki elektron sayıları azaldıkça elektrik iletkenlikleri artmaktadır. Şekil 2.2’de atom modeli verilen gümüş, alüminyumdan daha iyi iletkenidir.



Şekil 2.2. a) Gümüş ve b) alüminyum atom modeli (Anonim, 2017a)

Metallerin yanı sıra iyi iletkenlik gösteren sıvı çözeltiler de vardır. Bu tür çözeltilere elektrolit denir. İletkenlik tek başına elektronlarla değil, aynı zamanda yüklü olan parçacıklar üzerinden de gerçekleşir. Sıvıların iyi iletkenlik göstermeleri için bazen çok az miktarda katkı maddesine ihtiyaç duyulur. Buna örnek olarak suyu gösterecek olursak saf su hiçbir iletkenlik göstermediği halde, çok az oranda tuz ve minerallerin katkısıyla suyu iyi bir iletken sıvı haline getirmek mümkündür. Metaller gibi doğal iletken olmayan sıvı ve gazları iletken hale getirmek için bazı işlemlerin yapılması gerekmektedir (Anonim, 2016a).

Elektrik iletkenliğini aslında basit şekilde anlatılacak olursa, iletkenlik öz direncin tersidir denebilir ve malzemenin elektriği iletme kabiliyetini tanımlar. Direnç ise elektrik akımını zorlaştıran faktördür (Tezcan, 2017). Elektrik iletimi için kullanılan tüm malzemeler belli bir dirence sahip olurlar, yani direnç varsa elektrik akımı da vardır. Direnç değerleri malzemenin yapısına, maddesel özelliklerine ve ortam koşullarına göre farklılık gösterir. Malzemelerin maddesel özelliklerinin etkisiyle, elektrik akımına gösterdikleri farklı direnç değerleri, öz direnç olarak adlandırılır. 1827 yılında Alman fizikçi George Simon Ohm elektronik devrelerde akım, gerilim ve direnç arasındaki bağlantıyı hesaplamak için yeni bir terim ortaya atmıştır. Dirençlerin hesaplanması için çok önemli olan bu terim Ohm yasası olarak adlandırılmıştır ve direnç birimi de Ohm olarak ifade edilmiştir. Elektriğin temel yasalarından biri olan Ohm yasasına (Formül 2.1) göre bir elektronik devrede iki nokta arasındaki iletkenin geçen akım (I), bu devredeki potansiyel fark (V) ile doğru orantılıyken sahip olduğu direnç (R) ile ise ters orantılıdır (Anonim, 2012).

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

Öz direnç ve levha direnci, elektronik endüstrisinde kullanılan çeşitli malzemelerin temel elektrik parametreleridir. Direnç, metaller veya yarı iletkenler gibi tek tip malzemelerin elektriksel özelliklerini karakterize etmek için kullanılırken, levha direnci ise ince filmlerin elektriksel özelliklerini karakterize etmek için kullanılır. İletkenlerin direnci Formül 2.2 ile hesaplanır.

$$R = \frac{L}{S} \rho \quad (2.2)$$

Bu formülde, R: İletkenin direnci (Ω), L: İletkenin uzunluğu (m), ρ : İletkenin öz direnci ($\Omega.m$), S: İletkenin kesitidir (m^2).

Levha direnci (R_s) (yüzey direnci olarak da bilinir), iletken ve yarı iletken malzemelerin ince filmlerini karakterize etmek için kullanılan yaygın bir elektriksel özelliktir. İnce bir kare malzeme boyunca yanal direncin, yani bir karenin karşılıklı kenarları arasındaki direncin bir ölçüsüdür. Levha direncinin diğer direnç ölçümlerine göre en önemli avantajı, karenin boyutundan bağımsız olmasıdır - farklı numuneler arasında kolay bir karşılaştırma yapılmasını sağlar. Levha direnci, direnç ve film kalınlığı arasındaki oran olarak da tanımlanabilir. Levha direnci için ölçüm yöntemleri temaslı ve temassız olmak üzere iki yere ayrılır. Dört nokta (four probe) yöntemi, yaygın olarak kullanılan temaslı yöntemlerden biridir. Girdap akımı gibi elektromanyetik yöntem temassız yöntemdir (Krupka, 2017).

Levha direnci (R_s), genel olarak öz direncin (ρ), film kalınlığına (t) olan oranıyla ölçülür (Formül 2.3) ve birimi ohm'dur (Ω).

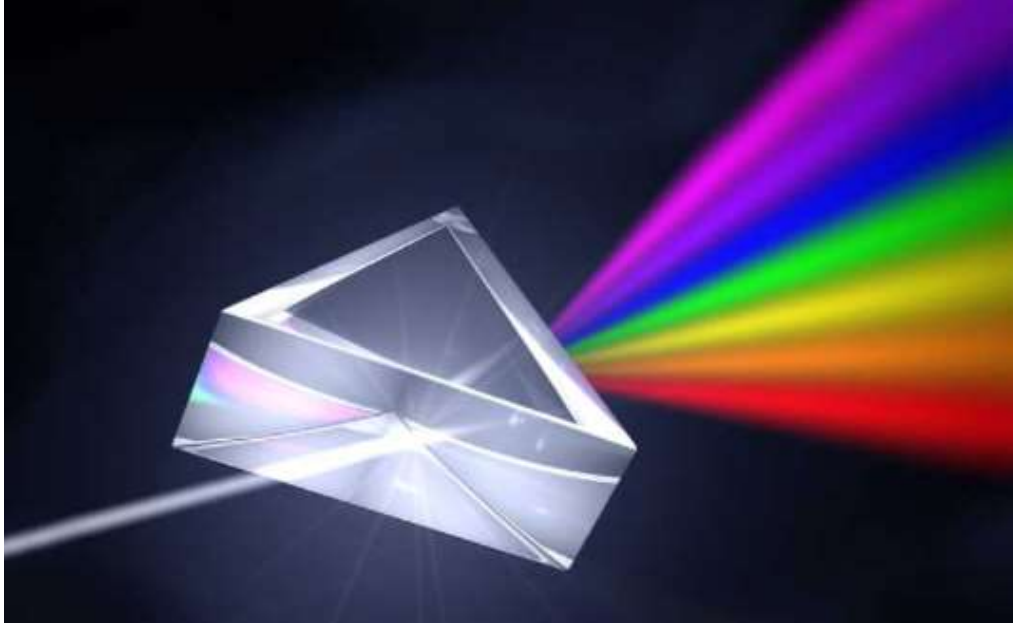
$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (2.3)$$

2.2. Saydamlık (geçirgenlik) kavramı

Işık bir enerji türüdür ve uzayda elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılmaktadır. Işıkla ilgili ilk teori Hugens tarafından 1690 yılında ortaya konulmuş ve daha sonra sırasıyla Newton (1700), Young (1794), Maxwell (1865) ve Einstein (1900) tarafından sürekli üzerinde çalışmalar yapılmış ve yeni teoriler ortaya konmuştur. Bu çalışmalar sonucunda ışıkla ilgili temel iki teori ortaya çıkmıştır. Bazılarına göre ışık elektromanyetik dalgalar

şeklinde, bazılarına göre ise tanecik (kuantum) şeklinde hareket etmektedir. Aslında bu iki teorinin de ışığın hareketine uygun olduğunu ve ışığın aynı anda hem dalgadan hem de parçacıktan oluştuğunu 1924 yılında De Broglie ‘dualite’ teorisiyle anlatmıştır. De Broglie ışık taneciklerini foton olarak adlandırmış, ışığın bir enerji olduğunu ve uzayda fotonlar halinde yayılan elektromanyetik dalgalardan oluştuğunu ifade etmiştir. Işığın boşluktaki hızı yaklaşık 300.000 km/s'dir ve şimdilik bundan daha büyük bir hız görülmemiştir (Varol ve Yağimli 2008). Elektromanyetik dalgalar, elektrik ve manyetik alandan oluşur ve bu iki alan birbirine dik şekildedir. Işığı oluşturan dalgalar frekanslarına göre birbirinden farklılık gösterirler. Çok sayıda farklı boylardaki dalga uzunluğuna sahip olan ışığın tamamını insan gözüyle görmek mümkün değildir. Bu yüzden insan gözü ile görülebilen ışığın dalga boyu 400 nm ile 700 nm arasında değişmektedir ve bu ışık türü ‘‘görünür ışık’’ olarak adlandırılmıştır. Görünür ışık, elektromanyetik tayfta, kızılötesi ile morötesi arasındadır ve dalga boyu kızılötesinden kısa, morötesinden uzundur (Ocak, 2015).

Bildiğimiz ışık hızı, ışığın hava ve uzay boşluğundaki hızıdır, fakat ışık bir maddeyle temas ettiğinde ışığın madde içindeki yayılma hızı değişkenlikler göstermeye başlar. Işık hızındaki bu değişiklikler, maddenin kırıcılık indisiiyle alakalıdır. Işığın renklerine ayrılması ilk kez Isaac Newton (1643-1727) tarafından ünlü prizma deneyiyle gerçekleştirilmiştir. Isaac Newton, ışığı prizmadan geçirdiğinde, prizma ışığı kırarak beyaz ışığın her bir rengine ayrılmasını sağlamıştır. Işığın kırılması sonucunda oluşan renkler sırasıyla kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi, çivit mavisi ve mor olarak sıralanmıştır (Şekil 2.3). Bunların tamamı görünür ışıktır. Bu renklerin farklılığının nedeni ise kendilerine has dalga boyuna sahip olmalarıdır (Siliney, 2016).



Şekil 2.3. Işık spektrumu (Anonim, 2017b)

Bir malzemeye çarpan elektromanyetik dalgalar (gelen dalga) malzeme tarafından üç farklı şekilde karşılanır. Bunlar malzemenin yapısı ve içeriği ile alakalı olarak yansıma, kırılma ve soğurma olarak ifade edilir.

Yansıma: Işığın malzemelerin yüzeyine temas ettikten sonra kısmen soğurularak veya tamamıyla geriye doğru yayılmasıdır. Yansıma “R” ile gösterilir ve malzemedeki yansıyan ışığın şiddetinin (I) malzemenin yüzeyine gelen ışığın şiddetine (I_0) oranı ile hesaplanır (Formül 2.4).

$$R = I/I_0 \quad (2.4)$$

Yansıma oranı (R), kırılma indisi (n) ile doğru orantılıdır ve kırılma indisinin artmasıyla beraber yansıma oranı da artmaktadır (Formül 2.5) (Anonim, 2021).

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (2.5)$$

Kırılma: Saydam malzemelerde görülür. Bu durumda malzemenin yüzeyine çarpan dalgaların yalnızca bir kısmı yansır ve kalanı kırılarak malzeme içinde ilerler. Kırılma sonucunda gelen dalgaların hızlarında farklılıklar görülür. Bu farklılıklar kırılma indisi (n) olarak adlandırılır. Kırılma indisi (n), ışığın boşlukta yayılma hızının (c), malzeme içinde yayılma hızına (v) oranıyla hesaplanır (Formül 2.6) (Varol ve Yağimli, 2008).

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.6)$$

Soğurma: Işık dalgalarının malzeme içinden geçerken malzeme tarafından enerjilerinin kısmen soğurularak geçen ışığın şiddetinin azaltılmasına denilir. Işık şiddetinin azalmasına neden olan faktörler, mesafe ve malzemenin soğurma katsayısıdır (Formül 2.7).

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.7)$$

Burada: I: geçen ışığın şiddeti, I₀: gelen ışığın şiddeti, α : ışığı soğurma katsayısı, x: ışığın geçtiği ortamın kalınlığı, e: logaritmik sabittir.

Geçirgenliği, ışığın bir malzemenin içinden dağılmadan geçebilmesi olarak tanımlamak mümkündür. En yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler saydam malzemeler olarak da adlandırılırlar ve ışığı kısmen soğurmalarına rağmen önemli ölçüde geçirirler. Saydam kelimesinin sözlükteki temel anlamı; ışığı içinden geçiren ve arkasındaki nesnenin görünmesini sağlayan, şeffaf olma özelliği anlamına gelmektedir. Buna göre; eğer bir madde arkasında yer alan maddelerin görülmesine ve ışığın içinden geçmesine izin veriyor ise bu maddelere “saydam madde” adı verilmektedir. Su, cam, PET şişe, hava, poşet gibi nesnelere ışığı geçirdiğinden dolayı saydam madde olarak adlandırılmaktadır. Bir malzemeden çıkan ışık şiddetinin, malzemeye giren ışık şiddetine oranı (I/I_0) geçirgenlik (T) olarak tanımlanır (Kaval, 2018).

Yarı saydam nesnelere, ışığın veya ışınların bir miktar saçılma geçirerek geçtiği yollardır. Sonuç olarak, arkalarındaki görüntüler bulanık veya belirsiz görünür. Optik özellikler açısından, yarı saydam nesnelere opak olanlardan daha az yaygındır. Birçok yarı saydam ve opak nesne başlangıçta aynı görünür. Fakat nesnelere üzerine ışık düştüğünde, onları tanıyabilir ve birbirlerinden ayırt edebiliriz. Şeffaflık, saydamlığı opaklıktan ayıran köprü haline gelir. Yarı saydam malzemelere, kehribar camı, buz veya buzlu cam, ince plastikler (polietilen ve polipropilen) gibi örnekler verilebilir (Özkanlı, 2021).

Işığın hareketi, bir enerji düzeyinden diğerine elektron geçişleri ile açıklanabilir. Metaller ışığı geçirmeyen malzemelerdir. Bu yüzden metallere “opak maddeler” denir. Opak maddelere ışık temas ettiğinde, ışığın görünen dalga boylarındaki enerjisi malzeme tarafından soğurulur. Metaller tarafından soğurulan ışığın büyük kısmı kısa süre içinde aynı dalga boylarındaki görünen ışık şeklinde yüzeyden yayılır. Metallerde enerji soğurulması sadece metalin 0,1 mikrona kadar kalınlığa sahip yüzeyinde gerçekleşir. Buradan da anlaşıldığı gibi 0,1 mikrondan daha ince metal filmler hazırlanarak ışığı geçirecek metal malzemeler elde etmek mümkündür. Işığı geçirmek için malzemenin elektron bant yapıları da önemli rol oynamaktadır. Metalik olmayan malzemelerin görünen ışığı geçirebilmelerini bununla açıklamak mümkündür. Bunun sonucunda, ışığın malzemeyle temasını ve malzeme içindeki etkileşimini hesaplarken malzemenin

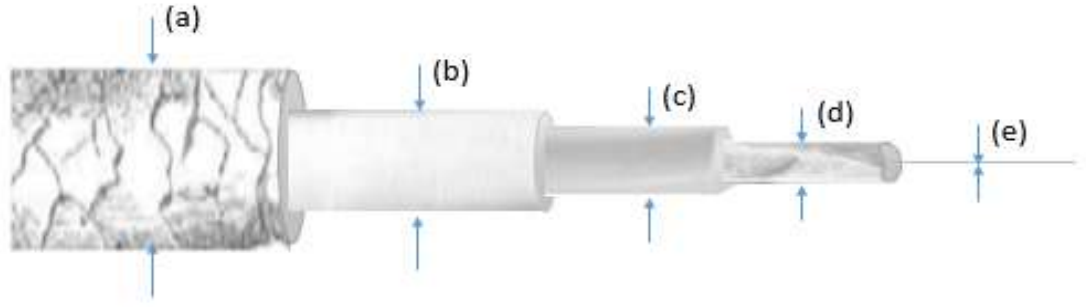
geçirme/iletme özellikleri de dikkate alınmalıdır. Işığın bir maddeden geçişini, malzemenin ışığı bir dalga boyunda soğurması ve farklı dalga boyunda (daha düşük) geri yayması şeklinde anlatmak mümkündür (Anonim, 2021).

2.3. Nanolif tanımı ve nanolif üretim yöntemleri

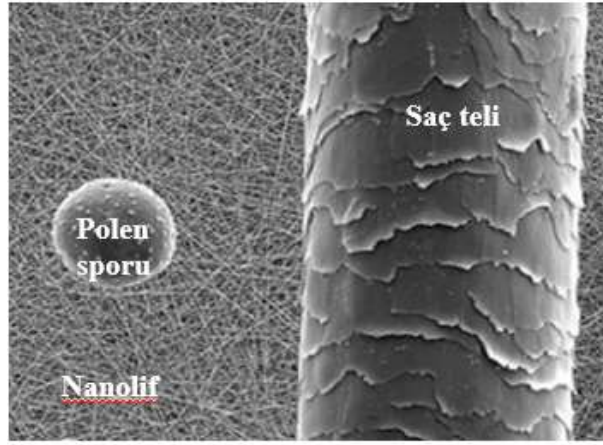
Nanoteknoloji, pek çok farklı bilim alanının biraraya gelerek, en az bir boyutu nanometre ölçeğinde olan malzeme, cihaz ve sistemlerin geliştirilmesini hedefleyen çalışmaların bütünüdür. Tekstilde nanoteknoloji uygulamaları ise, tekstil ürünlerinde performans arttırma ve yeni fonksiyonlar kazandırmayı amaçlamaktadır. Tekstil malzemelerine “nano” uygulamaları çeşitli yöntemlerle yapılmakla birlikte, ürüne istenen özelliklerin kazandırılmasında en kalıcı ve etkili olanı lif ölçeğinde yapılan uygulamalardır (Daşdemir, 2006).

Tekstil lifi, doğal veya sentetik kaynaklardan elde edilen, ince, uzun ve mukavemetli olması nedeniyle iplik olarak eğirilebilen, bir kumaşın gözle görülebilen en küçük birimidir. Tekstil liflerinin çapları incelendiğinde konvansiyonel kumaşlarda kullanılan doğal esaslı (pamuk, yün, ipek vb.) ve sentetik (poliester, poliamid vb.) lif çaplarının onlarca mikron seviyesinde olduğu görülür.

Nanolifler, konvansiyonel liflere göre çok daha küçük çaplara sahip olan liflerdir (Şekil 2.4). Literatürde nanolifler “1 mikronun altında çaplara sahip olan lifler” olarak tanımlanırlar. Nanolifler küçük lif çapları nedeniyle gözle görülemezler ancak özel mikroskopi teknikleriyle görüntülenebilirler (Şekil 2.5).



Şekil 2.4. Bazı lif çaplarının görsel kıyaslanması: a) Yün, b) Polyester, c) İpek, d) Pamuk, e) Nanolif (Kırıştı, 2011, Şekil 2.3)



Şekil 2.5. Saç teli, polen spuru ve nanolif kıyaslanması (Oflaz, 2016, Şekil 1.1)

Lif çaplarındaki bu düşüş, nanoliflerin konvansiyonel liflerden farklı özellikler göstermelerine neden olur. Nanolifler, birim kütle başına daha geniş yüzey alanlarına sahiptir. Ayrıca, nanolifli yüzeylerin fonksiyonlaştırılması kolaydır. Günümüzde üretilen konvansiyonel liflerin mukavemet değerlerinde önemli sınırlamalar olmakla birlikte, nanolifli yüzeyler yüksek mekanik özellik gösterirler (Zussman, Burman, Yarin, Khalfin, ve Cohen, 2006). Ayrıca nanolifli yüzeyler, esneklik, küçük gözenek boyutu, yüksek gözeneklilik gibi özellikler taşırlar. Bu özellikleri nedeniyle filtrasyon, doku mühendisliği, koruyucu giysiler, kompozit malzemeler, enerji uygulamaları ve sensörler gibi pek çok alanda kullanım bulurlar (Gülümser ve Tarakçıoğlu, 2007; Greiner ve Wendorff, 2007; Subbiah, Bhat, Tock, Parameswaran, ve Ramkumar, 2005; Süpüren,

Kanat, Çay ve Kırıcı, 2007). Şekil 2.6'da nanoliflerin farklı kullanım alanları gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Nanolif uygulama alanları (Sunar ve Hasçicek, 2017, Şekil 1)

Nanolifler pek çok farklı yöntem ile üretilebilirler. Konvansiyonel lif üretim teknikleri ve bu tekniklerde kullanılan düze çapları, nanolif üretimine uygun olmadığından, nanolif üretimi için pek çok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bir kısmı laboratuvar ölçekli, bir kısmı ise endüstriyel ölçeklidir (Çizelge 2.1). Her bir yöntemin birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, çekim yöntemi laboratuvar ölçekli bir yöntemdir ve her bir nanolif tek tek üretildiği için oldukça zaman alan, yavaş bir yöntemdir. Endüstriyel ölçekli olan meltblowing tekniği ise günümüzde yaygın olarak kullanılan bir dokusuz yüzey üretim tekniğidir ancak yatırım maliyetleri yüksektir ve bu yöntemle üretilen liflerin çapları birkaç mikrometre olabilmektedir. Bu yöntemler arasında hem birçok polimere uygulanabilmesi, hem de diğer yöntemlere göre daha hızlı ve kolay olması sebebiyle “elektro çekim yöntemi” dikkat çekmektedir

Çizelge 2.1. Nanolif üretim teknikleri

Nanolif üretim teknikleri		
Laboratuvar ölçekli nanolif üretim teknikleri	Endüstriyel ölçekli nanolif üretim teknikleri	Yeni nesil nanolif üretim teknikleri
Çekim prosesi	Fibrilasyon	Çözelti üfleme
Şablon sentezi	Bikomponent	Santifüj çekim
Faz ayırma	Meltblowing	Elektro üfleme
Kendiliğinden düzenleme	Spunbond	Elektriksel olarak yönlendirilmiş çözelti üfleme
Elektro çekim prosesi		

Elektro çekim yöntemi ile polimer çözeltisi veya eriğinden nano boyutlu lifler üretilmektedir. Yöntemin esası polimer çözeltisi/eriğine elektriksel kuvvet uygulanmasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile çapları birkaç nanometreden yüzlerce nanometreye değişen nanolifler elde edilebilmektedir.

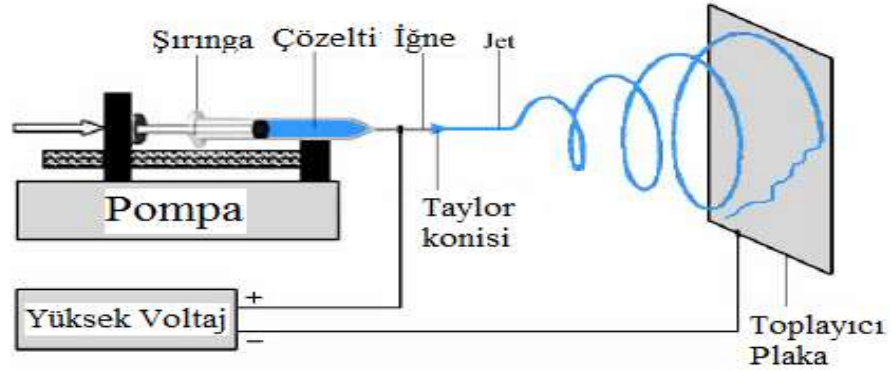
Bunlardan başka da son dönemlerde üzerinde çalışılan ve gelişmekte olan çözelti üfleme (solution blowing), santrifüj çekim (centrifugal spinning), elektroüfleme (electroblowing) ve elektriksel olarak yönlendirilmiş çözelti üfleme (electrically assisted solution spinning) gibi yeni nesil nanolif üretim teknikleri de bulunmaktadır.

Ancak, bütün yöntemler arasında elektro çekim yöntemi halen en çok tercih edilen ve üzerinde çalışılan yöntem olmaya devam etmektedir.

2.4. Elektro çekim ile nanolif üretimi

Elektro çekim tekniği, nanolifleri üretmek için hızlı, kolay ve uygun maliyetli bir yaklaşımdır. Bu yöntemde polimer çözeltisi/eriği elektriksel alana tabi tutulur. Elektriksel alan etkisiyle lifler saçılır ve toplayıcı yüzey üzerinde nano çaplara sahip, ince, kuru polimerik lifler oluşur.

Literatürde elektro çekim ile ilgili pek çok araştırma bulunmaktadır (Sahay, Thavasi ve Ramakrishna, 2011; Li ve Wang, 2013; Subbiah ve diğerleri, 2005). Temel elektro çekim düzeneği; polimer çözeltisi/eriği, besleme ünitesi, güç kaynağı ve toplayıcı olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Elektro çekim metodu ile nanolif üretimi (Güçlü, 2012, Şekil 2.18)

Besleme ünitesi; polimer çözeltisinin sisteme beslenmesini sağlayan pompa, polimer çözeltisini içeren şırınga ve şırıngaya takılan, ucunda oluşacak olan polimer çözeltisinin hacmini belirleyen iğne/düzeden oluşmaktadır.

Güç kaynağı, elektro çekim esnasında uygulanacak olan elektriksel kuvveti sağlayan kaynaktır. Genellikle 0-50 kV arasında değişen yüksek gerilim uygulayabilirler.

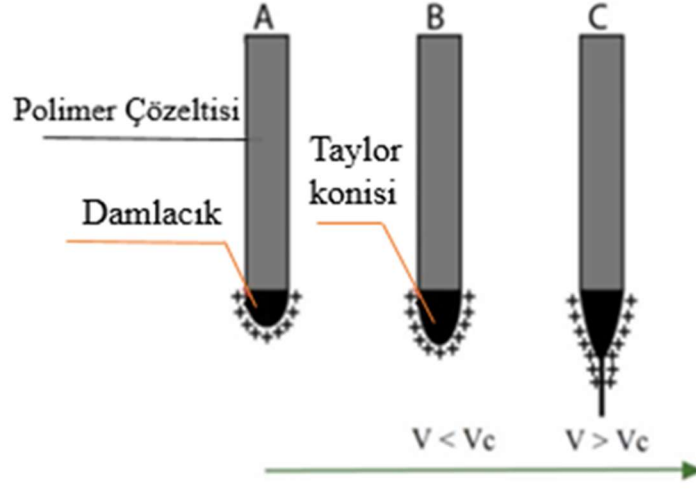
Toplayıcı yüzeyler ise nanoliflerin üzerinde toplandığı metal yapılardır. Bu yapılar metal plaka gibi hareketsiz veya döner silindir, disk vb. gibi hareketli olabilirler. Toplayıcı tipi nanolif inceliği ve morfolojisi üzerinde etkilidir.

Elektro çekim işlemi hem polimer eriğine hem de polimer çözeltilerine uygulanabilmektedir. Eriyikten olan üretimlerde polimeri eritmek için ekstrüdere ihtiyaç duyulmaktadır. Yöntemin esası aynı olmakla birlikte, eriyikten yapılan üretimlerde eriyik viskozitesi çözeltiden olana göre çok daha yüksektir ve bu durum nedeniyle daha kalın çaplı lifler elde edilmektedir (Yang, Li, He, Ma, Ni, ve Zhou, 2018). Polimer çözeltilisine uygulanan elektro çekim işlemi, eriyik elektro çekim işlemine göre daha kolay olması ve daha ince lifler elde edilmesi nedeniyle daha fazla tercih edilmektedir.

Bu yöntemde öncelikle polimer çözeltisi hazırlanarak şırınga içerisine yerleştirilir. Bir besleme pompası yardımıyla şırıngaya bağlı iğne/düzenin ucunda polimer çözeltisi damlacığı oluşturulur. Damlacık bu durumda kendi yüzey gerilimi ve yer çekimi kuvveti ile dengeli olarak düzenin ucunda durur. Daha sonra sisteme güç kaynağı yardımıyla elektriksel potansiyel verilmeye başlanır. Uygulanan elektriksel potansiyel, damlacığın yüzey gerilimini aştığında, bir polimer jeti düzeden çıkar ve karşısındaki toplayıcıya doğru hareket etmeye başlar. Polimer jetinin bu hareketi esnasında çözücü uzaklaşır, polimer jeti uzar ve incelir. Polimer jeti toplayıcıya ulaştığında çözücü tamamen uzaklaşmış olur ve toplayıcı üzerinde kuru, nano çaplı lifler bulunur.

2.5. Elektro çekim yöntemi ile lif oluşumu

Elektro çekim işleminin ilk aşaması damlacık oluşumudur. Burada hazırlanan polimer eriği/çözeltisi bir şırıngaya yerleştirilir ve besleme pompası yardımıyla düzenin ucuna doğru sıvı polimer hareket ettirilir. Bu durumdayken polimer çözeltisi küresel bir halde kendi yüzey gerilimi ile düzenin ucunda durmaktadır (Şekil 2.8).



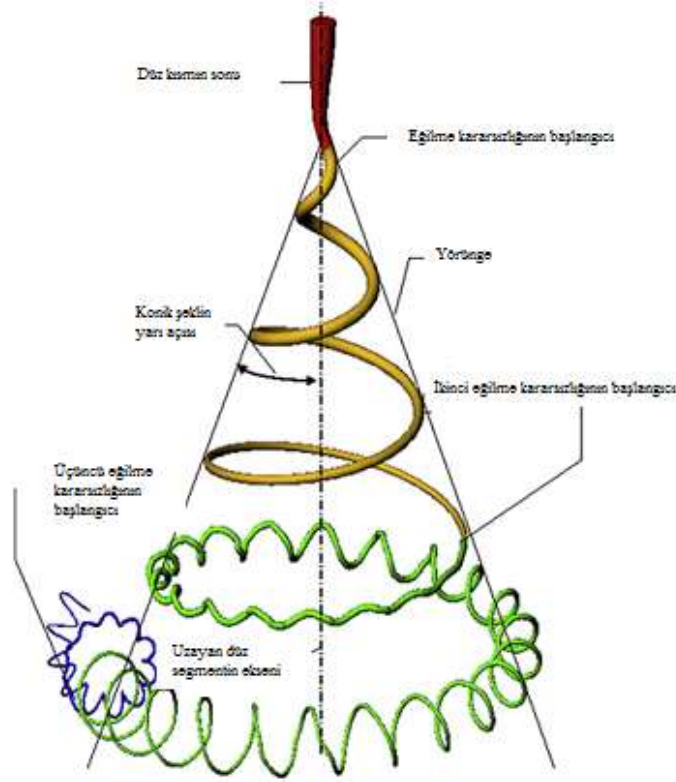
Şekil 2.8. Elektro çekim işlemi esnasında jet oluşumu (Anonim, 2018)

Polimer çözeltisi elektriksel kuvvete maruz kaldığında şekli deforme olmaya başlar. Bu aşamada deformasyonun nedeni çözeltinin kendi yüzey gerilimidir. Uygulanan voltaj arttıkça, elektriksel alan daha etkin olmaya başlar ve damlacık konik bir şekil alır (Leach, Feng, Tuck ve Corey, 2011). Bu değişim ilk olarak Geoffrey Ingram Taylor tarafından tanımlandığı için Taylor Konisi olarak adlandırılmıştır. Taylor, elektriksel kuvvete maruz kalan sıvının $49,3^\circ$ açıda konik haldeyken, sıvının yüzey gerilimi ile elektrostatik kuvvetin dengede olduğunu göstermiştir.

Taylor konisi halindeki polimer damlacığına voltaj arttırılmaya devam edildiğinde, belirli bir voltaj değerinde, uygulanan voltaj çözeltinin yüzey gerilimini aşar ve düzeden bir polimer jeti çıkışı görülür. Çözeltinin yüzey gerilimini aştığı anda uygulanan voltaj değerine “kritik voltaj (V_c)” adı verilir.

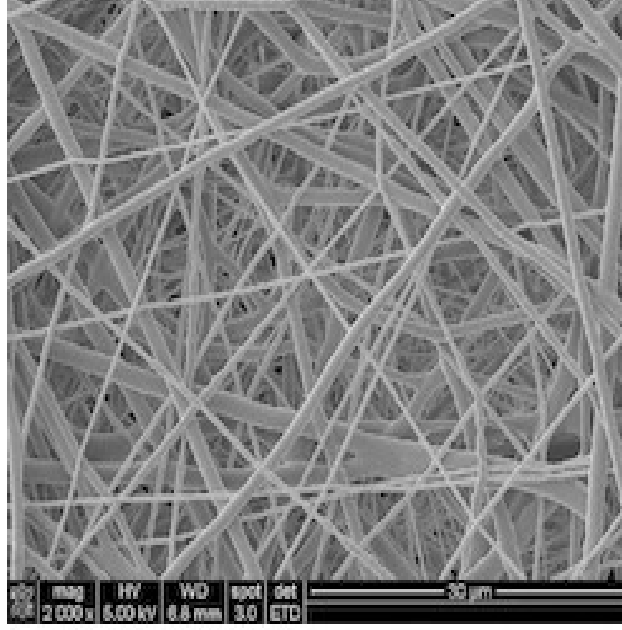
Düzenin ucundan çıkan polimer jeti, elektriksel alan etkisi altında karşı yüklü toplayıcıya doğru hareket etmeye başlar (Bae, Haider, Selim, Kang, Kim ve Kang, 2013; Haider ve diğerleri, 2013). Düzeden çıkan elektrik yüklü polimer jetinin toplayıcıya ulaşmaya

kadar izlediği yol Şekil 2.9’da verilmiştir. Düze ile toplayıcı arasındaki mesafe, çözücünün uzaklaştığı, polimer jetinin incelişip uzadığı bölgedir. Polimer jeti bu alanda hareket ederken birçok eğilme kararsızlığı oluşur (Sahay ve diğerleri, 2011). Bu duruma çözücünün buharlaşması da eşlik eder.



Şekil 2.9. Elektro çekim esnasında polimer jetinin izlediği yol (Reneker ve Yarin, 2008, Şekil 6)

Elektro çekim ile nanolif oluşum aşamasının son basamağı, nanolif formunda katılaşmadır. Bu aşamada polimer jeti toplayıcıya ulaşır ve yüzey üzerine yerleşir. Toplayıcıya ulaşan lifler tamamen çözücünden uzaklaşmış sürekli liflerden oluşan iki boyutlu dokusuz yüzey formundaki yapılardır (Şekil 2.10) (Yang ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.10. Elektro çekim yöntemi ile üretilen nanolifler (Chaparro, Michelle, Matusicky, Allen ve Lannutti, 2016, Şekil 1)

Düzgün nanolif üretiminde temel amaç, ince, boncuk hatalarının olmadığı ve lif çapının lif eksenine boyunca üniform olduğu lifler elde etmektir. Elektro çekim işlemi, uygulanabilirlik anlamında kolay bir teknik gibi görünse de düzgün nanolif elde edilmesini etkileyen pek çok parametre vardır. Optimum parametreler belirlenmediğinde, toplayıcı üzerinde oluşan yüzeyde damlacıklar, boncuklar gibi hatalar görülebilir. Elektro çekim işleminin en büyük zorluğu, istenen nanolif morfoloji ve özellikleri elde etmek için bu parametrelerin optimizasyonunda yatmaktadır. Bu parametreler Bölüm 2.6’da detaylı olarak anlatılmaktadır.

2.6. Elektro çekim prosesine etki eden parametreler

Elektro çekime etki eden parametreler çözelti, proses ve çevresel parametreler olarak üç başlık altında sınıflandırılır (Çizelge 2.2). Çözelti parametreleri, çözelti viskozitesi, polimer molekül ağırlığı, çözelti içindeki polimer konsantrasyonu, çözeltinin yüzey gerilimi, çözücünün uçuculuğu, çözeltinin iletkenliği vb. gibi parametreleri içerir. Proses

parametreleri, elektrospinning düzeneği üzerinde değiştirilebilen bütün değişkenleri ifade eder. Bu değişkenler polimer çözeltisi besleme hızı, düze çapı, uygulanan voltaj, düze-toplayıcı arası mesafe, toplayıcı tipi ve hızı olarak özetlenebilir. Çevresel parametreler ise sıcaklık, nem, atmosfer tipi, basınç gibi ortam şartlarıdır. Bütün bu parametreler, pürüzsüz ve boncuksuz nanolif üretimini doğrudan etkiler.

Çizelge 2.2. Elektro çekim prosesine etki eden parametreler (Ramakrishna, Fujihara, Teo ve Lim, 2005)

Elektro çekim Prosesine Etki Eden Parametreler		
Çözelti parametreleri	Proses parametreleri	Çevresel parametreler
Polimerin molekül ağırlığı	Voltaj	Sıcaklık ve nem
Polimer konsantrasyonu	Besleme oranı	Atmosfer tipi
Çözelti viskozitesi	Mesafe	Basınç
Çözeltinin yüzey gerilimi	Düze çapı	
Çözelti iletkenliği	Toplayıcı tipi ve hızı	
Çözücü tipi		

Çözelti Parametreleri: Elektro çekim ile düzgün nanolif üretimi gerçekleştirebilmek için gerekli en önemli aşamalardan birisi uygun viskozitede, elektriksel olarak yeterli iletkenliğe sahip, homojen polimer çözeltisinin eldesidir. Çözelti özelliklerine etki eden parametreler aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

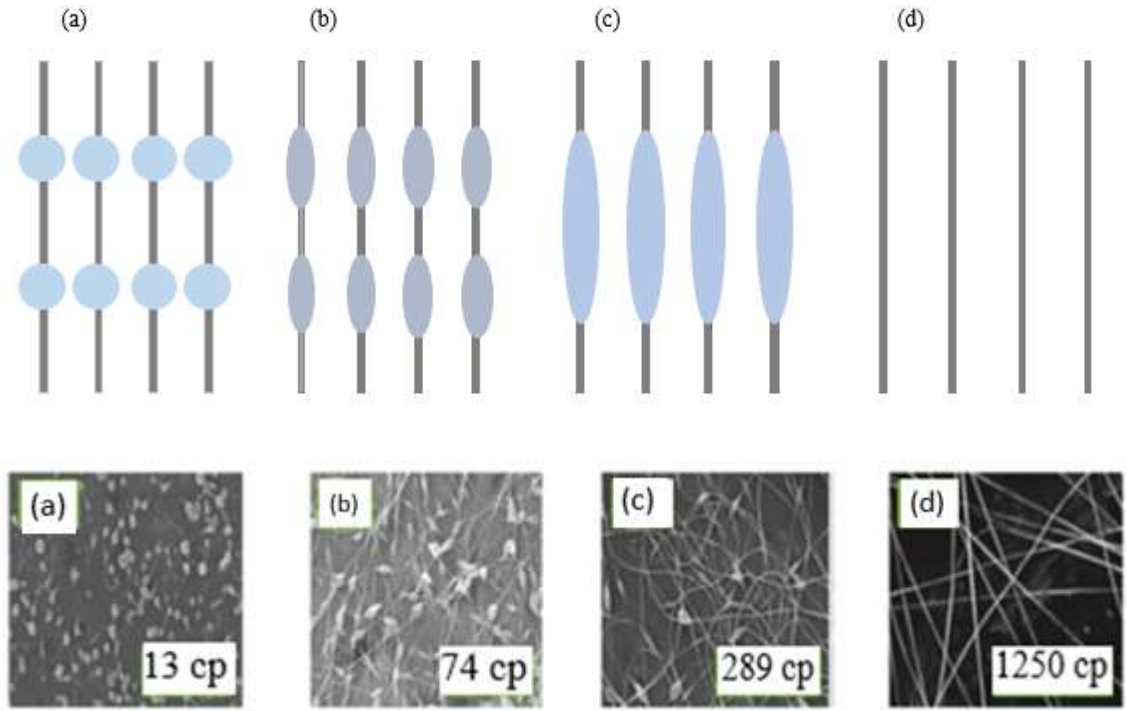
Polimer molekül ağırlığı, polimer konsantrasyonu ve viskozitesi: Bir polimer çözeltisinin viskozitesi, çözelti içindeki polimer zincirlerinin karışıklığı ile ifade edilir. Elektro çekim işlemi, yüklü bir jetin tek eksenli olarak gerilmesine dayanır. Elektro çekim sırasında, yüklü polimer jeti düzenin ucundan çıkar ve karşıdaki toplayıcıya doğru hareket eder. Jetin bu hareketi esnasında, polimer jetinin parçalanmasını engelleyen ve bütünlüğünü sağlayan durum zincir karışıklığıdır (Bucko ve diğerleri, 1999). Elektro çekim işleminde nanolif elde edebilmek için hazırlanan polimer çözeltisinin yeterli viskoziteye sahip

olması gerekir. Eğer çözelti içerisinde uzun ve çok sayıda polimer zinciri bulunursa, bu durum zincir karışıklığına yol açar ve çözelti viskozitesi artar.

Çözelti viskozitesi, dolayısıyla çözelti içerisindeki zincir karışıklığı polimerin çözelti içerisindeki madde miktarını veya polimerin molekül ağırlığını arttırarak arttırılabilir. Bir çözelti içerisindeki madde miktarını arttırmak, çözelti içerisindeki polimer zincir sayısını arttıracığından, daha fazla zincir karışıklığı oluşacaktır ve dolayısıyla çözelti viskozitesi artacaktır.

Bir polimerin molekül ağırlığı ise polimer zincirinin uzunluğunu ifade eder. Daha yüksek molekül ağırlıklı polimer ile çözelti hazırlandığında, çözeltideki zincir uzunluğu artacak ve bu artış zincir karışıklığına neden olacaktır. Böylece çözelti viskozitesi de artmış olacaktır.

Yapılan araştırmalar, artan viskozite ile nanolif çaplarının arttığını, boncuk hatalarının azaldığını göstermektedir. Fong, Chun ve Reneker, (1999) yaptıkları çalışmalarında, PEO polimerini kullanarak farklı konsantrasyonlarda sulu çözeltiler hazırlamışlar ve artan viskozite ile nanolif yapısının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Düşük viskozitelerde küresel formda boncuklar görülürken, artan viskozite ile birlikte boncukların önce iğsi bir şekil aldığı ve optimum viskozite değerine ulaşıldığında boncukların kaybolduğu görülmüştür (Şekil 2.11). Ancak, viskozitenin belirli bir değerin üzerinde olması halinde, elektro çekim esnasında çözeltinin iğne ucundan akışının engellendiği görülmüştür (Haider ve diğerleri, 2013).



Şekil 2.11. Viskozite ile nanolif yapısının değişimi (Fong ve diğerleri, 1999, Şekil 1)

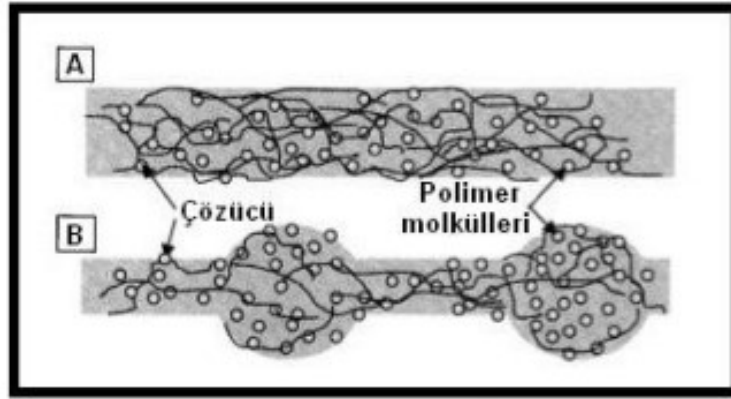
Doshi ve Reneker (1995) polimer konsantrasyonu ve viskozitenin PEO nanoliflerin morfolojisi üzerine etkilerini araştırmışlardır ve PEO nanoliflerin elektro çekim yöntemi ile üretilmesi için çözelti viskozitesinin 800-4000 cP olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Baumgarten (1971) tarafından yapılan bir deneyde poliakrilonitril (PAN) polimer çözeltisinin konsantrasyonunun 7,5%'ten 20%'e kadar farklı oranlarında lif oluşumuna etkisi kamera görüntüleri ile incelenmiştir. Konsantrasyon arttıkça, düzgün nanolifli yüzeylerin elde edildiği görülmüştür.

Bu tip çalışmalar sonucunda, konsantrasyon ve viskozitenin kritik değerinin belirlenmesinin boncuksuz nanoliflerin elde edilmesi için gerekli olduğu sonucuna varılabilir.

Çözelti Yüzey Gerilimi: Yüzey gerilimi elektro çekimi zorlaştıran bir faktördür ve prosesin başlayabilmesi için, elektriksel olarak yüklenen çözeltinin, yüzey geriliminin üstesinden gelmesi gerekir. Yüzey geriliminin yüksek olması, polimer jetinde jet boyunca boncuklu yapıların oluşmasına sebep olur. Viskozite ve konsantrasyon, yüzey gerilimini en çok etkileyen faktörlerdir (Ramakrishna ve diğerleri, 2005).

Yüksek viskozitede yüzey geriliminin etkisi altında çözücü moleküllerinin bir araya toplanma eğilimi azalmakta, düşük viskozitede ise tam tersi artmaktadır. Çözücü moleküllerinin, polimer molekülleri ile karışmadan, bir araya toplanması durumunda lif boyunca boncuklar oluşur (Ramakrishna ve diğerleri, 2005) (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Viskozitenin elektro çekim çözeltisindeki polimer moleküllerine etkisi: (A) Yüksek viskozitede çözücü molekülleri, (B) Düşük viskozitede çözücü molekülleri (Ramakrishna ve diğerleri, 2005, Şekil 3.2)

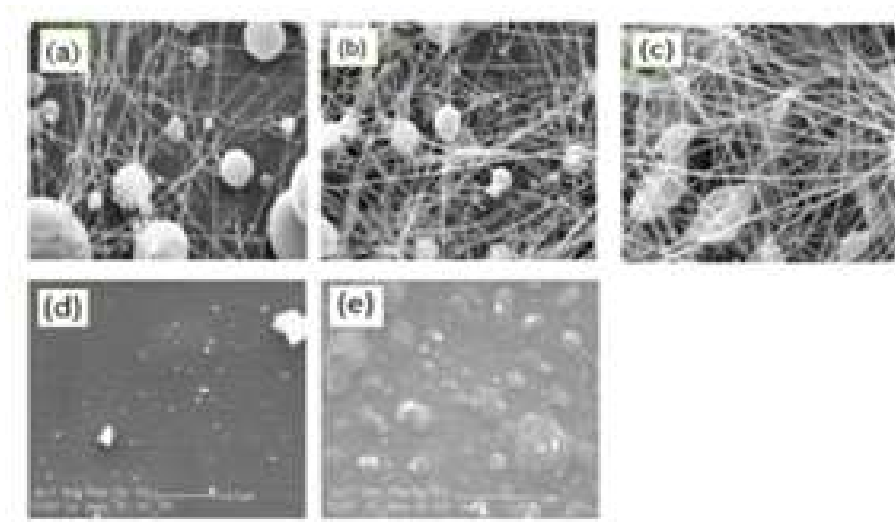
Araştırmalar, konsantrasyonun çözücülerin yüzey gerilimleri üzerinde büyük etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Konsantrasyonu, yani çözücü karışımı ve kütle oranını değiştirilerek, çözeltinin yüzey gerilimini azaltmak ve boncuklu liflerin yerine daha düzgün liflerin üretilmesi mümkündür. Çözeltilere yüzey aktif maddelerin katkısı yapılarak da yüzey gerilimi azaltılmakta ve daha üniform lifler elde edilmektedir (Ramakrishna ve diğerleri, 2005).

Çözelti iletkenliği: Elektro çekim yöntemi ile nanolif elde edebilmek için hazırlanan polimer çözeltisinin bir miktar iletken olması gerekmektedir. Çözelti iletkenliği hem elektro çekim esnasında oluşan Taylor konisinin oluşumunu, hem de nanolif çaplarını etkiler. Eğer çözeltinin iletkenliği düşük olursa, damlacık yüzeyinde yeterli elektrik yükü olmayacak ve Taylor konisi oluşmayacaktır. Bu durum elektro çekimin gerçekleşmemesine yol açar. Çözeltinin iletkenliğinin kritik bir değere yükseltilmesi, sadece damlacık yüzeyindeki yükü Taylor konisi oluşturmak için arttırmakla kalmaz, aynı zamanda nanolif çapında da azalmaya neden olur. Ancak, çözelti iletkenliğinin kritik bir değerin üzerinde olması da elektro çekim esnasında problemlere yol açar.

Bir polimer çözeltisinin iletkenliği, çözelteye uygun bir tuz ilave edilerek kontrol edilebilir. Tuz eklenmesi elektro çekim işlemini iki şekilde etkiler: (i) polimer çözeltisindeki iyon sayısını artırır, sıvının yüzey yük yoğunluğunun ve uygulanan elektrik alanın ürettiği elektrostatik kuvvetin artmasına neden olur, (ii) polimer çözeltisinin iletkenliğini artırır, bu da sıvının yüzeyi boyunca teğetsel elektrik alanında azalmaya neden olur. Bununla birlikte, bu teğetsel elektrik alanı, çözeltinin iletkenliğindeki artışla birlikte büyük ölçüde azaldığında, sıvının yüzeyi boyunca elektrostatik kuvvet azalır ve bu da Taylor konisinin oluşumunu olumsuz etkiler. Coulomb ve elektrostatik kuvvetlerle birlikte polimer jetinin elektriksel alanda izlediği yolu ve kararsızlıkları etkiler. Bu durum nanoliflerin çapı üzerinde de etkilidir (Haidera, Haiderb ve Kang, 2018).

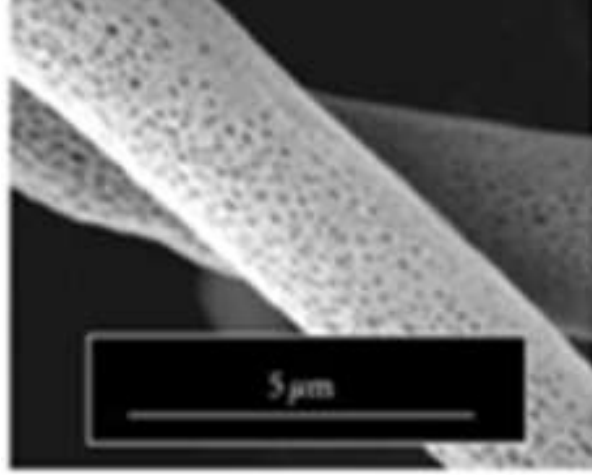
Çözücü tipi: Çözücünün seçimi, pürüzsüz ve boncuksuz elektro çekim ile nanolif üretimi için anahtar faktörlerden biridir. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan biri çözücünün uçuculuğudur. Elektro çekim esnasında polimer jeti düzenin ucundan ayrılıp, toplayıcıya doğru hareket ederken, çözücü uzaklaşmalıdır. Bu nedenle, genel olarak yüksek buharlaşma oranları nedeniyle uçucu çözücüler tercih edilir. Bununla birlikte, yüksek derecede uçucu çözücüler düşük kaynama noktasına ve çok yüksek buharlaşma oranlarına sahip olduklarından, bu tip çözücüler kullanılırsa, polimer jeti düze ucunda kuruyabilir ve elektro çekim gerçekleşemez. Benzer şekilde, daha az uçucu çözücüler de düşük kaynama noktaları nedeniyle polimer jetinin toplayıcıya hareketi esnasında

uzaklaşamaz ve toplayıcı yüzey üzerinde liflerin birbirine yapıştığı, ağsı yapılar oluşur (Lannutti ve diğerleri, 2007). Çok sayıda araştırma grubu, çözücü ve çözücü sisteminin nanoliflerin morfolojisi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kanani ve Bahrami (2011) yaptıkları çalışmada PCL nanoliflerin morfolojisi üzerine farklı çözücü sistemlerinin etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar her bir çözelti içerisindeki polimer konsantrasyonunu sabit tutarak, farklı çözücü sistemleri denemişlerdir. Sonuçlar, seçilen çözücü tipine bağlı olarak nanolifli yapıların değiştiğini, formik asit kullanılan çözücü sistemlerinde film yapıların oluştuğunu göstermiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Farklı çözücülerde çözülmüş PCL nanoliflerinin SEM görüntüleri a) buzlu asetik asit, b) % 90 asetik asit, c) metilen klorür/DMF, (d) buzlu formik asit, (e) formik asit/aseton (Kanani ve Bahrami, 2011, Şekil 2)

Çözücü seçimi, yüksek gözenekli nanoliflerin üretiminde de hayati bir rol oynar. İki çözücünün kullanıldığı sistemlerde, çözücülerin buharlaşma hızları birbirlerinden farklı olduğundan faz ayrımı olur ve yüksek gözenekli nanolifler oluşur (Şekil 2.14) (Sill ve von Recum, 2008).



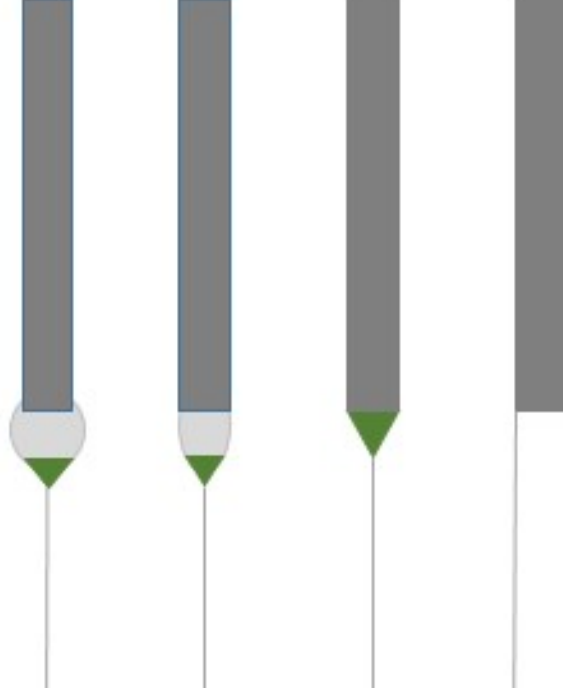
Şekil 2.14. Yüksek gözenekli nanolifler (Lubasova ve Martinova, 2011, Şekil 6)

Proses parametreleri: Elektro çekim ile nanolif üretiminde proses parametreleri, üretimde değiştirilebilecek olan parametreleri ifade eder. Voltaj, besleme oranı, düze-toplayıcı arası mesafe, düze çapı, toplayıcı tipi ve hızı ile çözeltinin sıcaklığı üretim proses parametrelerini ifade eder. Proses parametreleri nanolif çapı ve morfolojisinde etkilidir.

Voltaj: Elektro çekim yöntemi ile nanolif üretiminin temeli elektriksel kuvvetlere dayanmaktadır. Düzenin ucunda kendi yüzey gerilimi ile duran polimer çözeltisinden nanolif oluşturulabilmesi için, uygulanan voltajın çözeltinin yüzey gerilimini aşması gerekir.

Şekil 2.15’de polimer çözeltisinin voltaj uygulanması ile birlikte değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi polimer damlacığı düze ucunda küresel olarak durmaktadır. Artan voltaj ile birlikte damlacık deforme olmakta ve Taylor konisi oluşmaktadır. Kritik voltaj değerinden sonra jet çıkışı görülmektedir. Liflerin incelmeleri ve gerilip uzamaları polimer jeti üzerindeki yükler ile ilişkilidir (Haidera ve diğerleri, 2018). Uygulanan voltajdaki artış, polimer jetinin üzerindeki yük miktarını artırır, sonuç olarak polimer jeti daha fazla

gerilip uzar ve daha ince lifler oluşur. Ancak, voltajın çok artması jet karasızlığına neden olur ve boncuk oluşumu artar (Reneker ve Yarin, 2008).



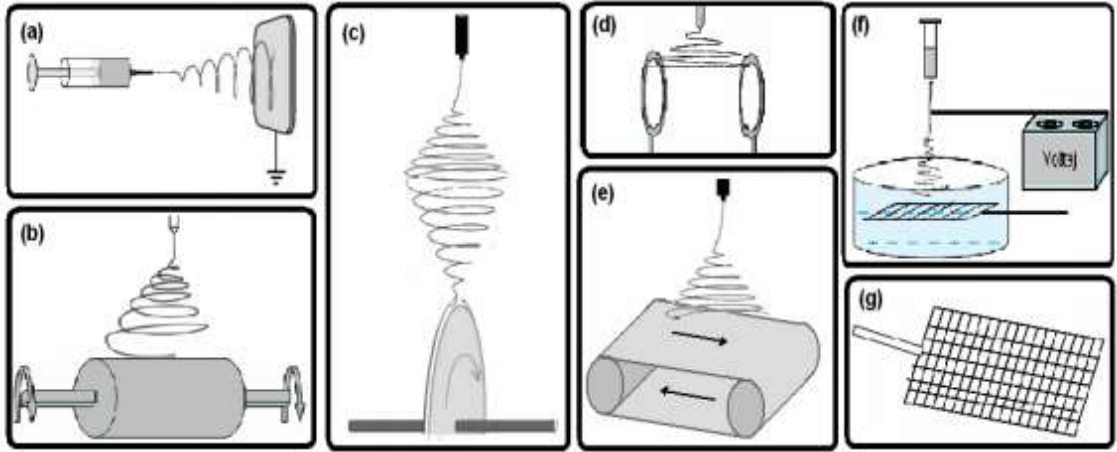
Şekil 2.15. Jet konisinin artan voltajla değişimi (Sill ve von Recum, 2008, Şekil 2)

Besleme oranı: Polimer çözeltisinden düzgün nanolifler üretmek için bir kritik akış hızı belirlenir. Bu kritik değer polimer sistemine göre değişir. Akış hızını kritik değer üzerine çıkarmak lif çapında veya boncuk boyutlarında artışa yol açabilir (Üstündağ, 2009). Elektro çekim esnasında beslemenin hem sürekli olması hem de düze ucunda birikme yapmaması gerekmektedir. Bu dengeyi sağlamak için optimum besleme oranı belirlenmelidir (Ramakrishna ve diğerleri, 2005). Bu aynı zamanda kararlı bir jet konisinin ve bazen geri çekilen bir jetin oluşumuna izin verecektir. Geri çekilen jetler sabit jetler değildir ve elektro çekim işlemi sırasında bu jetler sürekli olarak koni jetleri ile değiştirilir. (Sill ve von Recum, 2008). Bu değişimlerin bir sonucu olarak, geniş çaplara sahip nanolifler oluşur (Zargham, Said, Amir, Saied ve Rogheih, 2012).

Mesafe: Düze ve toplayıcı arasındaki mesafe, polimer jetinin elektriksel alanda kalma süresini belirler ve nanolif morfolojisini etkiler (Matabola ve Moutloali, 2013). Polimer jetinin toplayıcıya hareketi esnasında çözücü buharlaşıp, polimer jeti gerilip incelik. Bu nedenle, düzgün nanoliflerin hazırlanması için ideal mesafenin belirlenmesi çok önemlidir. Düze ve toplayıcı arasındaki mesafenin nanolif morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmak için günümüze kadar çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Aradaki mesafe kısa olduğunda polimer jetinin izleyeceği yol ve elektriksel alanda kalma süresi kısalmaktadır. Çözücü uzaklaşmaya fırsat bulamaz, polimer jeti yeterince gerilip incelemeyebilir. Dolayısıyla, kalın çaplı, birbirine yapışmış, ağsı yapısı oluşur. Mesafe arttıkça çözücünün uzaklaşması için yeterli süre tanınmış olur ve lif çapları azalır (Baumgarten 1971, Matabola ve Moutloali, 2013).

Düze çapı: Çözeltinin beslendiği düze çapı, elektro çekim için önemli unsurlardan biridir. Düze çapının küçülmesiyle ucunda oluşan damlacık daha küçük olur bu da daha ince liflerin oluşmasını sağlamasıyla beraber damlacığın yüzey geriliminin artmasına sebep olur. Artan yüzey gerilimiyle beraber çözeltinin düzeden ayrılarak jet oluşturması için daha fazla Coulomb kuvvetine ihtiyaç duyulur ve doğal olarak jetin hızının azalmasıyla havada kalma süresi artmış olur. Havada daha fazla kalan jet daha çok gerilmesine ve lif çapında azalmalara neden olur. Küçük düze çapının avantajlarının olmasına rağmen kritik değerlerinin altına inildiğinde dezavantajları da ortaya çıkmaktadır. Bunların örnekleri, çözeltinin püskürtülmesinin zorlaşmasıyla düzede tıkanmaların olması ve kesikli lif üretiminin boncuklu yapılar oluşturmasıdır. (Ramakrishna ve diğerleri, 2005).

Toplayıcı tipi ve hızı: Electrospinning sırasında katılaştıktan sonra, nanolifler, esas olarak sabit ve dönen platformlardan oluşan çok çeşitli toplayıcılarda toplanabilir. Bu tip toplayıcıların, metal ızgaralar, dönen tambur, dönen disk, taşıyıcı bant, üçgen çerçeve, paralel bilezik ve sıvı banyosu gibi örnekleri vardır (Şekil 2.16) .



Şekil 2.16. Electrospinningde kullanılan bazı toplayıcı tipleri (a) Sabit plaka, (b) Dönen tambur, (c) Dönen disk, (d) Paralel bilezikler, (e) Taşıyıcı bant, (f) Sıvı banyo, (g) Metal ızgara (Üstündağ, 2009, Şekil 1.30)

Toplayıcı plaka ile ilgili parametreleri iki başlık altında değerlendirmek mümkündür. Bunlar plakanın üretildiği materyal ve geometrik şeklidir. Nanolifler düzden çıktıktan sonra yüzeylerindeki elektriksel yüklerin etkisiyle topraklanmış plakaya doğru hareketlerini devam ettirirler ve toplayıcı plakaya temas ettiklerinde elektriksel yüklerden tamamen kurtulmuş olurlar. Bu da birim alandaki yoğunluklarını etkilediğinden, toplayıcı plakanın üretildiği materyalin iletkenliği plaka için dikkate alınacak önemli parametrelerin başında gelir. Bir başka parametre olan toplayıcıların geometrik şekilleri ise, nanoliflerin ne formda toplanacağını belirlemek için oldukça önemlidir (Mülazım ve Canbolat, 2017). Sabit toplayıcılar genel olarak düz plakalardır ve rastgele lifleri toplamak için kullanılmaktadırlar. Bu rastgele konumlanma, nanolifli yüzeyin kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Döner silindirler, yönlendirilmiş nanolifler üretmek için kullanılabilir. Ayrıca artan dönme hızıyla beraber nanoliflerin oryantasyonunda ve mükavemetinde bir artış görülmektedir (Ramakrishna ve diğerleri, 2005).

Genel olarak kullanılan toplayıcılar metal toplayıcılar olsa da, su, metanol, kağıt gibi farklı maddelerin de toplayıcı olarak kullanılabilirdiği bazı araştırmalar vardır. Yapılan bir çalışmada toplayıcı olarak su haznesi ve metanol kullanılarak toplayıcıların nanolif üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Su haznesinin liflerde büzülme, metanolun ise şişmeye neden olduğu görülmüştür (Kim, Kim, Jin ve Chin, 2005). Kağıt gibi toplayıcılar

kullanıldığında ise nanoyüzeylerde boşluklu yapıların oluştuğu görülmüştür. Bunun sebebinin, toplayıcının düşük iletkenliğe sahip olması nedeniyle liflerin üzerindeki elektriği tam olarak toplayıcıya aktaramamaları ve birbirlerini elektriksel olarak itmeleri olduğu düşünülmüştür (Liu ve Hsieh, 2002).

Çevresel parametreler: Sıcaklık, nem, atmosfer tipi ve basınç, elektro çekim işleminde etkili olan çevresel parametrelerdir. Yapılan araştırmalar ortam şartlarındaki değişimin nanolif üretilebilirliğini ve nanolif morfolojisini etkilediğini göstermiştir.

Sıcaklık ve nem: Nanoliflerin çap ve morfolojilerine çözelti ve proses parametrelerinin yanı sıra bulunduğu ortamdaki sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerin de önemli etkisinin olduğu yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür (Pelipenko, Kristl, Jankoviç ve Baumgartner, 2013). Havadaki nem oranı, jetin katılaşma işlemini etkileyerek nanoliflerin morfolojisinde değişikliklerin yaşanmasına neden olur. Ancak bu olay polimerin kimyasal yapısına bağlıdır. Pelipenko ve diğerleri (2013) polivinilalkol (PVA), PEO, PVA/hyaluronik asit (HA) ve PEO/kitosan (CS) nanoliflerin üretiminde nemin lif çapı üzerine etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak nem oranının artmasıyla lif çaplarında önemli derecede düşüş olduğu görülmüştür.

Ortam sıcaklığı, polimer moleküllerinin hareketini, çözücünün buharlaşma hızını ve çözelti viskozitesini etkilemektedir. Çözücünün buharlaşma hızı sıcaklık arttıkça artacak viskozite ise düşecektir (Beypazar, 2013). Çözücünün buharlaşmasındaki artış ve çözeltinin viskozitesindeki azalma nanolif çaplarında azalmaya yol açar. De Vrieze ve diğerleri (2009) selüloz asetat (CA) ve polivinil pirolidon (PVP) kullanarak ürettikleri nanoliflerde bu durumu gözlemlemişlerdir.

Atmosfer Tipi ve Basınç: Elektro çekim prosesini etkileyen faktörler arasında havanın bileşimi de önemli unsurlardan biridir. Atmosfer tipinin etkisi havadaki gazların elektro çekim zamanı yüksek elektriksel alanın etkisiyle farklı davranışlar sergilemesi olarak

açıklanabilir. Örneğin helyum, yüksek elektriksel alanda bozulur ve elektro çekim işlemini engeller (Ramakrishna ve diğerleri, 2005).

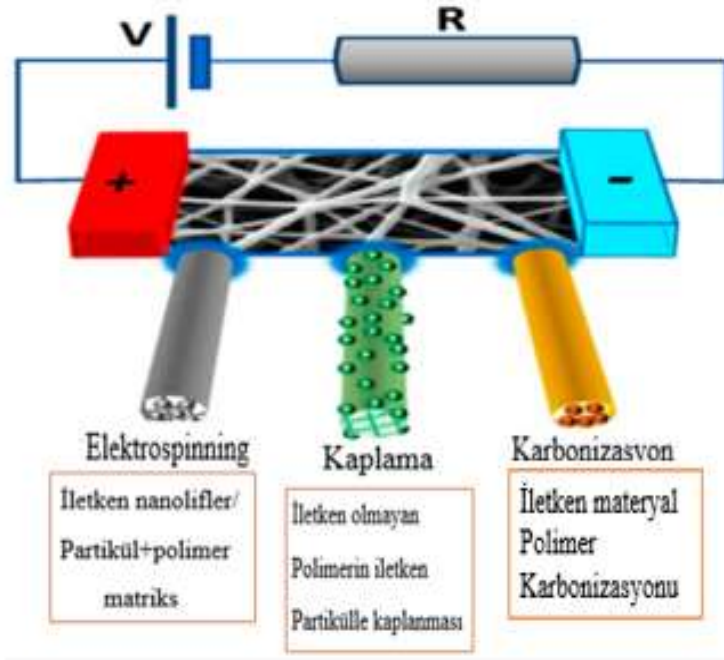
Basınç da elektro çekim üzerinde etkili parametrelerden biridir ve basıncın etkisini araştırmak için elektro çekim prosesinin kapalı ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir. Ortamdaki basıncın azalması genellikle elektro çekim üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Basınç için kritik değer atmosfer basıncıdır ve bunun altındaki değerler elektro çekim işlemini olumsuz etkilemektedir. Düşük basınç altında şırıngadaki çözeltinin dışarı akma eğilimi daha fazla olur ve elektro çekim olumsuz etkilenir (Ramakrishna ve diğerleri, 2005).

2.5. Elektro çekim ile iletken nanolif üretimi

İletken nanolifler, elektrik akımının bir noktadan diğer noktalara geçişini sağlayabilen yüzeyler oluşturur. İletken polimerlerden üretilen nanoliflerde iletkenlik, polimer üzerinden açıklanabilir. Bu tip polimerlerde en önemli özellik polimer yapısında konjuge çift bağların olmasıdır ve iletkenliği sağlayan da konjugasyonda karbon atomları arasındaki sıralanan tek ve çift bağlardır. Bu bağlar lokalize olmuş ve az lokalize olmuş sigma (σ) ve pi (π) bağlarıdır. İletkenlik π bağları üzerinden gerçekleşir ve bu kuvvetli bir bağ oluşturmayan elektronun (e^-) kolayca yerinden ayrılarak hareket etmesiyle açıklanabilir. Polimerlerin elektriksel olarak iletken olmalarını sağlamak amacıyla, polimerler sadece yük taşıyıcılara değil, yük taşıyıcıların hareket etmelerine izin verecek bir orbital sisteme de sahip olmalıdırlar. Bu da polimer zinciri boyunca sürekli π orbitallerin üstüste örtüşmesi ile karşılanır. Bir polimerin iletken olması için bazen konjugasyon tek başına yeterli olmayabilir, o zaman istenilen seviyede iletkenliği sağlamak için ya valans bandından elektronları alarak (p-doping) ya da iletim bandına elektron ekleyerek (n-doping) yapılır (Yıldız, 2018).

Nanolifler birçok durumda kolayca elektro çekim ile üretilebilirken, iletken nanolifler oluşturmak genellikle daha zordur. İletken nanolifler elde etmek için birçok yöntem

vardır. Bunlara elektro çekimle iletken katkılı veya iletken polimerden nanolif üretimi, elektro çekim sonrası yüzeylerin iletken katkı maddeleri ile kaplanması ve elektro çekim sonrası elde edilen nanoliflerin karbonizasyonu örnektir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Elektro çekimle iletken nanolif üretim yöntemleri (Blachowicz ve Ehrmann, 2020, Şekil 1)

İletken katkı maddeli nanoliflerin üretimi esnasında, iletken katkı maddesi miktarının yüksek olması elektro çekim işlemini olumsuz etkiler. İletken polimerlerde ise düşük molekül ağırlığı ve birçok çözücüde zor çözünmesi elektro çekim işlemini zorlaştıran faktörlerdendir. İletken kaplamalar ise, istenen gözenekli yapıyı bozmakla beraber, nanolifli yüzeylerin biyouyumluluğu veya diğer özelliklerinde sorunlara neden olabilir (Blachowicz ve Ehrmann, 2020).

Karbon nanolif eldesi iletken nanolifli yüzeylerin üretiminde ilk akla gelen yöntemlerdendir. Burada prekürsör olarak lignin veya PAN kullanılabilir. Geleneksel eğirme yöntemleri ile lignin kullanılarak on mikron çapa sahip karbon lifleri elde

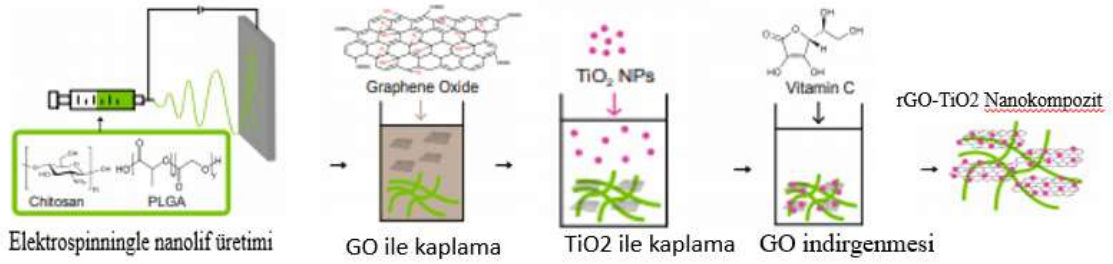
edilmiştir. Ancak, elektro çekim yöntemi ile mikron altındaki çaplarda karbon liflerin üretilmesi mümkündür. Elektrospon lignin liflerinden karbon liflerinin üretimi ilk kez Lallave ve diğerleri (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma için 1/1 ağırlık oranlarında Alcell lignin/etanol çözeltileri hazırlanmış ve elektro çekim ile nanolif üretimi yapılmıştır. Elektro çekim sırasında etanolün hızlı buharlaşması yüzünden yükselen lignin konsantrasyonu düzede tıkanmalara neden olmuş ve proses yarıda kesilmiştir. Bu durumun önüne geçmek için koaksiyel düze kullanılmış ve kesintisiz lif üretimi gerçekleştirilmiştir.

PAN, karbonizasyon için en sık kullanılan malzemelerden biridir. Karbon nanolifleri elde etmek için, ilk adım, tipik olarak havada gerçekleştirilen, stabilizasyon işlemidir. Bu işlem, nanolifli yüzeyin kimyasal ve mekanik stabilitesini artırır. Yapılan araştırmalar sonucunda, ortalama stabilizasyon sıcaklığının 150-250 °C olduğu ve karbonizasyon işleminin 600-800 °C'de gerçekleştirildiği görülmüştür (Sabantina ve diğerleri, 2018).

İletken nanolif üretiminde kullanılan diğer bir yaklaşım, iletken polimerlerden nanolif eldesidir. İletken polimerlere örnek olarak polianilin (PANi), polipirol (PPy) gibi polimerler verilebilir. Bu polimerlerin elektro çekim ile üretiminde karşılaşılan zorluklar nedeniyle genellikle yardımcı bir polimer kullanımı söz konudur. Örneğin, Garrudo ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada PCL/PANi iletken nanolifleri elektro çekim yöntemiyle üretmişler ve 10^{-4} - 10^{-1} S/cm aralığında iletkenlikler elde etmişlerdir. Akçeren, Avcı, Gökçe, Balkan ve Saraç (2018) ise PPy/ poli(bütül akrilat-ko-metil metakrilat) karışımlarından 0,4-0,5 μ S/cm aralığında iletkenliğe sahip nanolifli yüzeyler elde etmişlerdir. Ancak bu iletkenlikler, iletken nanoteller veya iletken nanopartiküller ekleyerek elde edilebilecek değerlere kıyasla hala düşüktür.

Literatürde iletken olmayan veya zayıf iletken nanolifler üzerine iletken bir kaplama uygulanarak iletken nanolifli yüzey eldesi üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Fausey, Zucker, Shaulsky, Zimmerman ve Elimelech (2019), elektro çekim ile kitosan/poli(laktik-ko-glikolik) asit polimer karışımından nanolifli yüzey hazırlamışlar ve daha sonra elde ettikleri yüzeyi iletken grafen oksit (GO) ile kaplandıktan sonra,

titanyumdioksit (TiO₂) daldırarak bir daha kaplama yapmışlardır. Son aşamada grafen oksidi C vitamini ile indirgeyerek yüksek elektrik iletkenliğine sahip nanolifli yüzey elde etmişlerdir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Nanoyüzeyin kaplanması (Fausey ve diğerleri, 2019, Şekil 1)

2.6. Elektro çekim ile iletken katkı nanolif üretimi

İletken olmayan polimerlerden iletken nanolif elde etmek için iletken katkı maddelerinin kullanılması gerekmektedir. Bu tip yüzeylerde iletkenlik katkı maddesi olarak kullanılan nanopartiküller üzerinden açıklanmaktadır. Yüzeylerde elektrik akımı bir atomdan diğerine elektronların geçişiyle gerçekleşir (bkz. Şekil 2.1).

Bu amaçla yapılan ilk yaklaşımlar, polimerlerin uygun iletken maddelerle karışımlarının hazırlanmasına yöneliktir. Metal nanoparçacıkların polimer yapısına katılmasıyla polimerlerin özelliklerinin istenilen yönde geliştirilmesi mümkündür. Bunun için öncelikle, seçilen bir polimer (şablon polimer) uygun çözücüler içinde çözülür ve içerisine iletken nanopartikül eklenir. Daha sonra, hazırlanan polimer çözeltisinden elektro çekim ile çapları 1 mikronun altında olan lifler elde edilir. Denenen yollardan birisi, polimerler çözeltilerine metal tozları gibi parçacıkların katılması ve iletkenliğin polimer örgüsüne sokulan metal faz üzerinden sağlanması olmuştur. Metal nanopartiküller eşsiz elektronik, manyetik, optik, termal ve katalitik nitelikleri nedeniyle

oldukça dikkat çekicidirler (Demir, 2015). Bu nanopartiküller, saf metallere (gümüş, altın, karbon, alüminyum vb.) veya bunların bileşimlerinden (tuzlar, oksitler, hidroksitler vb.) oluşmaktadırlar. Gümüş nanopartiküller elektriksel, optik, termal ve antibakteriyel özelliklerinden dolayı aralarında en geniş kullanım alanına sahiptir (Esmeray ve Özata, 2019). İletken olmayan polimer çözeltilerine iletken katkı maddesi katılarak iletken nanolif eldesinin mümkün olduğuna dair literatürde birçok örnek vardır.

Evcin ve diğerleri (2019) ise prekürsör olarak PAN kullanarak elektro çekim yöntemi ile gümüş katkılı karbon nanolifler üretmişlerdir. Yüzeylerin morfolojik analizinde hem liflerin homojen çaplarda kesintisiz oluştuğu hem de nanopartiküllerin lif içerisinde homojen olarak dağıldığı SEM analizleriyle doğrulanmıştır. Elektro çekim ile elde edilen nanolifli yüzeylerin kararlı bir yapıya dönüşmesi için sırasıyla stabilizasyon (250-280 °C) ve karbonizasyon (750-1500 °C) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucu ham liflerin çaplarında %38 ile %72 arasında bir azalma gözlemlenmiştir. Karbonizasyon sonucu ortalama çapı 174 nm olan nano boyutlu kararlı lifler elde edilmiştir.

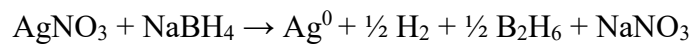
Vassiliadis, Provatidis, Prekas ve Rangoussi (2004) yaptığı çalışmada, liflerin içerisine dolgu malzemesi olarak %25 veya daha fazla oranda karbon ve metal tozu kullanıldığında bazı olumlu sonuçların elde edilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Fakat kullanılan partiküllerin boyutları liflerin bazı mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemekle beraber tekstil ürünlerinde kullanılmasını da zorlaştırdığı görülmüştür. Bu tür dezavantajlar göz önünde bulundurulduğunda, yüzeylerde iyi elektriksel özelliklerin elde edilmesi için en uygun yöntemlerden birisinin kimyasal kaplama yöntemi olduğu görülür. Bu işlem, liflerin metal tuzlarla kaplandığı ve daha sonra da kimyasal bir banyoda tuzların indirgenmesi sonucunda liflerin metal nanopartiküllerle kaplanması ile gerçekleşir. Kimyasal kaplama sonucunda liflerin yüzeyinde metal partiküllerin homojen şekilde dağılması, istenen elektriksel özelliklerin elde edilmesine neden olur.

Reich ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada hafif elektrotlar ve elektriksel iletkenlik gerektiren çeşitli uygulamalar için metal gibi yüksek elektriksel iletkenliğe sahip,

eğilebilen ve nefes alabilen nanolifli yüzeylerin üretimini hedeflemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada PAN nanolifler, PCL nanolifler ve gümüş nanoteller içeren kompozit bir yapı oluşturmuşlar ve yüksek elektriksel iletkenlik değerlerine ulaşabilmişlerdir. Burada uzun gümüş nanotellerin yapı içerisinde homojen dağıtılabilmesi, yüksek elektriksel iletkenlik için kilit rol oynamıştır. Gümüş nanotellerin yapı içindeki dağılımı ıslak serme metodu ile gerçekleştirilmiştir. Gümüş nanotellerin yapı içerisinde homojen dağıtılması sayesinde çok düşük gümüş malzeme kullanımı ile yüksek iletkenlik elde edilmiştir.

İletken nanolif üretmenin bir başka yöntemi de polimere uygun bir tuz ekleyerek iyonik iletkenlik sağlayarak nanoliflere iletkenlik kazandırmaktır. Bu yöntemde polimer iletken olmayan polimerlerden seçilir ve polimer iletkenliği sağlayan nanoparçacıklar için bir taşıyıcı görevini yapar. Bu durumda polimerler yalıtkanlık özelliğini korur ve diğer bileşenler için taşıyıcı faz işlevi yapar, elektrik iletimi ise sadece nanoparçacıklar üzerinden gerçekleşir.

Katkı maddesi olarak metal tuzları kullanıldığı zaman onları aktif metal iyonlarına dönüştürmek için indirgeme işlemine tabii tutulmaları gerekmektedir. İndirgeme işleminin nanoyüzeylerin iletkenliği üzerindeki etkisini araştırmak için Çunayev, Düzyer, Koç ve Tezel (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, PAN ve gümüş nitrat (PAN/AgNO₃) karışımından elde edilen nanolifli yüzeylerin indirgeme sonrasında elektriksel dirençleri ölçülmüştür. Artan indirgeme süresiyle nanoliflerdeki iletkenliğin arttığı görülmüştür. Bu çalışmada indirgeme nanolifli yüzeylere sodyum borhidrür (NaBH₄) damlatılarak yapılmıştır ve sonuçta gümüş nitrat (AgNO₃) gümüş iyonlarına (Ag⁰) indirgenmiştir. Yapılan çalışma esnasında meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir.



Başka bir çalışmada elektro çekim yöntemi ile üretilen Galyum İndiyum fosfit (GaInP) nanoliflerin elektriksel ve optik özelliklerine proses parametlerinin etkisi incelenmiştir. İşlem parametrelerini değiştirerek üç farklı Galyum İndiyum fosfit (GaInP) nanolifli yüzey hazırlanmış ve nanoliflerin elektriksel ve optik özelliklerine sırasıyla dört nokta cihazı ve UV spektrofotometresiyle bakılmıştır. Farklı içeriklerle üretilmiş üç ayrı numunenin geçirgenliği ve soğurması ölçülerek optik bant aralıkları hesaplanmış ve nanoliflerin foton enerji değerlerinin geçirgenlik değerinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Çözelti konsantrasyonundaki değişikliklere bağlı olarak GaInP nanoyüzeylerin optik ve elektriksel özelliklerinin farklılık gösterdiği görülmüştür (Evcin, 2014).

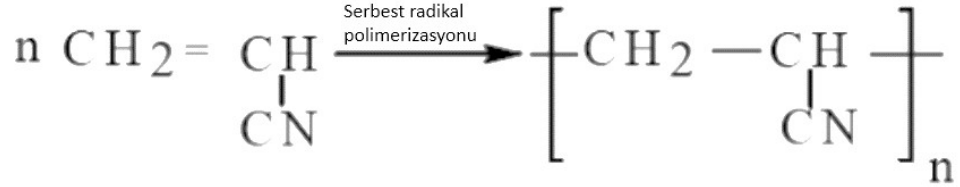
2.7. İletken katkı maddeli nanolif üretiminde kullanılan malzemeler

İletken nanolifler iletken polimerden veya iletken olmayan polimerlere iletken nanoparçacıklar eklenerek üretilebilmektedir. İletken nanoparçacıklar iletken katkı maddeleri olarak bilinir. İletken polimerlere PANi, poliasetilen ve PPy örnek olarak gösterilebilir. İletken polimerlerden nanolif üretimi için uygun çözücülerde polimer çözeltisi hazırlamak yeterlidir. İletken olmayan polimerlerden iletken nanolif elde etmek için ise elektro çekim prosesi öncesi çözeltilere iletken katkı maddeleri eklenmektedir. İletken olmayan polimerlere PAN, PCL gibi polimerler örnek olarak verilebilir. Bu gibi polimerlerden hazırlanan çözeltilere gümüş, karbon gibi iletken katkı maddeleri eklenerek elektro çekim işlemi gerçekleştirilebilir. En çok kullanılan iletken katkı maddelerine karbon ve özellikle metal nanoparçacıklar örnek gösterilebilir.

2.7.1. İletken olmayan polimerler

Poliakrilonitril (PAN): Akrlonitril, petrol destilasyon ürünlerinden kolay ve ucuz yöntemlerle elde edilebilmektedir. Sıvı haldeki akrilonitril, çeşitli katalizörler (benzoil peroksit, potasyum persülfat veya hidrojen peroksit + demir sülfat karışımı) kullanılarak polimerize edilir (Halis, 2018). Akriklik liflerini oluşturan poliakrilonitril polimerleri genel

anlamda akrilonitril monomerlerinin radikal zincir polimerizasyonu (Şekil 2.19) ile elde edilmektedir (Kausar, 2019).



Şekil 2.19. PAN polimerinin polimerizasyonu (Tiyek ve Bozdoğan, 2007, Şekil 1)

1930 yılında sentez edilen PAN polimeri, 1930-1945 yılları arasında yapay kauçuk olarak kullanılmıştır. İlk defa 1945 yılında Fiber adı ile filament haline getirilerek piyasaya sürülen PAN, 1950 ve 1952 yıllarında Orlon adı ile filament ve kesikli elyaf halinde üretilmiştir (Halis, 2018).

PAN'ın belli bir erime noktasının olmamasıyla beraber, akrilik liflerin erime sıcaklığı 200-300 °C arasında değişmektedir ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda bozunurlar (Rahaman, İsmail ve Mustafa, 2007).

Aynı zamanda yapısındaki polimer zincirinde negatif polarlığı bulunan nitril grupları, bir başka polimer zincirinin metilen grubu hidrojeni ile H-köprüleri oluşturarak polimer zincirlerinin çapraz bağlarla birbirine bağlanmasından dolayı bilinen organik çözücülerde de çözünemez. Ayrıca Van der Waals kuvvetleri de zincirleri bir arada tutar, polimerin kristallenme oranını artırır ve çözünürlüğünü azaltır. Bu nedenle uzun yıllar PAN polimerini çözebilecek uygun bir çözücü araştırılmakla geçmiştir (Halis 2018).

PAN liflerini elde etmek için çözücü olarak N,N-dimetilformamid (DMF), dimetilsülfon, dimetilasetamid kullanılmaktadır. PAN lifleri, polimerin bu çözücülerdeki çözeltilerinden elde edilir (Bohn, Schaeffgen ve Statton, 1961; Halis, 2018).

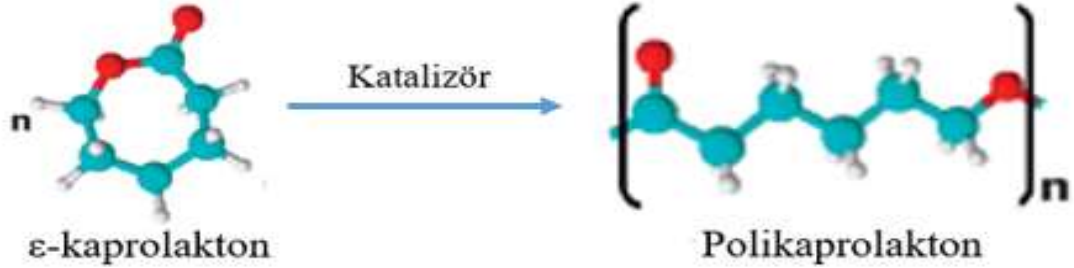
PAN nanolifleri: PAN polimeri uygun çözücülerde çözünerek, polimer çözeltisi elde edilir ve elektro çekim yöntemiyle PAN nanolifleri üretilir. Literatürde elektro çekimle PAN nanoliflerinin üretimi ve uygulamaları üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur.

PAN nanolifler kendi başına kullanılmakla birlikte, kompozit yapılar içerisinde takviye malzemesi ve enerji depolamak için kullanılan iyon pillerinin içerisinde anot tabakası olarak da kullanılmaktadırlar. Kendisine karşı inert olan kimyasal ortamlarda ise filtrasyon amacıyla kullanılabilirler. PAN nanoliflerinin içerisine çeşitli nanopartiküller katılarak farklı özelliklerde nanolifler üretilmektedir.

Örneğin, Aykut (2013) bir çalışmada, elektro çekim yöntemiyle kobalt klorür/poliakrilonitril (CoCl_2/PAN) kompozit nanolifler üretmiş, üretilen bu kompozit nano yapının hidrojen sülfür (H_2S) ile muamelesinin sonuçlarını araştırmıştır. Başka bir çalışmada iğne çapı ve besleme hızının PAN nanoliflerinin morfolojisine etkisi araştırılmıştır (İçoğlu, 2019). Sonuç olarak iğne çapındaki ve çözelti besleme hızındaki artışın ortalama nanolif çaplarında artışa neden olduğu görülmüştür. Özellikle besleme hızı ve iğne çapı artışının boncuklanmayı arttırdığı gözlemlenmiştir.

Polikaprolakton (PCL): PCL, biyolojik olarak parçalanabilir bir poliesterdir ve biyobozunurluk, biyoyumluluk ve geçirgenlik gibi birçok önemli özelliğinden dolayı paketleme ve biyomedikal uygulamaları başta olmakla birçok alanda kullanıldığı görülmüştür (Deshmukh ve diğerleri, 2017). Biyobozunur ve biyoyumlu bir termoplastik olan PCL, uzun süre dayanımından dolayı ilaç taşıma sistemi olarak da önemli kullanım alanına sahiptir. PCL halka açma polimerizasyonu ile üretilir (Şekil

2.20). Son zamanlarda, kaprolaktonun halka açma polimerizasyonu için geniş bir katalizör yelpazesi gözden geçirilmiştir.



Şekil 2.20. PCL halka açılımı (Labet ve Tielemans, 2009, Şekil 1’den değiştirilerek alınmıştır)

PCL, uzun süreli implantlarda ve kontrollü ilaç salım uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalsiyum fosfat bazlı seramiklerin ve biyoaktif camların PCL'e dahil edilmesi, kemik dokusu mühendisliği için uygun, dikkate değer ölçüde geliştirilmiş mekanik özelliklere, kontrol edilebilir bozunma oranlarına ve gelişmiş biyoaktiviteye sahip bir hibrit biyomateryal sınıfı ortaya çıkarmıştır (Özsağiroğlu, 2011).

PCL nanolifler: Taygun, Hatinoğlu, Öztürk, Yerli ve Küçükbayrak (2018) yaptıkları bir çalışmada kompozit PCL nanoliflerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, hacimce %100 formik asit kullanılarak oluşturulan jelatin/PCL karışımından üretilen nanoliflerin ince, homojen dağılmış ve boncuksuz yapılar oluşturduğu görülmüştür. Kemik doku mühendisliğinde biyoaktif cam ilaveli numunelerin daha çok tercih edilmesi, ağırlıkça %5 biyoaktif cam içeren jelatin/PCL nanolifli numunelerin seçilmesine neden olmuştur (Taygun ve diğerleri, 2018). PCL nanoliflerine başka bir örnek de, Poli(gliserol sebakat)/Polikaprolakton (PGS/PCL) polimerleri kullanılarak üretilen nanoliflerin oluşumuna çözücülerin etkisinin incelenmesidir. Bu araştırma için dört tip çözücü, tek tek (formikasit, asetikasit, aseton ve DMF) ve ikili kombinasyonlar (formik asit/aseton, formik asit/asetik asit, kloroform/DMF, kloroform/etanol) halinde kullanılmış ve çözücü

tipinin nanoliflerin morfolojisi, boncuk oluşumu ve çapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Formik asitin çözücü olarak kullanıldığı sistemde düzgün nanoliflerin elde edildiği ve nanolifli yüzeylerde hiç boncuk olmadığı görülmüştür. Diğer tekli çözücülerde boncuklu yapılar, düzede tıkanmalar, homojen olmayan yapılar gibi sorunlar yaranmıştır. Fakat bu tekli çözücülerini birbirleriyle karıştırarak ikili çözücü sistemi yaratıldığında daha düzgün nanoliflerin üretilbildiği görülmüştür (Fakhrali, Semnani, Salehi ve Ghane, 2020).

2.7.2. İletken katkı maddesi

Karbon siyahı: Karbon siyahının nanotoz formu iletkenidir ve uygulamaları çok yönlüdür. Uygulama alanlarından bazıları plastik, elektronik, mürekkepler ve kaplamalardır. Karbon siyahı ağırlıklı olarak takviye dolgu maddesi olarak ve kauçuk endüstrisinde kullanılır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Karbon siyahı (Anonim 2017c)

Karbon siyahı nanotozu, küresel parçacık formunda bulunan karbondan (% 98 ila %99,7) oluşmaktadır. Karbon siyahı farklı üretim metotlarıyla üretilmektedir. Üretim metotları sonucu farklı standartlarda karbon siyahı çeşitleri ortaya çıkmaktadır. Karbon siyahı, üretim metoduna bağlı olarak, farklı karbon partükül boyutlarına, agrega boyutuna ve aglomera boyutuna sahip olabilmektedir. Bu üç boyut karbon siyahının ana özellik karakteristiklerini belirlemektedir. Karbon partükül boyutları 10 nm' den 500 nm' ye kadar

olabilmektedir. Kullanılan hammaddelere, yanma koşullarına ve ısıl ayrışmaya bağlı olarak birçok karbon siyahı derecesi vardır ve bunlara uygun olarak ortalama yüzey alanı 10 ile 300 m²/g arasında değişmektedir. Karbon partikül boyutu karbon siyahının karakteristik özelliklerine önemli etkide bulunmaktadır. Dolayısıyla, bir karbon siyahından bahsederken en önemli parametre karbon partikül boyutu denilebilir (Wang, Gray, Reznik, Mahmud ve Kutsovsky, 2003).

Grafen ve karbon siyahından elde edilen iletken karbon malzemeler, batarya üretimi, süper kapasitör, elektrokimyasal sensörler, enerji toplama sistemleri gibi birçok alanda mürekkep veya kaplama malzemesi olarak geniş kullanım alanına sahiptirler (Üner ve Gürcüm, 2019).

Literatürde iletken olmayan polimer içerisine iletken katkı maddesi olarak karbon siyahının kullanımı ve elektro çekim ile nanolifli yapı eldesi üzerine kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Tiwari, Yarin ve Megaridis (2008) geçirgen ve esnek gerinim sensörü elde etmek amacıyla elektrosponning çözeltisi içerisine iletken karbon siyahı eklemişler ve karbon siyahı konsantrasyonunun, nanokompozit şeritlerin elektriksel direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, iletken lifleri başarılı bir şekilde üretmişler ve tek eksenli uzamalarda elektriksel direnç değişimini göstermişlerdir.

Duzyer, Sinha-Ray, Sinha-Ray, Yarin (2017) yılında yaptıkları çalışmada polimer içerisine karbon siyahı ekleyerek iletken nanolifler üretmişler ve bu yüzeylerin saydamlık özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışma karbon siyahı partiküllerinin lif içerisine katılabilirliğini ve iletken/saydam yüzeylerin elde edilebilirliğini göstermesi açısından önemlidir.

Kai ve diğerleri (2016) PCL ve polidimetilsiloksan (PDMS) üretilen kullanarak biyoyumlu ve biyobozunur inorganik-organik bir şekil hafızalı polimer kompozit yapı üretmişlerdir. Araştırmacılar yapı içerisine farklı oranlarda (%0,5-1-2) karbon siyahı

ekleyerek yapıların elektriksel iletkenliğini ve şekil hafızası özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada karbon siyahı katkısının yeterli elektriksel iletkenlik sağladığı belirtilmiştir.

Literatürde bir diğer dikkat çeken malzeme ise karbon lifleridir. Karbon malzemeler yüksek iletkenlik, düşük ağırlık, elektromanyetik girişim adsorpsiyon özellikleri, esneklik gibi nitelikleri nedeniyle elektromanyetik kalkanlama malzemesi olarak araştırılmaktadır. Im, Kim ve Lee (2009) yaptıkları çalışmada, elektro çekim ve ısıtma işlemi ile nano boyutlu karbon lifler elde etmişler, florinlenmiş karbon siyahısını elde ettikleri karbon liflerine gömmüşler ve elde ettikleri yapıların elektromanyetik kalkanlama özelliklerini araştırmışlardır. Daha sonra bu yapıları ısıtma işlemine tabi tutarak bu işlemin elektriksel özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar florinlenmiş karbon katkısı ve ısıtma işleminin elektriksel iletkenlikte artışa yol açtığı sonucunu bulmuşlardır.

Bu çalışmalar haricinde karbon siyahı katkısının yapıldığı başka çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Ahmed, Kim ve Kim (2012) yaptıkları çalışmada kendiliğinden iletken PANi'ye karbon siyahı katkısı yaparak kompozit bir elektrot yapısı oluşturmuşlardır. Çalışmalarındaki amaç mikrobiyel yakıt pillerindeki oksijen indirgeme reaksiyonu için bir katot malzemesi oluşturmaktır. Bu çalışmada PANi nanolifler sulu/organik ara yüzey polimerizasyonu ile üretilmiştir. Üretilen yapı elektro çekim ile üretilen nanolif formundan uzak, daha ziyade membrana benzer bir yapıdadır.

Al-Saleh ve Sundarari'nin (2008) çalışmasında karbon siyahı içeren polipropilen/polistren polimer karışımlarının elektromanyetik kalkanlama etkinliği araştırılmıştır. Çalışmada karbon siyahı eriyik haldeki polimer karışımı içerisine eklenmiştir. Daha sonra eriyik, sıvı nitrojen ile soğutulmuş kompozit yapı elde edilmiştir. Oluşan yapı polimerik kompozit malzeme olup, elektro çekim ile elde edilen nanoliflere benzer yapıda değildir.

2.8. İletken nanolif uygulamaları

İletken nanolifler, otomotiv, elektrik-elektronik, kimya, çevre, enerji, biyoloji ve savunma sanayi gibi birçok önemli uygulama alanlarına sahiptir.

Nano seviyelerde yapılan işlemlerin çeşitliliği beraberinde nanoteknolojinin geniş kullanma alanına yayılmasına ve üzerinde çok sayıda çalışmaların yapılmasına neden olmuştur. Bu durum sensörlerde, hafıza elemanlarında, tıpta vb. alanlarda etkili yeni cihazların ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Nanoteknolojinin, tıptan havacılık ve uzay alanına kadar çok geniş bir yelpazede atomsal büyüklükte cihazlar ve makineler üretilmesini sağlayabilmesiyle beraber, tekstil sektöründe de pek çok alanda kullanıldığı görülmektedir (Özdoğan, Demir ve Seventekin, 2006).

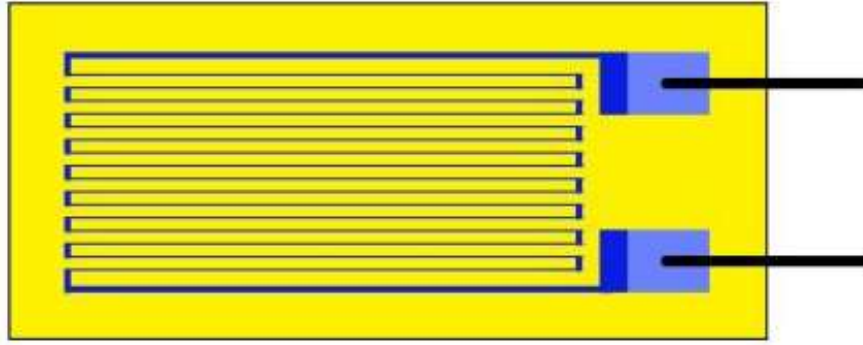
Enerji uygulamaları: Elektriği ileten nanoliflerin pek çok avantaj sağlaması onların, elektronik aletlerin üretiminde ve bazı önemli özelliklerin kazandırılmasında kullanılmasını artırmaktadır. Elektrotların kimyasal reaksiyon hızları, yüzey alanları ile doğru orantılı olduğundan, elektro çekim yöntemi ile üretilen iletken nanolifli yüzeyler yüksek performanslı pillerin üretiminde kullanılmaktadırlar (Daşdemir, 2006). Nanolifli bir yüzey ile sağlanan üç boyutlu, yüksek gözenekli, geniş yüzey alanına sahip yapılar, iyonların membran boyunca iletimini kolaylaştırmaktadırlar. Nanoliflerden üretilen “Günes Yelkeni” (Solar Sail) üzerine büyük ve hafif bir ayna yerleştirilmiş bir uzay aracıdır. Aynanın ışığı yansıtması prensibi ile hareket eder. Işığın bir momentumu vardır, ışık bir cisme çarptığı zaman momentumunu bu cisme aktarır, yansıdığı zaman ise, cisim ile aralarında ikinci bir momentum değişimi gerçekleşmektedir. Cisim üzerindeki toplam kuvvet, çarpan ve yansıyan ışığın vektörel toplamına eşit olmakta ve cisim bu kuvvet doğrultusunda hareket etmektedir. Nanolifler uzay endüstrisinde ve hava araçlarında da kullanılmaktadırlar. (Süpüren ve diğerleri, 2007; Üstündağ, 2009).

Yenilenebilir ya da yeşil enerji olarak bilinen, tüketilmeden ve çevreye zarar vermeden enerji üretimine olanak sağlayan malzemeler ve bu malzemelerden üretilen her türlü

yapılar son yıllarda birçok mühendislik dalının çalışma konuları arasında yerini almıştır. Piezoelektrik malzemeler, akıllı malzeme sınıfında değerlendirilen, yapı ve çalışma prensipleri nedeniyle yenilenebilir enerji üretimine imkân sağlayan malzemelerdir. Önceleri sadece bazı kristallerde fark edilen bu özelliğin sonraları bazı seramik ve polimer yapılara da kazandırılabilceği fark edilmiştir. Ancak piezoelektrik özellik gözetildiğinde sadece, bazı polimerlere bu özellik kazandırılabilir. Bunlardan en çok bilineni ise $-CH_2-CF_2-$ formülüne sahip polivinil florür (PVDF)'dür. Vatansever, Yıldız, ve Ağırhan (2018) yaptıkları proje kapsamında, nano boyuttaki turmalin partikülleri PVDF polimeri içerisine katkılandırılarak elektro çekim yöntemiyle başarılı bir şekilde PVDF/turmalin nanolifli yapılar üretmiştir. SEM değerlendirmeleri sonucunda nanolif oluşumunun ağırlıkça %20 oranında polimer ve nanopartikül içeren yapılarda daha düzgün olarak gerçekleştiği görülmüştür. Sabit aralıklarla malzemeye kuvvet uygulaması sağlanan döner bir cihaz sayesinde numunelerin voltaj üretim kapasiteleri osiloskop yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Buradan elde edilen veriler de numunelerin yapılarına ilişkin yapılan analiz sonuçlarını desteklemiştir. Malzeme içerisinde kullanılan turmalin miktarı arttıkça üretilen numunelerden elde edilen tepe noktası voltajı da artmıştır. Bu artış %5 oranında turmalin içeren malzemeler için %90, %10 oranında turmalin içeren malzemeler için %155, %15 oranında turmalin içeren malzemeler için %240 olarak tespit edilmiştir (Vatansever ve diğerleri, 2018).

Sensör uygulamaları: Kumaş ve giysilere elektroniklerin entegrasyonu, sıradan tekstil ürünlerinin önemli fonksiyonel özellikler kazanmasıyla beraber geniş kullanım alanlarını da ortaya çıkarmıştır. Akıllı kumaş sensörleri elektronik tekstil ürünlerinde en çok kullanılan sistemlerden biridir ve giyilebilen tekstil ürünlerinde önemli konfor alanı sağlaması kullanımlarını arttırmaktadır. Tekstil ürünlerinde kullanılan sensör uygulamaları kumaşların yapısına göre farklı şekillerde üretilmektedir. Bunlar iletken iplik/kumaş olması durumunda dokunarak, dikilerek ve nakış yapılarak üretilirken, iletken mürekkepler, polimerler ve boyalar olması durumunda, boyanarak, baskılanarak, püskürtülerek ve filmlenerek üretilmektedir. Kullanılan yalıtkanlar; sentetik köpükler, kumaş boşlukları veya yumuşak polimerler olabilmektedir. Sensör uygulamalarına örnek olarak gerilme sensörüne bakılırsa, yüzeyler, çeşitli yöntemlerle, gerilime duyarlı materyallerden yapılarak veya uygun malzemelerle kaplanarak gerilmeye karşı duyarlı

hale getirilebilmektedirler (Şekil 2.22). Elektronik ölçümler ve prototip uygulamaları, kapasitif ölçümler ve diğer kumaş algılama teknolojilerine kıyasla daha basittir. İletken olmayan kumaşlara gerilime duyarlı ipliklerin katkısı ile gerilmeyi algılayabilen yapılar elde etmek mümkündür. Bu tür yapılar, karbon örme piezorezistif sensör ve örme PAN esaslı sensörlere uygundur (Erol ve Çetiner, 2017).



Şekil 2.22. Gerilme sensörü (Ergün, 2018, Şekil 2)

Zehirli gazlar ve kimyasallar insan hayatı için her zaman büyük tehlike ve zorluklar yaratmıştır. Bu yüzden birçok alanda olduğu gibi tekstil sektöründe de bu konuyla ilgili çok sayıda çalışmalar yapılmış ve kimyasal algılama özelliklerine sahip kumaş sensörleri geliştirilmiştir. Bu tip tekstil uygulamalarının, e-tekstiller veya iletken polimerlerle kaplanmış tekstil yüzeyleri gibi örnekleri vardır. E-tekstiller ve iletken polimerlerle kaplanmış sensörler arasındaki fark, e-tekstillerde, küçültülmüş kimyasal veya gaz sensörleri dikilerek kumaş yüzeyine bağlanırken, iletken polimerlerle kaplanan sensörlerde ise, kumaşlar kimyasala duyarlı polimerlerle kaplanmaktadır. Kimyasal çevreye duyarlı olan sensörlere kemorezistörler denilir ve bu sensörlerin iş prensibi kimyasal ortamlarda elektrik dirençlerindeki değişimlerdir. Hidrojen ve karbon monoksit gazlarını tespit etmek için metalik içeriklerle katkılanmış iletken polimerlerden oluşan gaz sensörleri kullanılmaktadır. Örneğin, bakır ve paladyum kalıntılarıyla katkılanmış PPy, bu gazlara maruz kaldığında dirençte değişiklik göstermektedir. Zehirli gaz sensörleri, polietilen tereftalat (PET) veya naylon iplikler üzerine PPy veya PANi ince filmler biriktirilerek üretilebilmektedir. Bu ipliklerden elde edilen kumaşlar amonyak ve

azot dioksit gazlarını algılamak için gerekli ortamlarda kullanılmaktadırlar. PANi esaslı optik lif hidrojen klorür ve amonyum hidroksite maruz kaldığında ışığı soğurması değişmektedir. Tek duvarlı karbon nanotüp iplik kompozitler, kanın ana proteini olan albumin dahil olmak üzere, amonyum hidroksit, etanol, piridin ve trietilamin gibi amin açığa çıkaran bileşikleri ayırt edebilmektedir. Gaz sensör özelliklerine sahip kumaşların üretiminde, tekstil ürününün gaza duyarlı bir tabaka ile kaplanması ve gaza duyarlı nanoliflerin bir kumaşa dahil edilmesi en çok kullanılan yöntemlerdendir (Erol ve Çetiner, 2017).

Polimerik esaslı nem sensörleri, rezistif ve kapasitif olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. İlki, iletkenliğini değiştirerek nem değişimine tepki verirken; ikincisi dielektrik sabitini değiştirerek su buharına tepki vermektedir. PEDOT-PSS/PAN nanolif kumaşa dayalı nem sensörleri, elektro çekim yöntemiyle hazırlanan PAN nanolif yüzeyin daldırma kaplamasıyla üretilmiş ve cihaz neme maruz kaldıkça PAN çözelti konsantrasyonunun dinamik testte neme karşı tepkileri üzerindeki etkisi izlenmiştir (Panapoy, Singsang ve Ksapabutr, 2010). İletken polimerik esaslı nem sensörleri elektriksel iletkenliklerini değiştirerek nem değişikliklerine tepki vermektedir. Nem sensör özelliği gösteren bu yüzeyler daha sonra kumaş yapısına dahil olabilmektedir (Erol ve Çetiner, 2017).

Tokyo Üniversitesi'nden uluslararası bir ekibin çalışmaları sonucunda, büküldükten sonra deforme olmayan esnek basınç sensörleri geliştirilmiştir. Bu esnek basınç sensörleri, karbon nanotüplere grafen entegre edilerek üretilen nanoliflerden üretilmiştir. Araştırmacılar, esnek polimer karbon nanotüplere grafen ekleyerek 300-700 nm arasında değişen çaplarda nanolifler üretmişlerdir. Elde edilen nanoliflerin, üzerlerine uygulanan basıncı da yer değiştirerek absorbe edebildiği ve bu sayede basınç sensörlerinin uzun süre kullanılmasını sağladığı görülmüştür Bu malzeme sayesinde aynı anda 144 noktanın basıncını ölçmek hatta sekiz mikrometre kalınlığında bir yuvarlak yüzeyin basınç dağılımını ölçmek dahi mümkün hale gelmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Basınç sensörü (Anonim 2016b)

Elektrokimyasal DNA biyosensörler nükleik asitlerdeki biyolojik tepkileri elektriksel sinyallere çevirerek görüntülenmesini sağlayan metotlar veya cihazlardır. PPy ve PANi gibi iletken polimerlerin DNA biyosensörlerin yapısında kullanılması sensörlerin yapısı ve performanslarına olumlu katkıları yapılan çalışmalardan görülmüştür. Gerek saf PANi ve gerekse başka materyallerin katılımıyla üretilen PANi'in DNA sensörlerde kullanımı üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur. Chang, Yuan, Shi ve Guan (2007) tarafından yapılan bir çalışmada iletken PANi nanotüpler üretilmiş ve elektrokimyasal DNA biyosensörlerde sinyal verimliliğini arttırmada kullanılmıştır. PANi nanolif ve çok duvarlı karbon nanotüp kompozit yapıların DNA biyosensörlerinde DNA kod dizisinin elektrokimyasal olarak belirlenmesi için kullanılması, yapılan çalışmalar sonucunda mümkün olmuştur (Yang, Zhou, Zhang, Jiao ve Li, 2009).

Optoelektronik uygulamalar: Nanopartiküllerin ve nano yapıların ışığın soğrulmasını artırdığı literatür çalışmalarından bilinmektedir. Bu amaçla nanoteknoloji uygulamalarının fizik, kimya, biyolojik bilimlerden başka, elektronik ve enerji bilimleri gibi birçok alanda da kullanımı büyük oranda artmıştır.

Nanopartiküllerin güneş pilinin performansını geliştirme üzerine yapılan araştırmalar sonucunda, kuantum noktaları, altın ya da gümüş nanopartiküller ve floresan nanoliflerin çoğu zaman güneş pillerinin performansını arttırdığı görülmüştür (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Güneş pili (Kocakuşak, 2018, Şekil 3.16'dan değiştirilerek alınmıştır)

Bu tür nanopartiküllerin ortak yönü, optik özellikleridir. Bu tür nanopartiküller, floresan özelliklerinden dolayı şekillerine ve ölçeğine bağlı olarak, çeşitli dalga boylarını soğurabilir ve hemen sonra başka bir dalga boyundan yada orijinal dalga boyundan ışınım formunda soğurulan enerjiyi özgür bırakabilir (Jadhav, Todkar, Gambhire ve Sawant, 2011).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada iletken olmayan polimer çözeltileri içerisinde iletken madde katkısı yapılarak iletken ve saydam nanoliflerin elektro çekim ile eldesi incelenmiştir. Bu kapsamda kullanılan materyal ve yöntemler detaylı olarak sunulmuştur.

3.1. Materyal

Çalışmada PAN/karbon siyahı ve PCL/karbon siyahı katkılı nanoliflerin üretiminde şablon polimer olarak PAN (Mn: 200-240 kDa) ve PCL (Mn: 80.000 Da, Sigma Aldrich); iletken partikül olarak toz halde karbon siyahı (<100 nm, Nanografi); çözeltilerin hazırlanmasında çözücü olarak kloroform, diklorometan (DCM) ve DMF kullanılmıştır. Kimyasallar herhangi bir işlem uygulanmadan kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında öncelikle katkısız nanolifler üretilerek optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Bu amaçla farklı konsantrasyonlarda polimer içeren çözeltiler hazırlanmıştır ve en düzgün nanolif üretimine imkân veren polimer konsantrasyonlarına karbon siyahı katkısı yapılmıştır. Karbon siyahı katkısı yapılırken, polimer çözeltileri içerisinde farklı oranlarda karbon siyahı eklenmiştir. Artan karbon siyahı konsantrasyonu düze tıkanmasına ve üretimde kesintilere neden olduğundan optimum karbon siyahı oranı belirlenmiştir ve çalışmalara belirlenen oranla devam edilmiştir.

PAN polimeri DMF içerisinde çözünmektedir. PCL polimeri için ise kloroform, DMF veya DCM gibi farklı çözücüler kullanılabilir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında çözücü etkisini görmek amacı ile PCL çözeltileri hazırlanırken iki farklı çözücü sistemi kullanılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan bütün çözeltiler, katkı ve çözücü sistemleri Çizelge 3.1’de verilmiştir:

Çizelge 3.1. Tez çalışmasında hazırlanan bütün polimer/çözücü sistemleri

Polimer	Polimer Konsantrasyonu (%)	Çözücü	Katkı Maddesi	Katkı Maddesi Oranı (%)	Nanolif Üretilirliği
PAN	6	DMF	-	-	+
PAN	7	DMF	-	-	+
PAN	8	DMF	-	-	+
PAN	10	DMF	-	-	+
PAN	7	DMF	Karbon siyahı	1	+
PAN	7	DMF	Karbon siyahı	1,5	-
PAN	7	DMF	Karbon siyahı	2	-
PCL	10	Kloroform:DMF	-	-	+
PCL	10	DMF:DCM	Karbon siyahı	1	+
PCL	15	Kloroform:DMF	-	-	-
PCL	15	DMF:DCM	Karbon siyahı	1	-

3.2.1. Katkılı ve katkısız elektro çekim çözeltilerinin hazırlanması

Katkısız PAN ve PAN/karbon siyahı çözeltilerinin hazırlanması: Bu aşamada öncelikle katkısız PAN nanoliflerin elektro çekim yöntemiyle üretilirliğini araştırmak amacıyla parametre çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda, çözelti içinde ağırlıkça %6, %7, %8 ve %10 oranında PAN içeren çözeltiler DMF içerisinde, manyetik karıştırıcı kullanılarak 75 °C’de 4 saat karıştırılarak hazırlanmıştır.

Daha sonra yapılan yüzey analizleri sonrası, ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltiden en uygun nanolifli yüzeylerin elde edilebildiği görülmüştür. Bu nedenle karbon siyahı katkısı sadece ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltilere yapılmıştır.

Karbon siyahı, %7 oranında PAN içeren çözeltilere polimer konsantrasyonunun %1; %1,5 ve %2’si oranında ilave edilmiştir. PAN/karbon siyahı nanolifli yüzeylerin elektro çekim ile üretiminde, özellikle %1,5 ve %2 oranındaki karbon siyahı katkılarında,

düzelerin tıkanması, üretimin sürekli olmaması gibi durumlarla karşılaşmıştır. Bu nedenle optimum karbon siyahı katkısı elektro çekim sırasında sorunsuz çekilebilmesi nedeniyle %1 olarak belirlenmiştir.

Katkısız PCL ve PCL/karbon siyahı çözeltilerinin hazırlanması: Bu aşamada öncelikle katkısız PCL nanoliflerin üretimi için parametre çalışması yapılmıştır. Bu amaçla ağırlıkça %10 ve %15 oranında PCL içeren çözeltilerin hazırlanması için (DMF:DCM) (60:40) ve (DCM:kloroform) (60:40) olarak iki farklı çözücü sistemi kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltiler, manyetik karıştırıcı kullanılarak 40 °C’de tamamen çözününceye kadar bekletilmiştir.

Elektro çekim işlemi esnasında, ağırlıkça %10 oranında PCL içeren çözeltilerle çalışıldığında çekim işleminin kesintisiz devam ettiği ve en uygun nanolifli yüzeylerin elde edilebildiği görülmüştür. Bu nedenle karbon siyahı katkısı sadece ağırlıkça %10 oranında PCL içeren çözeltilere yapılmıştır.

Karbon siyahı katkısı için PCL çözeltilerine farklı karbon siyahı oranları denenmiştir. Ancak, elektro çekim işlemi esnasında sorunsuz lif üretimine imkân veren oran %1 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, iki farklı çözücü sistemi ile hazırlanan ağırlıkça %10 oranında PCL içeren çözeltiler içerisinde %1 oranında karbon siyahı katkısı yapılarak çalışmalara devam edilmiştir.

Hem PAN hem de PCL kullanılarak hazırlanan bütün çözeltilerde, katkı maddelerinin çözelti içerisinde homojen olarak dağılması için, hazırlanan çözeltiler önce 30 dakika ultrasonik banyoda daha sonra, 2 dakika süresince homojenizatörde (OV5 Homogenizer, Velp Scientifica) karıştırılmış ve sonrasında elektro çekim işlemine geçilmiştir.

3.2.2. Elektro çekim ile nanolifli yüzeylerin üretilmesi

Bu çalışmada kullanılan elektro çekim düzeneği (Inovenso); iğne, besleme pompası, toplama yüzeyi ve yüksek voltaj kaynağından oluşmaktadır (Şekil 3.1).



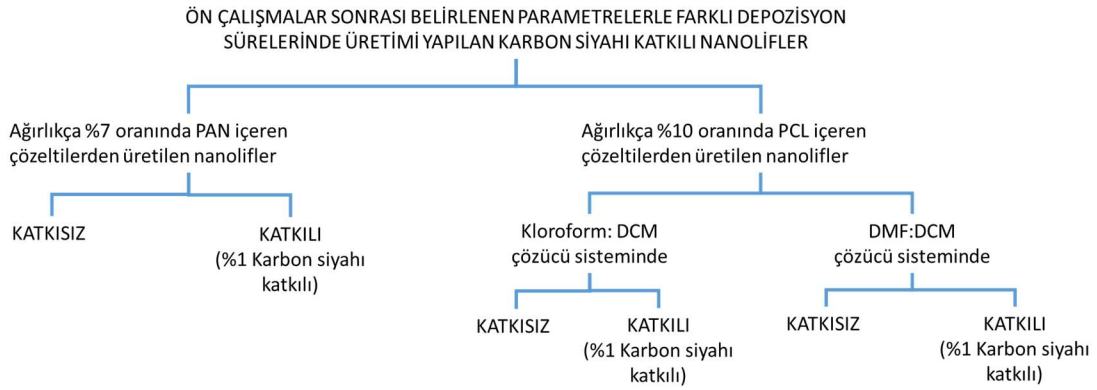
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan elektro çekim düzeneği

Toplama yüzeyi olarak nanoliflerin paralel olarak toplanmasını ve kısmen incelmelerini sağlamak amacıyla döner silindir kullanılmıştır. Polimer çözeltisi elektriksel olarak yüklenmiş ve çekilmiştir. Ayrıca, elde edilen nanoliflerin saydamlık özelliklerinin incelenebilmesi amacıyla toplama silindiri üzerine bir cam lam yerleştirilerek 1-10 dakika arasında değişen sürelerde nanolifli yüzeyler toplanmıştır. Elektro çekim esnasında kullanılan parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Üretimler esnasında kesintisiz ve düzgün elektro çekime imkân veren parametreler kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Proje kapsamında hazırlanan çözeltilerin elektro çekim parametreleri

Numune	Besleme Oranı (ml/saat)	Voltaj (kV)	Mesafe (cm)	Silindir Hızı (devir/dk)	Üretilebilirlik
PAN %6	1	14	15	100	+
PAN %7	1	14	15	100	+
PAN %8	1	14	15	100	+
PAN %10	1	14	15	100	+
PAN (%7)/karbon siyahı(%1)	0,8	10	17	100	+
PAN (%7)/karbon siyahı(%1,5)	-	-	-	-	-
PAN (%7)/karbon siyahı(%2)	-	-	-	-	-
PCL %10 (Kloroform:DCM)	1	15	14	100	+
PCL %10 (DMF:DCM)	1	15	14	100	+
PCL %15 (Kloroform:DCM)	1	15	14	100	-
PCL %15 (DMF:DCM)	1	15	14	100	-
PCL/karbon siyahı(%1) (Kloroform:DCM)	0,7	20	19	100	+
PCL/karbon siyahı(%1) (DMF:DCM)	0,7	20	16,5	100	+

Farklı polimer konsantrasyonları ve farklı karbon siyahı katkı oranları içeren çözeltilerin elektro çekim ile üretilebilirliği araştırıldıktan sonra, en uygun polimer konsantrasyonu ve katkı oranı belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen bu oranlarla 1-10 dakika arasında değişen depozisyon sürelerinde cam lam üzerine nanolif üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu numunelerin görsel, yüzey, elektriksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2’de ön çalışmalarda belirlenen polimer konsantrasyonu ve karbon siyahı katkıları ile üretimi gerçekleştirilen nanoliflerin üretim şemasını göstermektedir.



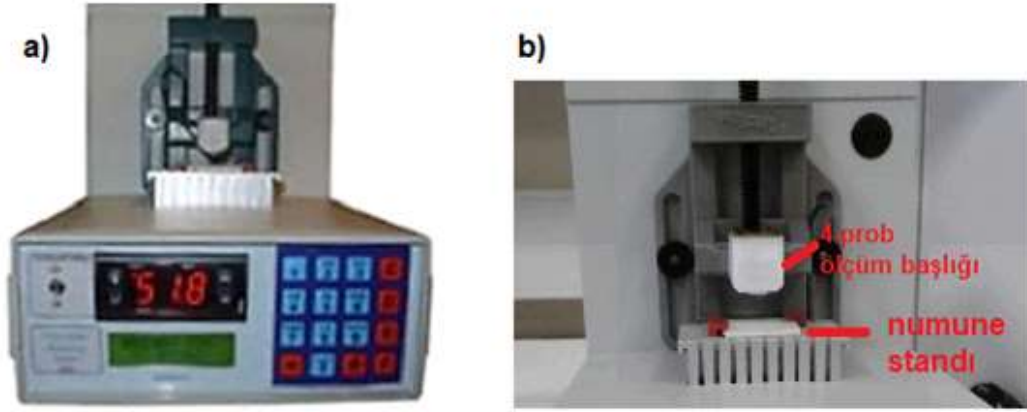
Şekil 3.2. Tez kapsamında farklı depoziyon sürelerinde üretimi yapılan karbon siyahı katkıli iletken nanoliflerin üretim şeması

3.2.3. Nanolifli yüzeylerin karakterizasyonu

Görsel Değerlendirme: İletken ve saydam nanolif yüzeylerin eldesi için 1-10 dakika arasında değişen depoziyon sürelerinde karbon siyahı katkıli nanolifler elektro çekim yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numunelerin görsel analizi için, numuneler B.U.Ü. logosu üzerine yerleştirilerek Canon marka kamera ile görüntülenmiştir.

Yüzey karakterizasyonu: Katkısız ve karbon siyahı katkıli iletken nanolifli yüzeylerin çap, çap dağılımı ve yüzey özellikleri gibi özellikleri hakkında bilgi edinmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. SEM analizleri B.U.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi'nde bulunan Carl Zeiss Evo 40 model cihazda gerçekleştirilmiştir.

Elektriksel karakterizasyon: 1-10 dakika arasında değişen depoziyon sürelerinde cam lam üzerine üretilen numunelerin karbon siyahı katkıli iletken nanolifli yüzeylerin elektriksel karakterizasyonu B.U.Ü. Tekstil Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan dört-nokta prob sistemi (FPP 470-Entek Elektronik) ile yapılmıştır. Kullanılan cihazın görüntüsü ve numune standı Şekil 3.3a ve 3.3b'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Dört-nokta prob sistemi; a) cihazın genel görünümü, b) numune standı

Optik karakterizasyon: İletken ve saydam nanolifli yüzeylerin optik karakterizasyonu, saydamlık ölçümleri yardımı ile yapılmıştır. Bu amaçla 1 dakikadan 10 dakikaya kadar farklı depozisyon sürelerinde üretilen karbon siyahı katkılı numuneler, B.U.Ü. Fizik Bölümü'nde bulunan UV-vis spektrofotometresi (Shimadzu- UV 2600) ile 0.1 nm çözünürlükte 200-800 nm dalga boyunca incelenmiş ve her bir numune için görünür bölge olan 380-750 nm aralığı değerlendirilmiştir.

3.2.4. Karbon siyahı katkılı iletken nanolifli yüzeylerin optoelektronik özelliklerinin belirlenmesi

Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PAN/karbon siyahı ve iki farklı çözücü sistemi ile üretilen PCL/karbon siyahı katkılı yüzeylerin optoelektronik özellikleri “figure of merit” (Φ_{TC}) değerlerinin hesaplanması ile belirlenmiştir.

Farklı depozisyon sürelerinde üretilen numunelerden elde edilen veriler, artan depozisyon süreleri ile nanolif sayısının arttığını, levha direncinin ve saydamlığın ise azaldığını göstermiştir. Levha direnci ve saydamlık arasında iyi bir denge olmalıdır. Bu denge, “figure of merit” (Φ_{TC}) ile tanımlanır.

“Figure of merit”, saydam ve iletken elektrotların performansını anlamak açısından önemlidir ve formül 4.1’de verilen denklem ile hesaplanır.

$$\Phi_{TC} = \frac{T^{10}}{R_S} \quad (4.1)$$

Burada Φ_{TC} “figure of merit” değerini; T, 550 nm’deki saydamlık (geçirgenlik) değerini, R_S ise levha direncini ifade etmektedir (Haacke, 1976; Kim ve diğerleri, 2007).

Φ_{TC} değeri ile üretilen nanolifli yüzeylerin optoelektronik performansı belirlenebilir. Yüksek Φ_{TC} değeri, performansı yüksek saydam ve iletken elektrotu ifade eder.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. PAN nanoliflerin karakterizasyonu sonuçları

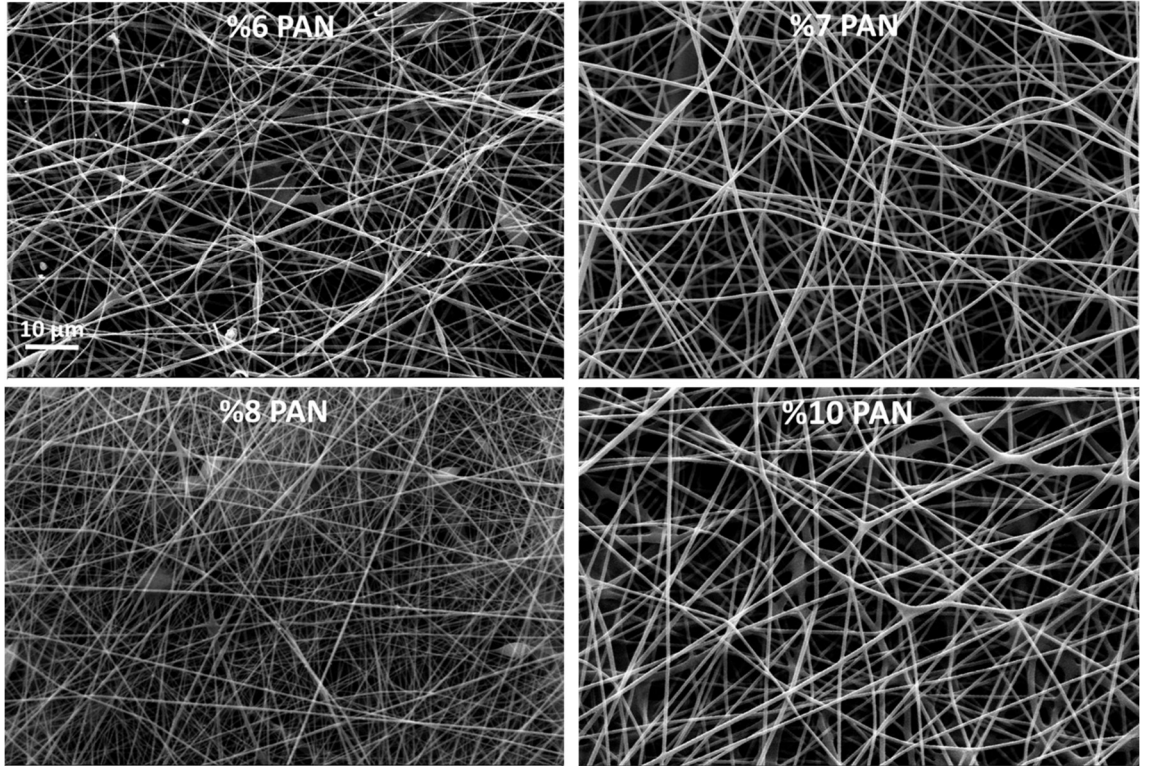
4.1.1. Katkısız PAN nanoliflerin yüzey karakterizasyonu sonuçları

Ağırlıkça farklı oranlarda PAN içeren çözeltilerin karakterizasyonu sonrası elektro çekim ile üretilmeye başlanmıştır. Çözelti özellikleri ve proses parametreleri üretilen nanolif özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Çözelti özellikleri denildiğinde, akla ilk olarak elektro çekim ile lif çekimini etkileyen en önemli parametre olan çözelti viskozitesi gelir. Çözelti viskozitesi çözelti içindeki polimerin zincir karışıklığı ile ilgilidir. Çözelti içindeki polimer miktarı veya zincir uzunluğu arttıkça çözelti viskozitesi artar. Düşük viskoziteli çözeltilerden elde edilen nanolifler ince fakat üniform olmayan, boncuklu yüzeyler oluştururlar. Çözelti viskozitesinin artması daha üniform ve kalın liflerin üretilmesine neden olur. Viskozitenin çok fazla artması ise polimer çözeltisinin düzeye pompalanmasında ve lif çekiminde problemlere neden olur (Ramakrishna ve diğerleri, 2005).

Şekil 4.1’de PAN nanolifli yüzeylerin SEM analiz sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.1’de ise PAN nanoliflerin çap değerleri ve dağılımları gösterilmektedir. Görüntüler ve çap değerleri incelendiğinde polimer konsantrasyonu arttıkça, çap kalınlığının arttığı gözlenmiştir. Bu Polimer konsantrasyonunun artması çözelti viskozitesini artırır ve dolayısıyla çap artar. Ağırlıkça %6 oranında PAN içeren çözeltilerden üretilen numunelerde düşük viskozite nedeniyle yer yer boncuklanma vardır. Numunelerin yüzey özellikleri iyi değildir. Artan polimer konsantrasyonu ile birlikte yüzey özelliklerinde iyileşmeler olmakla birlikte en iyi yüzey özellikleri ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltilerden elde edilen yüzeylerde görülmüştür. Ağırlıkça %8 ve %10 oranında PAN içeren çözeltilerden elde edilen yüzeylerde viskozitenin çok fazla artması kesikli üretime, polimerin düzeden pompalanmasında zorluklar ve artan çaplara neden olmuştur.

Nanoliflerden beklenti düşük çaplı ve düzgün yüzeyle olmalarıdır. SEM analiz sonuçlarına göre en ince çap değerlerine ağırlıkça %6 oranında PAN içeren çözeltilerden üretilen numunelerde ulaşılmasına rağmen, bu konsantrasyonda düzgün yüzeyler oluşturulamaması ve üretim esnasında zorluklar yaşanması nedeniyle, çalışmalara en iyi yüzey özelliklerine sahip olan numunelerin üretildiği ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltiler ile devam edilmesine karar verilmiştir. Ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltilerden elde edilen nanoliflerin ortalama lif çapı 530 nm'dir ve bu yüzeylerde nanolif çapı dağılımı dar bir aralıkta değişmektedir. Bu nedenle, karbon siyahı katkısı ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltilere yapılmıştır.



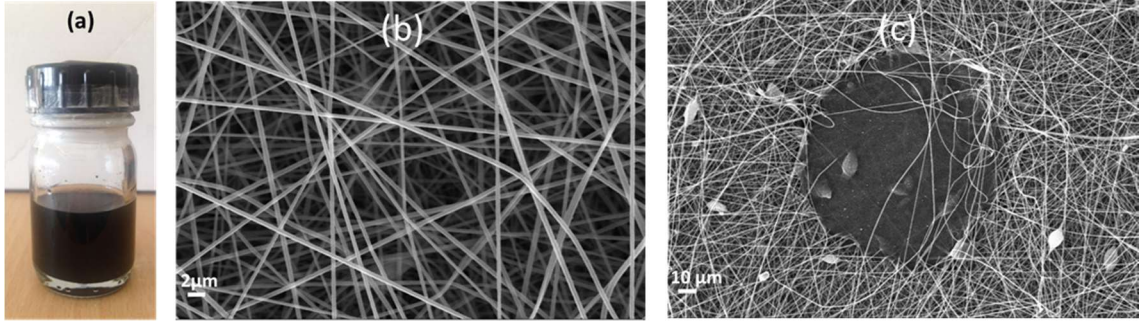
Şekil 4.1. Ağırlıkça a)%6, b)%7, c)%8, d)%10 PAN içeren çözeltilerden elde edilen nanoliflerin SEM görüntüleri

Çizelge 4.1. Katkısız ve katkılı PAN nanoliflerin çap değerleri ve dağılımları

Polimer konsantrasyonu	Çap (nm)	CV (%)
%6 PAN	463	38,04
%7 PAN	530	13,62
%8 PAN	543	37,83
%10 PAN	725	39,48
%7 PAN/karbon siyahı (%1)	630	22,38

4.1.2. Karbon siyahı katkılı PAN nanoliflerin yüzey karakterizasyonu sonuçları

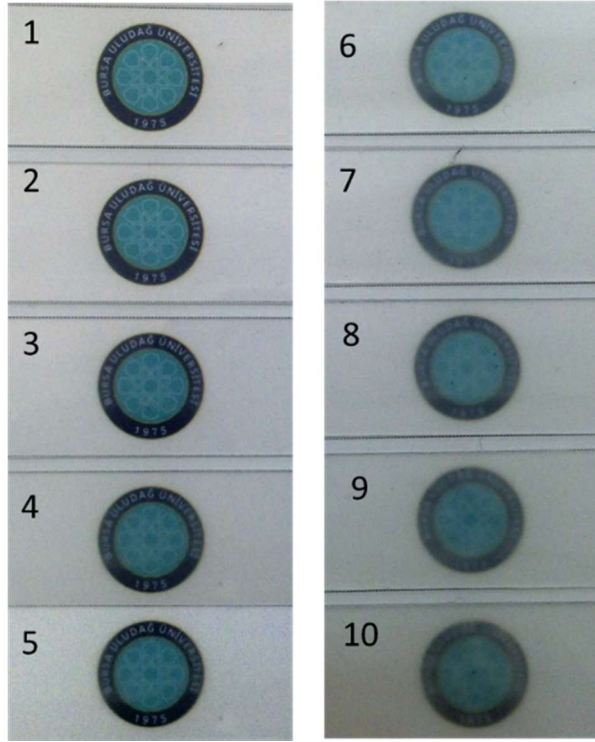
Şekil 4.2’de içerisinde polimer ağırlığının %1’i kadar karbon siyahı içeren PAN çözeltisinin görüntüsü ve elektro çekim ile üretilen PAN/karbon siyahı katkılı yüzeylerin genel SEM görüntüsü verilmiştir. Çözelti hazırlama aşamasında karbon siyahının eklenmesi ile birlikte çözelti rengi beklediği üzere siyah renge dönmüştür. Bu aşamada karşılaşılan en büyük zorluk karbon siyahının dibe çökme eğilimi göstermiş olmasıdır. Karbon siyahı katkısı ile nanolif çaplarında bir miktar artış olmuş ve ortalama lif çapı 630 nm olarak belirlenmiştir. Nanoliflerin yapı içerisinde rastgele yerleşim gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.2.b). Eklenen karbon siyahının partikül çapları çok küçük olduğundan SEM görüntülerinde nanolifler içerisindeki katkı görülmemektedir. Fakat SEM görüntülerinde yüzeylerin üzerinde bazı noktalarda, lif formuna geçememiş çözelti kalıntıları tespit edilmiştir (Şekil 4.2.c). Bu durumun karbon katkısının çözelti içerisinde bir araya gelerek topaklanması ve dibe çökmesi nedeniyle olabileceği düşünülmektedir. Ancak lif çaplarındaki artış ve iletkenlik elde edilmesi karbon siyahının yapıdaki varlığını işaret etmektedir.



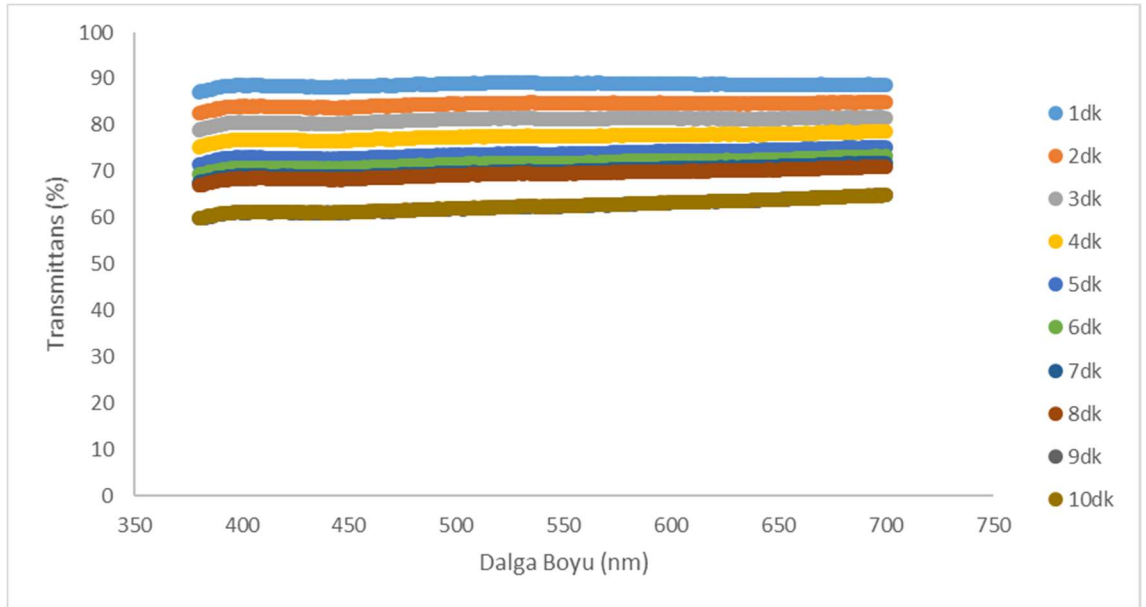
Şekil 4.2. a) PAN/Karbon Siyahı çözeltisi, b) PAN/Karbon Siyahı nanoliflerin SEM görüntüsü, c) PAN/Karbon Siyahı nanolifler üzerindeki kalıntıların SEM görüntüsü

4.1.3. Karbon siyahı katkılı PAN nanolifli yüzeylerin elektriksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu sonuçları

Saydam yüzey eldesi için karbon siyahı katkılı çözeltilerden nanolif üretimi cam lamlar üzerine 1-10 dakika değişen sürelerde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3’de değişen sürelerde üretilen nanolifli yüzeylerin görsel değişimi ve Şekil 4.3’de yüzeylerin optik saydamlık (geçirgenlik, transmittans) grafikleri gösterilmektedir. Şekil 4.4’de ise yüzeylerin optik saydamlık değerleri verilmektedir. Beklendiği üzere artan depozisyon süresi ile birim alandaki lif miktarı artmış ve yüzeylerin saydamlık (geçirgenliği) azalmıştır. En yüksek saydamlık 1 dakika depozisyonda (~89), en düşük saydamlık ise 9 ve 10 dakika depozisyonda (~63) elde edilmiştir. Genel görünüm olarak lifler grimsi bir renk göstermektedir. Liflerin koyu siyah bir renk göstermemesinin ince çaplı liflerden oluşması ve ışığı yansıtması ile ilgili olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 4.3. PAN/Karbon Siyahı katkılı yüzeylerin görsel değerlendirmesi



Şekil 4.4. PAN/karbon siyahı katkılı yüzeylerin optik saydamlık grafiği

Çizelge 4.2’de numunelerin elektriksel karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Artan depozisyon süresi ile numunelerin levha direncinde düşüş olmuştur. Levha direncindeki düşüş elektriksel iletkenlikteki artışı işaret etmektedir. En düşük levha direnci 197 k Ω ile 10 dakika depozisyon yapılan numunelerde, en yüksek levha direnci 455 k Ω ile 1 dakika depozisyon yapılan numunelerde elde edilmiştir.

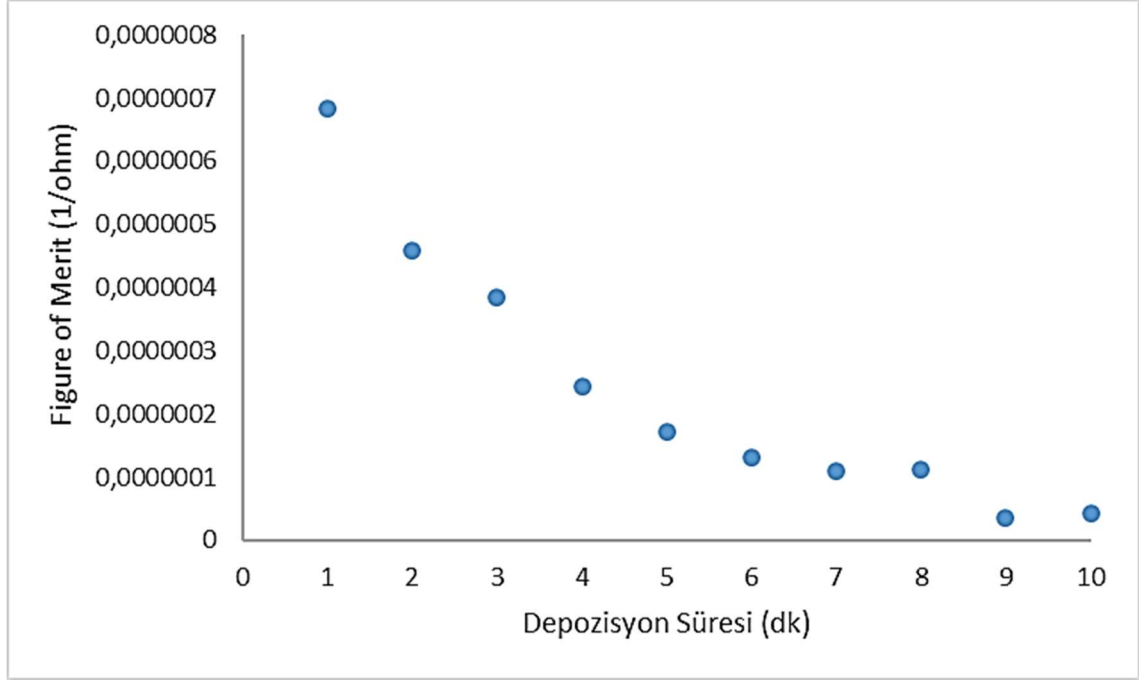
Çizelge 4.2. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PAN/ karbon siyahı nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik özellikleri

Depozisyon Süresi (dk)	Levha Direnci (Rs) (k Ω /sq)	Optik Saydamlık (T) (%)	Figure of Merit (Φ_{TC}) (1/ Ω)
1	455	88,70	6,835 x 10 ⁻⁷
2	406	84,45	4,593 x 10 ⁻⁷
3	326	81,10	3,838 x 10 ⁻⁷
4	317	77,48	2,440 x 10 ⁻⁷
5	269	73,78	1,718 x 10 ⁻⁷
6	269	71,72	1,309 x 10 ⁻⁷
7	246	70,02	1,085 x 10 ⁻⁷
8	224	69,42	1,127 x 10 ⁻⁷
9	230	62,49	3,613 x 10 ⁻⁸
10	197	62,54	4,264 x 10 ⁻⁸

1-10 dakika arasında değişen depozisyon sürelerinde üretilen karbon siyahı katkılı PAN nanoliflerin yüzey, elektriksel ve optik karakterizasyonundan sonra, numunelerin optoelektronik özelliklerini belirlemek amacıyla “figure of merit” (Φ_{TC}) değerleri hesaplanmıştır. “Figure of merit” kavramı levha direnci ve saydamlık arasındaki ilişkiyi tanımlar ve yüksek “figure of merit” değeri yüksek performanslı elektrotu ifade eder.

Farklı depozisyon sürelerinde üretilen karbon siyahı katkılı PAN nanoliflerin optoelektronik karakterizasyonu yapıldığında, en yüksek Φ_{TC} değerine 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunelerle ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 4.5, Tablo 4.2.). Bu durum,

saydamlık ve levha direnci göz önüne alındığında en iyi performansa 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunenin sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PAN/karbon siyahı nanolifli yüzeylerin Φ_{TC} değerleri

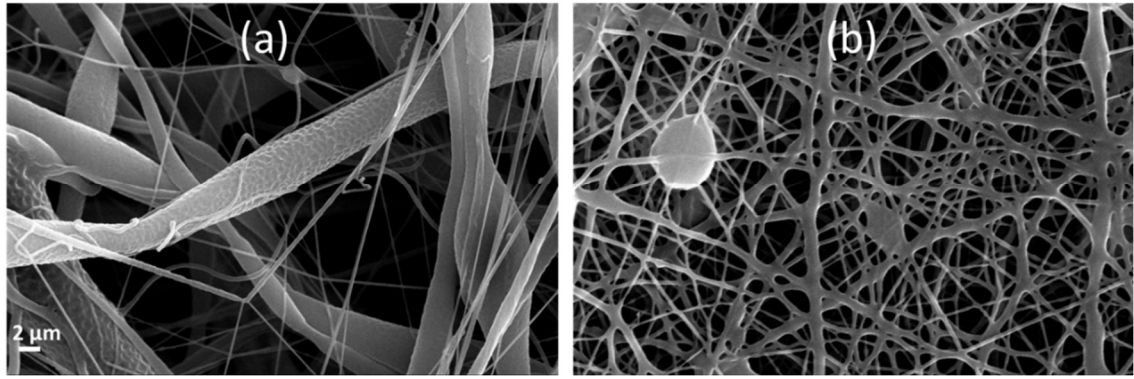
4.2. PCL nanoliflerin karakterizasyonu sonuçları

4.2.1. Katkısız PCL nanoliflerin yüzey karakterizasyonu sonuçları

Ağırlıkça %10 ve 15 oranlarında PCL içeren çözeltilerin karakterizasyonu sonrası elektro çekim ile üretilmeye başlanmıştır. PCL için farklı çözücü sistemleri kullanılabilir. Çözücü sistemi farkını incelemek amacıyla PCL çözeltileri iki farklı çözücü sistemi (Kloroform:DCM ve DMF:DCM) kullanılarak hazırlanmıştır. Viskozite ölçümlerinde de görüldüğü gibi, artan polimer konsantrasyonu ile her iki çözücü sisteminde hazırlanan PCL çözeltilerinin viskozitesinde çok büyük artış gözlenmiştir. Bu artış ile birlikte elektrospinning prosesinde zorluklar ile karşılaşmıştır. %15 oranında PCL içeren çözeltiden elektrospinning yapılması sırasında düzelerde tıkanmalar, kesikli üretimler

gözenmiştir. Bu nedenle optimum PCL oranı olarak %10 seçilmiş ve katkı maddesi ekleme çalışmalarına bu oranla devam edilmesine karar verilmiştir. Şekil 4.6’da farklı çözücü sistemlerinde üretilmiş, iletken madde katkısı içermeyen, ağırlıkça %10 oranında PCL içeren çözeltilerden üretilen nanolifli yüzeylerin SEM görüntüleri verilmektedir.

Kloroform uçucu bir çözücüdür. Kloroform içeren çözücü sistemi ile hazırlanan çözeltilerden üretilen nanoliflerde viskozite değişimi daha fazladır. Bu çözücü sistemi ile hazırlanan çözeltilerden kalın çaplı nanolifler elde edilmiştir ve bu nanoliflerde çap dağılımı ve lif eksenli boyunca çap değişimi fazladır (Çizelge 4.3). DMF:DCM çözücü sisteminde üretilen nanolifler daha ince çaplıdır ve bu çözücü sisteminin daha düzgün yüzeyli nanolif üretimine imkan verdiği görülmüştür.



Şekil 4.6. Katkısız (a) PCL/DCM:Kloroform, (b) PCL/DMF:DCM nanoliflerin SEM görüntüleri

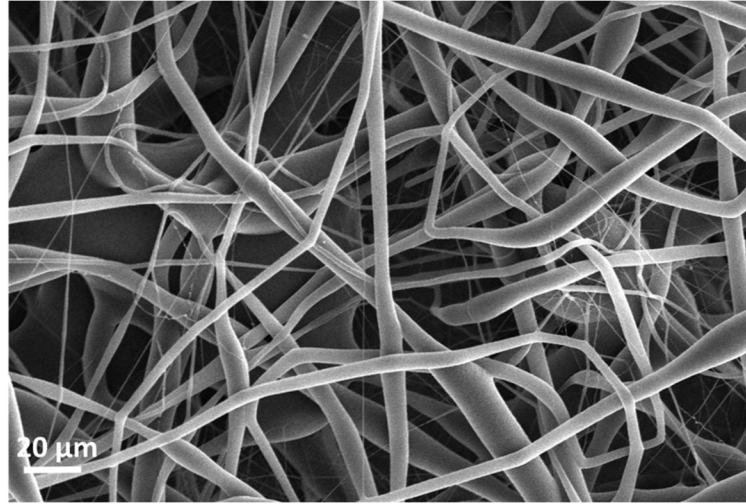
Çizelge 4.3. Katkısız ve katkılı PCL nanoliflerin çap değerleri ve dağılımları

Polimer konsantrasyonu	Çap (nm)	CV (%)
%10 PCL (Kloroform:DMF)- katkısız	$3,46 \times 10^3$	86,77
%10 PCL (DMF:DCM)- katkısız	308	40,77
%10 PCL/karbon siyahı (Kloroform:DMF)	$4,18 \times 10^3$	93,54
%10 PCL/karbon siyahı (DMF:DCM)	318	37,74

Katkısız nanolifli yüzeylerin elektro çekim ile üretimi tamamlandıktan sonra karbon siyahı katkısı yapılan yüzeylerin üretimi ve yüzey karakterizasyonu çalışmalarına geçilmiştir.

4.2.2. PCL/karbon siyahı (Kloroform:DCM) katkılı numunelerin yüzey karakterizasyon sonuçları

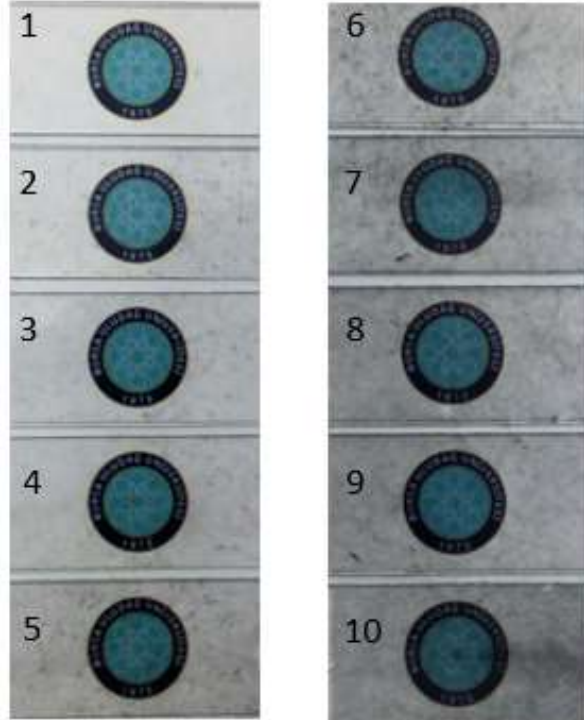
Şekil 4.7’de kloroform ve DCM çözücü sisteminde PCL’in çözündürülmesiyle hazırlanan içerisinde polimer ağırlığının %1’i kadar karbon siyahı içeren yüzeylerin genel SEM görüntüsü verilmiştir. Kloroform:DCM çözücü sistemi içerisinde karbon siyahı katkısı başarılı olarak yapılmış ve homojen bir süspansiyon elde edilmiştir. Ancak üretimler esnasında kloroformun çok uçucu olması nedeniyle zorluklar yaşanmıştır. Ortalama lif çapı $4,18 (\pm 3,91)$ mikron olarak bulunmuştur. Üretilen nanoliflerin üniform olmadığı, lif çaplarının lif eksenine boyunca çok farklılık gösterdiği, lif çap dağılımının çok geniş bir aralıkta olduğu görülmüştür (Şekil 4.7). Bununla birlikte yüzey üzerinde karbon siyahı içeren kalıntılar görünmemektedir.



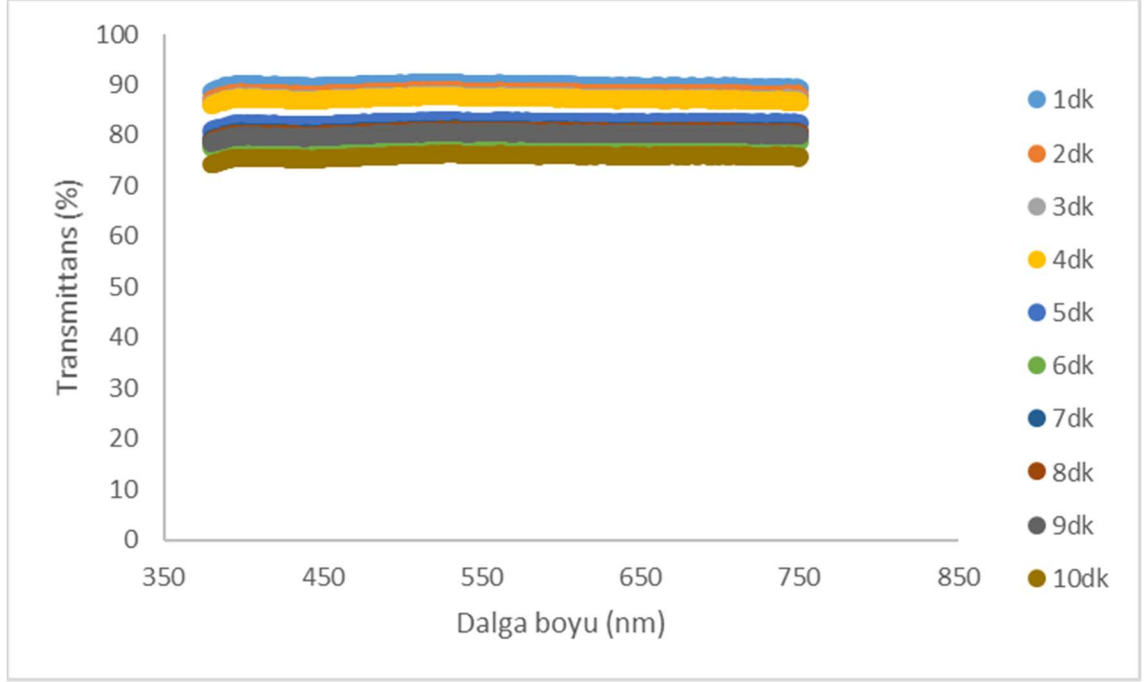
Şekil 4.7. PCL/karbon siyahı (%1) (kloroform:DCM) katkılı nanoliflerin SEM görüntüsü

4.2.3. PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) katkılı nanolifli yüzeylerin elektriksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu sonuçları

Şekil 4.8’de 1-10 dakika arasında değişen sürelerde üretilen nanolifli yüzeylerin görsel değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.9’da yüzeylerin optik saydamlık grafikleri, Çizelge 4.4’de ise yüzeylerin optik saydamlık değerleri verilmektedir. Beklendiği üzere artan depozisyon süresi ile birim alandaki lif miktarı artmış ve yüzeylerin saydamlık (geçirgenliği) azalmıştır. En yüksek saydamlık 1 dakika depozisyonda (~90), en düşük saydamlık ise 10 dakika depozisyonda (~75) elde edilmiştir. Kloroform:DCM çözücü sisteminde üretilen liflerin genel görüntüsü siyaha yakındır. Burada daha kalın çaplı liflerin elde edilmesi nedeniyle yapıların ışığı yansıtması farklı olmuş ve daha koyu renkli yüzeyler elde edilmiştir.



Şekil 4.8. PCL/karbon siyahı (kloroform: DCM) katkılı yüzeylerin görsel değerlendirmesi



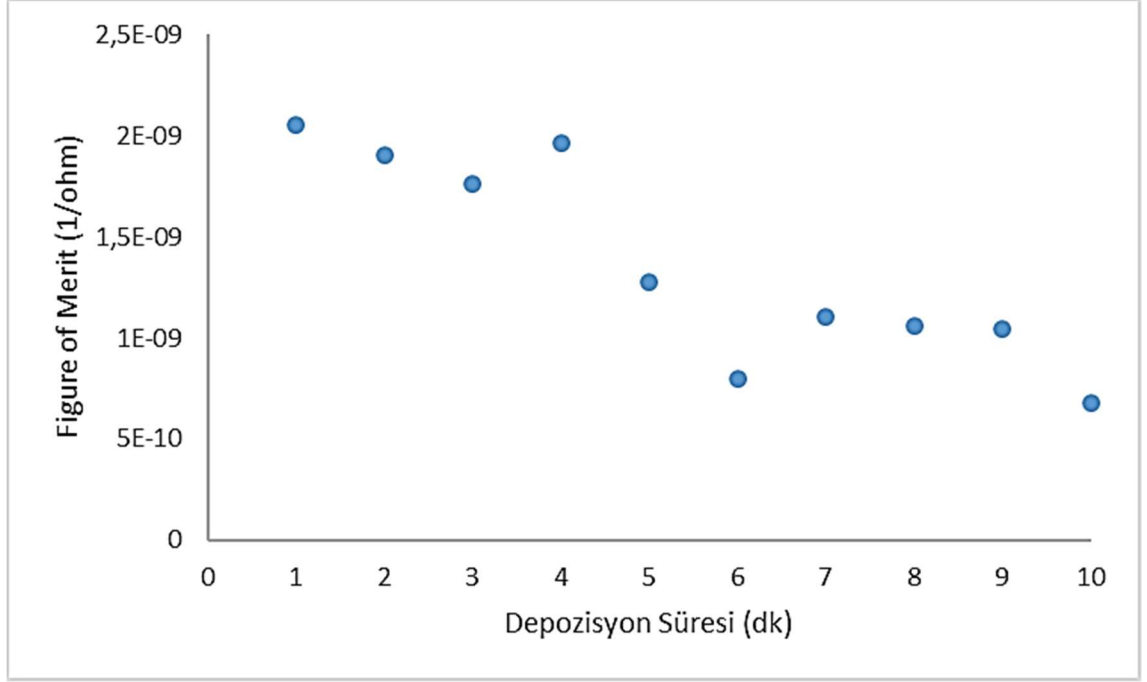
Şekil 4.9. PCL/karbon siyahı (%1) (kloroform:DCM) katkıli yüzeylerin optik saydamlık grafiği

Çizelge 4.4’de numunelerin elektriksel karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Artan depozisyon süresi ile numunelerin levha direncinde düşüş olmuştur. Levha direncindeki düşüş elektriksel iletkenlikteki artışa işaret etmektedir. En düşük levha direnci 94,56 MΩ ile 10 dakika depozisyon yapılan numunelerde, en yüksek levha direnci 174,45 MΩ ile 1 dakika depozisyon yapılan numunelerde elde edilmiştir. Ancak elde edilen elektriksel dirençlerin megaohm seviyelerinde olması karbon siyahı partiküllerinin yapı içerisinde düzgün bir ağ oluşturmadığını, yer yer kesintiler olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.4. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL/karbon siyahı (%1) (kloroform:DCM) katkılı nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik özellikleri

Depozisyon Süresi (dk)	Levha	Optik	Figure of Merit
	Direnci (Rs) (MΩ/sq)	Saydamlık (T) (%)	(Φ _{TC}) (1/Ω)
1	174,45	89,87	2,057 x 10 ⁻⁹
2	158,63	88,37	1,904 x 10 ⁻⁹
3	154,37	87,46	1,761 x 10 ⁻⁹
4	134,50	87,21	1,967 x 10 ⁻⁹
5	117,49	82,51	1,27 x 10 ⁻⁹
6	124,76	79,18	7,981 x 10 ⁻¹⁰
7	109,78	80,80	1,106 x 10 ⁻⁹
8	110,65	80,57	1,058 x 10 ⁻⁹
9	107,28	80,17	1,047 x 10 ⁻⁹
10	94,56	75,84	6,825 x 10 ⁻¹⁰

Farklı depozisyon sürelerinde üretilen numunelerin optoelektronik karakterizasyonu yapıldığında, en yüksek Φ_{TC} değerlerine 1,2 ve 4 dakika boyunca depozisyon yapılan numunelerle ulaşılmıştır (Şekil 4.10, Çizelge 4.4.). Bu durum, saydamlık ve levha direnci göz önüne alındığında en iyi performansa 1,2 ve 4 dakika boyunca depozisyon yapılan numunenin sahip olduğunu göstermektedir.

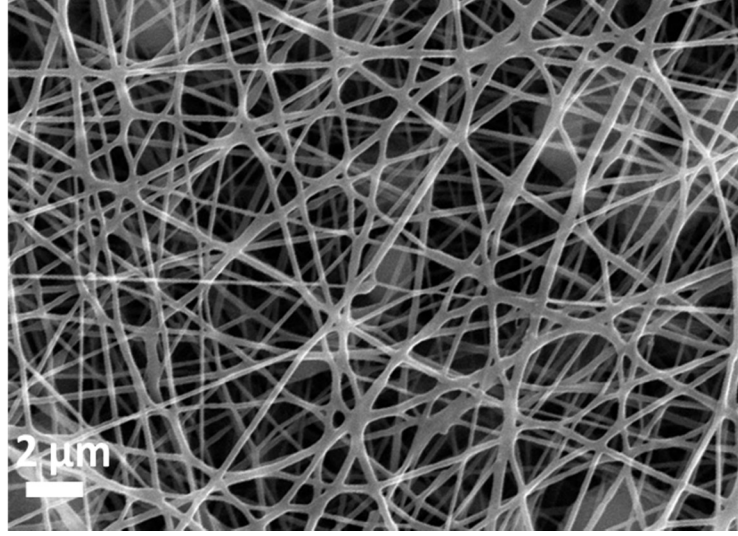


Şekil 4.10. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL/karbon siyahı (%1) (kloroform: DCM) nanolifli yüzeylerin Φ_{TC} değerleri

4.2.4 PCL/karbon siyahı (DMF: DCM) katkılı numunelerin yüzey karakterizasyon sonuçları

Şekil 4.11’de DMF ve DCM çözücü sisteminde PCL’in çözündürülmesiyle hazırlanan içerisinde polimer ağırlığının %1’i kadar karbon siyahı içeren yüzeylerin genel SEM görüntüsü verilmiştir. DMF ile hazırlanan çözeltilerde karbon siyahının çözelti içerisinde bir araya gelmesi ve dibe çökme eğilimi görülmüştür.

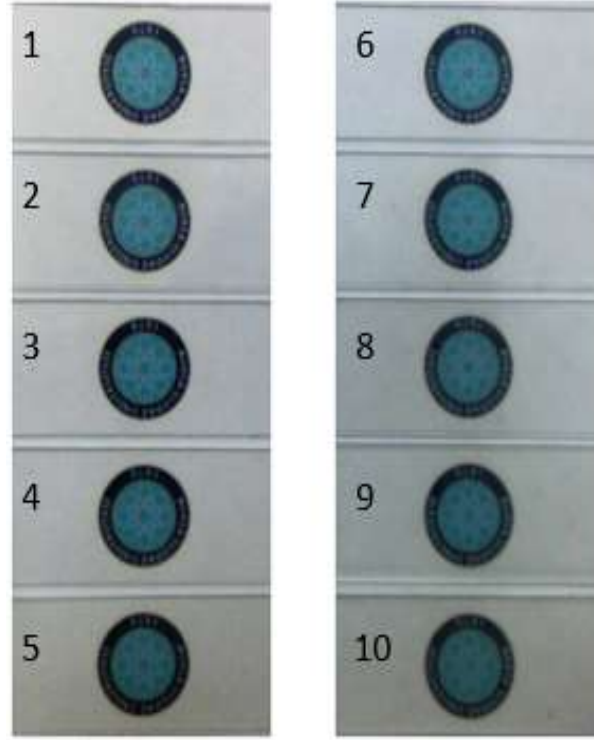
DMF ile hazırlanan çözeltilerden elde edilen liflerin çapları ortalama 318 ± 120 nm olarak belirlenmiştir. Nanolifler yapı içerisinde rastgele yerleşim göstermektedir ve lif çapları nanolif eksenine boyunca uniformdur (Şekil 4.11). Bununla birlikte yüzey üzerinde karbon siyahı içeren kalıntılar görünmemektedir.



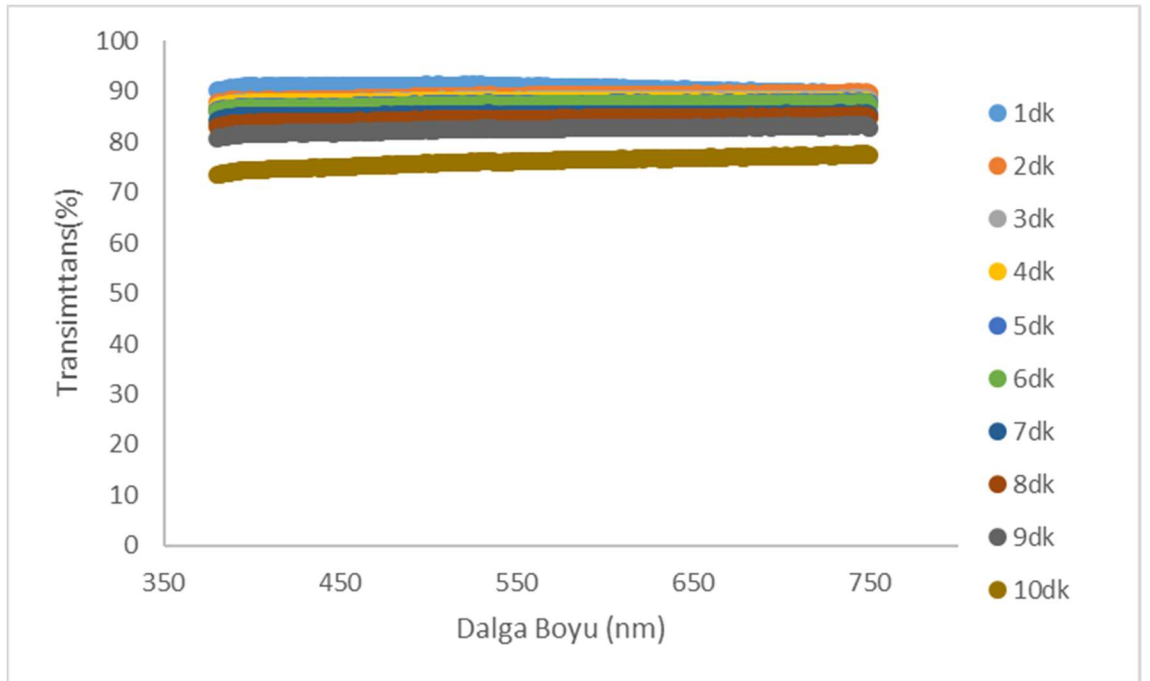
Şekil 4.11. PCL/karbon siyahı (DMF: DCM) katkıli nanoliflerin SEM görüntüsü

4.2.5. PCL/karbon siyahı (DMF: DCM) katkıli nanolifli yüzeylerin elektriksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonu sonuçları

Şekil 4.12’de 1-10 dakika arasında değişen sürelerde üretilen nanolifli yüzeylerin görsel değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.13 ve Çizelge 4.5’de ise yüzeylerin optik saydamlık grafik ve değerleri verilmektedir. Beklendiği üzere artan depozisyon süresi ile birim alandaki lif miktarı artmış ve yüzeylerin geçirgenliği (saydamlık) azalmıştır. En yüksek saydamlık 1 dakika depozisyonda (~90), en düşük saydamlık ise 10 dakika depozisyonda (~76) elde edilmiştir. Liflerin genel görüntüsü grimsi renktedir. Burada çok ince çaplı liflerin elde edilmesi nedeniyle yapıların ışığı yansıtması farklı olmuş ve daha açık renkli yüzeyler elde edilmiştir.



Şekil 4.12. PCL/karbon siyahı (DMF:DCM) katkıli yüzeylerin görsel değerlendirmesi



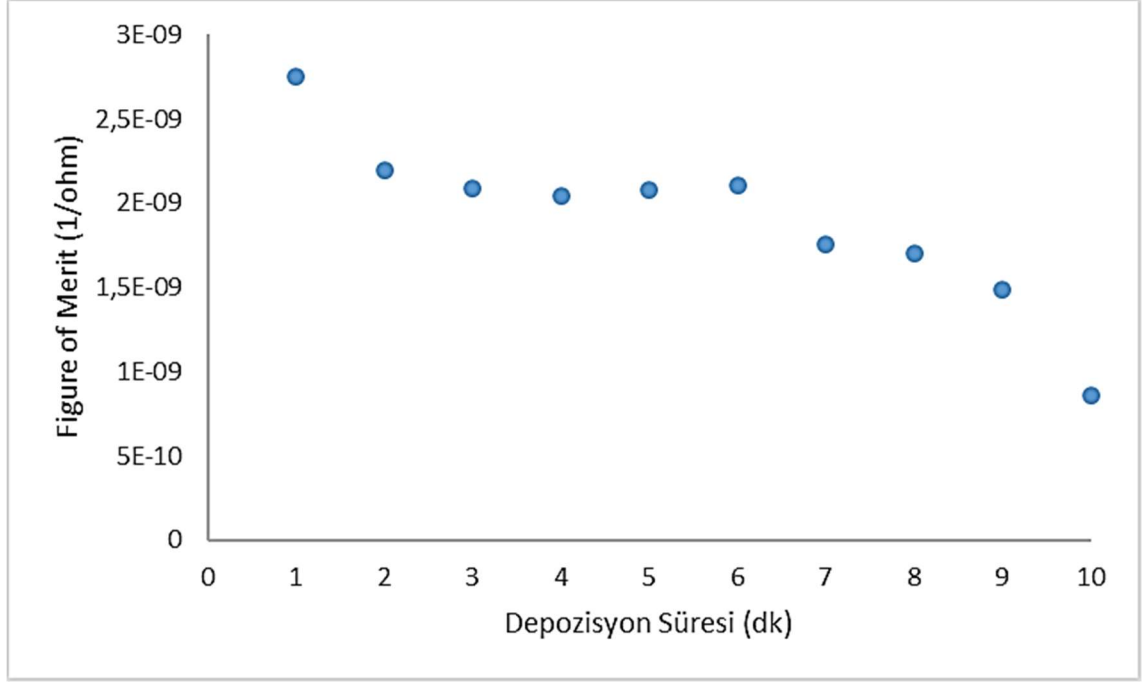
Şekil 4.13. PCL/karbon siyahı (%1) (DMF:DCM) katkıli yüzeylerin optik saydamlık grafiği

Çizelge 4.5’de numunelerin elektriksel karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Artan depozisyon süresi ile numunelerin levha direncinde düşüş olmuştur. Levha direncindeki düşüş elektriksel iletkenlikteki artışa işaret etmektedir. En düşük levha direnci 72,55 MΩ ile 10 dakika depozisyon yapılan numunelerde, en yüksek levha direnci 145,32 MΩ ile 1 dakika depozisyon yapılan numunelerde elde edilmiştir. Ancak elde edilen elektriksel dirençlerin megaohm seviyelerinde olması karbon siyahı partiküllerinin yapı içerisinde düzgün bir ağ oluşturmadığını, yer yer kesintiler olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL/karbon siyahı (%1) (DMF:DCM) katkılı nanolifli yüzeylerin elektiksel, optik ve optoelektronik özellikleri

Depozisyon Süresi (dk)	Levha Direnci (Rs) (MΩ/sq)	Optik Saydamlık (T) (%)	Figure of Merit (ΦTC) (1/Ω)
1	145,32	90,61	2,748 x 10-9
2	140,27	89,05	2,195 x 10-9
3	136,98	88,19	2,086 x 10-9
4	137,22	87,94	2,043 x 10-9
5	124,72	87,40	2,0791 x 10-9
6	120,47	87,21	2,109 x 10-9
7	118,35	85,33	1,755 x 10-9
8	107,89	84,48	1,704 x 10-9
9	96,34	82,44	1,485 x 10-9
10	72,55	76,07	8,613 x 10-10

Farklı depozisyon sürelerinde üretilen numunelerin optoelektronik karakterizasyonu yapıldığında, en yüksek Φ_{TC} değerine 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunelerle ulaşıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.14, Çizelge 4.5). Bu durum, saydamlık ve levha direnci göz önüne alındığında en iyi performansa 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunenin sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen PCL/karbon siyahı (DMF:DCM) nanolifli yüzeylerin Φ_{TC} değerleri

PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) ve PCL/karbon siyahı (DMF:DCM) katkıli nanolifli yüzeylerin elektriksel iletkenlikleri karşılaştırıldığında; DMF çözücü sisteminde hazırlanan nanoliflerin daha düşük dirence sahip olduğu, kloroform sisteminde üretilenlere göre daha iletken oldukları görülmektedir. Buradaki temel farkın nanolif inceliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Karbon siyahı partikülleri DMF sisteminde üretilen nanoliflerde daha küçük bir hacme yerleştiği için, partiküller arası bağlantı daha az kesintiye uğramaktadır.

PAN/karbon siyahı, PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) ve PLC/karbon siyahı (DMF:DCM) katkıli nanolifli yüzeylerin elektriksel iletkenlikleri karşılaştırıldığında; PAN/karbon siyahı katkıli nanoliflerin diğerlerine göre yüzlerce kat daha düşük elektriksel direnç gösterdiği yani daha iletken olduğu görülmektedir. Burada en büyük etkenin karbon siyahının PAN nanolifli yüzeylerde yer yer yüzeyler üzerinde kalıntılar oluşturması olduğu düşünülmektedir. Karbon siyahı partikülleri nanolifli yapı içerisinde kesintisiz bir ağ oluşturursa elektriksel direncin düşeceği ve elektriksel iletkenliğin artacağı görülmektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışması ile iletken olmayan polimerlere iletken madde katkısı yapılarak elektro çekim yöntemi ile iletken ve saydam nanolifli yüzeylerin üretimi ve karakterizasyonu hedeflenmiştir. Bu amaçla PAN ve PCL polimerleri şablon polimer olarak, karbon siyahı ise iletken madde katkısı olarak seçilmiştir. Tez kapsamında PAN/karbon siyahı ve PCL/karbon siyahı nanolifli yüzeyler 1-10 dakika arasında değişen depozisyon sürelerinde elektro çekim yöntemi ile üretilmiş ve bu numunelerin yüzey, elektriksel, optik ve optoelektronik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca verilmiştir.

PAN ile yapılan çalışmalar: Tez çalışmasının ilk aşamasında öncelikli olarak herhangi bir iletken madde katkısı olmadan, farklı oranlarda PAN içeren çözeltiler hazırlanmış ve en düzgün nanolif üretimine imkân veren polimer konsantrasyonu belirlenmiştir.

Bu amaçla, hazırlanan çözeltilerden elektro çekim yöntemi ile nanolifli yüzeyler üretilmiştir. Çözelti içindeki polimer miktarının artışı, çözelti viskozitesini artırır. Bu nedenle artan polimer konsantrasyonuna bağlı olarak, nanolif çaplarında da artış gözlenmiştir. Ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltilerden üretilen nanoliflerin çapı ortalama 530 nm olarak bulunmuştur. Ayrıca, bu çözeltilerden elde edilen nanolifler, diğer çözeltilerden üretilenlere göre daha en düzgün yüzeylere sahiptir ve çap dağılımı en azdır.

Bu nedenlerle çalışmalara ağırlıkça %7 oranında PAN içeren çözeltilerle devam edilmiştir. Karbon siyahı katkısı çalışmalarında, %1'in üzerinde yapılan karbon siyahı katkılarında elektro çekim işlemi esnasında düzede tıkanmalar olduğu ve nanolif üretilemediği görülmüştür. Bu nedenle %1 iletken karbon siyahı katkısı ağırlıkça %7 oranında PAN içeren polimer çözeltilerine yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı iletken ve saydam nanolifli yüzeyler elde etmektir. Bu nedenle, saydam yüzey eldesi için karbon siyahı katkılı çözeltilerden nanolif üretimi cam lamlar üzerine 1-10 dakika değişen sürelerde gerçekleştirilmiştir ve üretilen numunelerin

saydamlık (geçirgenlik) özellikleri araştırılmıştır. Beklendiği üzere artan depozisyon süresi ile birim alandaki lif miktarı artmış ve yüzeylerin geçirgenliği (saydamlık) azalmıştır. En yüksek saydamlık 1 dakika depozisyonda (~89), en düşük saydamlık ise 9 ve 10 dakika depozisyonda (~63) elde edilmiştir.

1-10 dakika arasında değişen depozisyon sürelerinde üretilen numunelerin elektriksel özellikleri incelendiğinde, artan depozisyon süresi ile numunelerin levha direncinde düşüş olduğu görülmüştür. Levha direncindeki düşüş elektriksel iletkenlikteki artışı işaret etmektedir. En düşük levha direnci 197 k Ω ile 10 dakika depozisyon yapılan numunelerde, en yüksek levha direnci 455 k Ω ile 1 dakika depozisyon yapılan numunelerde elde edilmiştir.

1-10 dakika arasında değişen depozisyon sürelerinde üretilen karbon siyahı katkılı PAN nanoliflerin yüzey, elektriksel ve optik karakterizasyonundan sonra, numunelerin optoelektronik özelliklerini belirlemek amacıyla “figure of merit” (Φ_{TC}) değerleri hesaplanmıştır. “Figure of merit” kavramı levha direnci ve saydamlık arasındaki ilişkiyi tanımlar ve yüksek “figure of merit” değeri yüksek performanslı elektrotu ifade eder. Farklı depozisyon sürelerinde üretilen karbon siyahı katkılı PAN nanoliflerin optoelektronik karakterizasyonu yapıldığında, en yüksek Φ_{TC} değerine 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunelerle ulaşıldığı görülmüştür. Bu durum, saydamlık ve levha direnci göz önüne alındığında en iyi performans 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunenin sahip olduğunu göstermektedir.

PCL ile yapılan çalışmalar: Tez çalışmasının ikinci aşamasında, şablon polimer olarak PCL kullanımı ile karbon siyahı katkılı iletken ve saydam nanoliflerin üretilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak herhangi bir iletken madde katkısı olmadan, ağırlıkça %10 ve 15 oranlarında PCL içeren çözeltiler hazırlanmış ve en düzgün nanolif üretimine imkân veren polimer konsantrasyonu belirlenmiştir.

PCL için farklı çözücü sistemleri kullanılabilir. Çözücü sistemi farkını da gözlemlemek amacıyla PCL çözeltileri iki farklı çözücü sistemi (Kloroform:DCM ve DMF:DCM) kullanılarak hazırlanmıştır.

Farklı çözücü sistemlerinde ve farklı polimer konsantrasyonlarında hazırlanan PCL çözeltileri için, artan polimer konsantrasyonu ile elektro çekim işleminde zorluklar olmuştur. Bu nedenle optimum PCL oranı olarak %10 seçilmiş ve katkı maddesi ekleme çalışmalarına bu oranla devam edilmesine karar verilmiştir.

Klorofom içeren çözücü sistemi ile hazırlanan çözeltilerden üretilen nanoliflerin çapları mikron seviyesindedir. Aynı zamanda nanoliflerin çap dağılımı ve lif ekseni boyunca çap değişimi fazladır. DMF:DCM çözücü sisteminde üretilen nanolif çapları 300 nm seviyelerindedir ve elde edilen lifler daha düzgün yüzeyledir.

Katkısız nanolifli yüzeylerin elektro çekim ile üretimi tamamlandıktan sonra karbon siyahı katkısı yapılan yüzeylerin üretimi ve yüzey karakterizasyonu çalışmalarına geçilmiştir. Karbon siyahı katkısı %1 olarak belirlenmiştir ve ağırlıkça %10 oranında PCL içeren çözeltilere katkı yapılmıştır.

PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) katkılı numunelerin karakterizasyon sonuçları:

Kloroform:DCM çözücü sistemi içerisine karbon siyahı katkısı yapılarak nanolif eldesi esnasında kloroformun çok uçucu olması nedeniyle zorluklar yaşanmıştır. Bu numunelerde ortalama lif çapı 4,18 mikron olarak belirlenmiştir. Üretilen nanoliflerin üniform olmadığı, lif çaplarının lif ekseni boyunca çok farklılık gösterdiği, lif çap dağılımının çok geniş bir aralıkta olduğu görülmüştür.

Saydamlık denemeleri için 1-10 dakika depozisyon sürelerinde cam lam üzerine nanolif üretimleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek saydamlık 1 dakika depozisyonda (~90), en düşük saydamlık ise 10 dakika depozisyonda (~75) elde edilmiştir.

Üretilen numunelerin elektriksel özellikleri incelendiğinde, artan depozisyon süresi ile numunelerin levha direncinde düşüş olmuştur. En düşük levha direnci 94,56 M Ω ile 10 dakika depozisyon yapılan numunelerde, en yüksek levha direnci 174,45 M Ω ile 1 dakika depozisyon yapılan numunelerde elde edilmiştir.

Saydamlık ve iletkenlik anlamında en yüksek performansı gösteren numuneyi belirlemek için optoelektronik karakterizasyon yapıldığında, en yüksek Φ_{TC} değerlerine 1,2 ve 4 dakika boyunca depozisyon yapılan numunelerle ulaşılmıştır. Bu durum, en iyi performansa 1,2 ve 4 dakika boyunca depozisyon yapılan numunenin sahip olduğunu göstermektedir.

PCL/karbon siyahı (DMF:DCM) katkılı numunelerin karakterizasyon sonuçları:

DMF: DCM çözücü sistemi içerisine karbon siyahı katkısı yapılarak nanolif eldesi yapılmıştır. Bu çözücü sistemi ile çalışıldığında karbon siyahının çözelti içerisinde bir araya gelmesi ve dibe çökme eğilimi olduğu görülmüştür. Elde edilen liflerin çapları ortalama 318 nm olarak belirlenmiştir. Elde edilen nanolifler yüzey içerisinde rastgele yerleşim göstermektedir ve lif çapları nanolif ekseni boyunca üniformdur.

1-10 dakika arasında değişen depozisyon sürelerinde cam lam üzerine üretilen nanolifli saydamlık özellikleri incelendiğinde, en yüksek saydamlık 1 dakika depozisyonda (~90), en düşük saydamlık ise 10 dakika depozisyonda (~76) elde edilmiştir.

Numunelerin elektriksel karakterizasyonu yapıldığında, artan depozisyon süresi ile numunelerin levha direncinde düşüş olmuştur. En düşük levha direnci 72,55 M Ω ile 10 dakika depozisyon yapılan numunelerde, en yüksek levha direnci 145,32 M Ω ile 1 dakika depozisyon yapılan numunelerde elde edilmiştir. Ancak elde edilen elektriksel dirençlerin megaohm seviyelerinde olması karbon siyahı partiküllerinin yapı içerisinde düzgün bir ağ oluşturmadığını, yer yer kesintiler olduğunu göstermektedir.

Üretilen numunelerin optoelektronik karakterizasyonu yapıldığında, en yüksek Φ_{TC} değerine 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunelerle ulaşıldığı gözlenmiştir. Bu durum, saydamlık ve levha direnci göz önüne alındığında en iyi performansa 1 dakika boyunca depozisyon yapılan numunenin sahip olduğunu göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar ve sonuçlar değerlendirildiğinde; PAN/karbon siyahı katkılı nanolifli yüzeylerin elektriksel direncinin PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) ve PLC/karbon siyahı (DMF:DCM) nanolifli yüzeylerin elektriksel

dirençlerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum daha yüksek iletkenliğe işaret etmektedir. Bu durumun, karbon siyahının PAN nanolifli yüzeylerde yer yer yüzeyler üzerinde kalıntılar oluşturması, bu nedenle karbon siyahı partikülleri arasındaki ağın kesintiye uğramaması nedeniyle gerçekleştiği düşünülmektedir. PCL/karbon siyahı (kloroform:DCM) ve PCL/karbon siyahı (DMF:DCM) katkılı nanolifli yüzeylerde ise, DMF çözücü sisteminde hazırlanan nanoliflerin kloroform sisteminde üretilenlere göre daha düşük elektriksel dirence sahip olduğu görülmüştür. Bu numuneler arasındaki temel fark nanolif çap inceliğidir. Karbon siyahı partikülleri DMF sisteminde üretilen nanoliflerde daha küçük bir hacme yerleştiği için, partiküller arası bağlantı daha az kesintiye uğramaktadır ve durum dirençlerde düşüşe neden olmaktadır.

Elde edilen bilgiler ışığında, üretilen numunelerin iletkenlik değerlerinin artırılması için numunelere ard işlem uygulanması, farklı iletken katkıların denenmesi, kendiliğinden iletken polimerlerin kullanımı bundan sonraki çalışmalar için önerilebilecek konu başlıkları olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, J., Kim, H. J. ve Kim, S. (2012). Polyaniline Nanofiber/Carbon Black Composite as Oxygen Reduction Catalyst for Air Cathode Microbial Fuel Cells. *Journal of the Electrochemical Society*. 159(5), 497-501. Erişim adresi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.049205jes/meta>
- Akçeren, D., Avcı, M. Z., Gökçe Z. G., Balkan, T. ve Saraç, A. Ş. (2017). Poli(bütül akrilat-ko-metil metakrilat)-polipirol nanofiberlerin üretimi ve karakterizasyonu. *Polimer Bülteni*. 75(4), 1607-1617. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2110-3>
- Akın, E., Demiroğlu, M., S., Alyamaç, E. ve Seydibeyoğlu, M. (2020). Elektro Çekim Yöntemi ile Halosyt Katkılı Biyo-Bazlı Termoplastik Poliüretan Nanolif Üretimi ve Karakterizasyonu. *Tekstil ve Mühendis*. 27(120), 218-229. Erişim adresi: <https://doi.org/10.7216/1300759920202712001>
- Al-Saleh, M. ve Sundararaj, U. (2008). Electromagnetic interference (emi) shielding effectiveness of pp/ps polymer blends containing high structure carbon black. *Macromolecular Materails and Engineering*. 293(7), 621–630. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/mame.200800060>
- Anonim. (2012). Ohm kanunu nedir? <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik/ohm-kanunu-nedir-1772/>-(Erişim tarihi: 26.05.2021).
- Anonim. (2016a). Elektrolit nedir? <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik/elektrolit-nedir-13363/>-(Erişim tarihi: 25.05.2021).
- Anonim. (2016b). Nanoliflerden Esnek ve Şeffaf Basınç Sensörleri Geliştirildi. <https://www.biomedya.com/nanoliflerden-esnek-ve-seffaf-basinc-sensorleri-gelistirildi/>-(Erişim tarihi: 26.05.2021).
- Anonim. (2017a). Atomun Yapısı ve Elektron Teorisi. <https://pinumerus.wordpress.com/2017/06/20/atomun-yapisi-ve-elektron-teorisi/>-(Erişim tarihi: 25.05.2021)
- Anonim. (2017b). Işık bir parçacık mıdır? Yoksa bir dalga mı? <https://www.nasilyap.net/isik-bir-parcacik-midir-yoksa-bir-dalga-mi/>-(Erişim Tarihi: 30.06.2021).
- Anonim. (2017c). Karbon Siyahı. <http://www.polyplastendustri.com/karbon-siyahi/>-(Erişim Tarihi: 1.07.2021).
- Anonim. (2018). Elektrosponasyon - elektrosponing teknikleri. <https://www.inovenso.com/ourtechnology/ourtechnology/>-(Erişim tarihi: 27.05.2021).
- Anonim. (2019). Nanofibers production methods. <https://www.inovenso.com/nanofibers-production-methods/>-(Erişim tarihi: 27.05.2021).
- Anonim. (2021). İletken Maddeler – Yalıtkan Maddeler. <https://diyot.net/iletken-ve-yalitkan-maddeler/>-(Erişim tarihi: 25.05.2021).
- Aykut, Y. (2013). Poliakrilonitril Nanolifler İçerisinde Altıgen Kobalt Sülfür Nanoplaka Sentezi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*. 18(2), 47-54. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/202625>

- Badawy, M. S. ve Dessouki, M. A. (2003). Cross-Linked Polyacrylonitrile Prepared by Radiation-Induced Polymerization Technique. *Journal of Physical Chemistry B*. 107(41), 11273-11279. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1021/jp034603j>
- Bae, H., Haider, A., Selim, K., M. K. Kang, D. Y., Kim, E. J. ve KanG, İ. K. (2013). Fabrication of highly porous PMMA electrospun fibers and their application in the removal of phenol and iodine. *Journal of Polymer Research*. 158 (2013). Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0158-9>
- Baumgarten, P. K. (1971). Electrostatic spinning of acrylic microfiber. *J. Colloid Interface Sci.* 36 (1), 71-79. Erişim adresi: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(71\)90241-4](https://doi.org/10.1016/0021-9797(71)90241-4)
- Bedeloğlu, A. Ç., Eroğlu, N. S. ve Bozkurt, Y. (2010). Elektriksel olarak iletken tekstil yapıları, üretim yöntemleri ve kullanım alanları. *Tekstil Mühendislik*. 17(79), 7-17. Erişim adresi: <https://app.trdizin.gov.tr/makale/TVRBNU1qYzVPUT09>
- Beypazar, Ö. (2013). Nanolif Üretiminde Çap Kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi*. NKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı. Tekirdağ.
- Blachowicz, T. ve Ehrmann, A. (2020). Conductive Electrospun Nanofiber Mats. *Materials*. 13(1), 1-17. doi:10.3390/ma13010152
- Bohn, C. R., Schaeffgen, J. R. ve Statton, W. O. (1961). Laterally ordered polymers: Polyacrylonitrile and poly(vinyl trifluoroacetate). *Journal of Polymer Science*. 55(162), 531-549. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/pol.1961.1205516212>
- Bozan, U., Altuncu, E. ve Üstel, F. (2014). Nano partikül takviyeli teflon kaplamaların üretilmesi ve karakterizasyonu. *Sakarya Üniversitesi Fenn Bilimleri Dergisi*. 18(1), 21-30. Erişim adresi: <http://www.saujs.sakarya.edu.tr/en/download/article-file/192804>
- Bucko, M. B., Kierzek, J., Bulkovski, P., Parus, J., Ciurapunski, A., Zaras, S., ... Wiland, K. (1999). Assessment of coal and ash environmental impact with the use of gamma- and X-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 240(1), 39-45. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/bf02349134>
- Chang, H., Yuan, Y., Shi, N. ve Guan, Y. (2007). Electrochemical DNA Biosensor Based on Conducting Polyaniline Nanotube Array. *Analytical Chemistry*. 79(13), 5111-5115. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1021/ac070639m>
- Chaparro, F. J., Michelle, E., Matusicky, M. J., Allen, J. ve Lannutti, J. (2016). Biomimetic microstructural reorganization during suture retention strength evaluation of electrospun vascular scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 104(8), 1525-1534. doi:10.1002/jbm.b.33493
- Çetin, E. A. ve Tiyek, İ. (2021). Borik Asit Katkılı Poliakrilonitril-ko-Vinil Asetat Polimerinden Elektroçekim Yöntemiyle Nanolifli Tekstil Yüzeylerinin Üretimi ve Termal Karakterizasyonu. *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 11(1), 771-785. Erişim adresi: <https://doi.org/10.21597/jist.741798>
- Çunayev, Ş., Düzyer, Ş., Tezel, S. ve Koç, K. S. (2019). Effect of Reduction Time on the Electrical Properties of PAN/AgNO₃ Nanofibers. *International Congress On Engineering and Life Science*, 11-14 Nisan 2019, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.

Daşdemir, M. (2006). Elektrospinning of Thermoplastic Polyurethane (THU) for Producing Nanofibers. *M.Sc. Thesis*, UG Graduate School of Natural and Applied Sciences, Textile Engineering, Gaziantep.

De Vrieze, S., Van Camp, T., Nelvig A., Hagström, B., Westbroek, P. ve De Clerck, K. (2009). The effect of temperature and humidity on Elektrospinning. *J. Mater. Sci.* 44 (5), 1357-1362. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3010-6>

Demir, S., Ü. (2015). Altın Nanopartiküller ile Dekore edilmiş Nanofiberlerde Uyarıcı Faktörlerin Nörit Uzaması Üzerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, HÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, Ankara.

Deshmukh, K., Ahamed, M. B., Deshmukh, R. R., Pasha, S. K. K., Bhagat, P. R. ve Chidambaram, K. (2017). 3-Biopolymer composites with high dielectric performance: interface engineering. Ahamed, M. B., Deshmukh, R. R., Pasha, S. K. K., Bhagat, P. R. ve Chidambaram, K. (Ed.), *Biopolymer Composites in Electronics* (s. 27-128) içinde. doi:10.1016/b978-0-12-809261-3.00003-6.

Dincer, K. ve Köse, A. (2019). Elektrospin metodu ile üretilen ZNO nano partikül katkılı PAN Nanofiberlerin Isıl iletkenliğinin ve Elektriksel iletkenliklerinin incelenmesi. *Selçuk-Teknik Dergisi*. 18(2), 84-98. Erişim adresi: <https://sujes.selcuk.edu.tr/sujes/article/view/471/682>

Doshi, J. ve Reneker, D. H. (1995). "Elektrospinning process and applications of electrospun fibers". *Journal of Electrostatics*. 35(2-3), 151-160. Erişim adresi: [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00041-8](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)00041-8)

Duygulu, N. E. (2020). Elektro Eğirme Yöntemiyle Nano Boyutlu TiO₂ Parçacık katkılı PLA Nano Fiber Üretimi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 10(1), 7-18. Erişim adresi: DOI: 10.7212/zkufbd.v10i1.1451

Duzyer, S., Sinha-Ray, S., Sinha-Ray, S. ve Yarin, A. L. (2017). Transparent Conducting Electrodes from Conducting Polymer Nanofibers and Their Application as Thin-Film Heaters. *Macromolecular Materials and Engineering*. 302(1700188), 1-10. DOI: 10.1002/mame.201700188

Ergün, A. (2018). Gerilme transduserleri sunumu. *Dokuz Eylül Üniversitesi*, İzmir.

Erol, A. D. ve Çetiner, S. (2017). Elektronik Tekstillere Yönelik Akıllı Kumaş Sensörleri. *Tekstil ve Mühendis*. 24(108), 305-320. Erişim adresi: <https://doi.org/10.7216/1300759920172410810>

Esmeray, E. ve Özata, O. (2019). Nanopartiküllerin Çevre Mühendisliğinde Kullanımı ve Laboratuvar Temel Malzemeleri ile Gümüş Nanopartikül (AgNPs) Sentezi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 16(16), 521-527. Erişim adresi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.570308>

Evcin, A., Bezir, N. Ç., Kayalı, R., Arı, M. ve Küçük, A. (2014). Elektroegirme Yöntemiyle Üretilen GaInP Nanoliflerin Elektriksel ve Optik Karakterizasyonu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 14(3), 303-306. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/18635>

Evcin, A., Ersoy, B. ve Bezir, N. Ç. (2019). Elektroegirme yöntemiyle Ag katkılı karbon nanoliflerin sentezi. *Nevşehir bilim ve Teknoloji dergisi*. 8(2019), 88-97. Erişim adresi: <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.623881>

- Fakhrali, A., Semnani, D., Salehi, H. ve Ghane, M. (2020). Electrospun PGS/PCL nanofibers: From straight to sponge and spring-like morphology. *Polymers for Advanced Technologies*. 31(12), 3134-3149. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/pat.5038>
- Fausey, C. L., Zucker, I., Shaulsky, E., Zimmerman, J. B. ve Elimelech, M. (2019). Removal of arsenic with reduced graphene oxide-TiO₂-enabled nanofibrous mats. *Chemical Engineering Journal*. 375(2019), 1-11. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122040>
- Fong, H., Chun, I. ve Reneker, D. (1999). Beaded nanofibers formed during Elektrospinning. *Maurice Morton Institute of Polymer Science, The University of Akron*. 40(16): 4585-4592. Erişim adresi: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00068-3)
- Garrudo, F. F. F., Chapman, C. A., Hoffman, P. R., Udangawa, R. W., Silva, J. C., Mikael, P. E., ... Linhardt, R. J. (2019). Polyaniline-polycaprolactone blended nanofibers for neural cell culture. *European Polymer Journal*. 117(2019), 28-37. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.04.048>
- Greiner A. ve Wendorff, J. H. (2007). Elektrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers. *Angewandte Chemie*. 46(30), 5670-5703. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/anie.200604646>
- Güçlü, S. (2012). İki Farklı Polimerden Simultane Olarak Elektrospinning Yöntemiyle Nanolif ve Membran Üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Haacke, G. (1976). New figure of merit for transparent conductors. *Journal of Applied Physics*. 47(9), 4086-4089. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1063/1.323240>
- Haider, S., Al-Zeghayer, Y., Ahmed, A. F. A., Haider, A., Mahmood, A., Waheed, A. A-M., ... Aijaz, M. O. (2013). Highly aligned narrow diameter chitosan electrospun nanofibers. *Journal of Polymer Research*. 20(105), 1-11. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0105-9>
- Haidera, A., Haiderb, S. ve Kang, İ. K. (2018). A comprehensive review summarizing the effect of Elektrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*. 11(8), 1165-1188. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015>
- Halis. (2018). (PAN) Poliakrilonitril lifleri. <https://tekstilbilgi.net/pan-poliakrilonitril-lifleri.html#respond.->(Erişim tarihi: 26.06.2021).
- Im, J., Kim, J. Q. ve Lee, Y. S. (2009). Fluorination Effects of Carbon Black Additives for Electrical Properties and EMI Shielding Efficiency by Improved Dispersion and Adhesion. *Carbon*. 47(11), 2640-2647. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.05.017>
- İçoğlu, H. (2019). İğne Çapı ve Besleme Hızının Elektro Görüntü Tekniğiyle Üretilmiş Poliakrilonitril Nanoliflerinin Morfolojisine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 34(4), 163-170. Erişim adresi: <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.704171>
- Jadhav, V., M., Todkar, A., S., Gambhire, R., V. ve Sawant, Y., S. (2011). Nanotechnology for powerful solar energy. *International Journal of Advanced*

Biotechnology and Research. 2(1), 208-212. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/315892213>

Kai, D., Tan, M. J., Prabhakaran, M. P., Chan, Q. Y. B., Liow, S. S., Ramakrishna, S. Ve Loh, X. C. (2016). Biocompatible electrically conductive nanofibers from inorganic-organic shape memory polymers. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 148, 557-565. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.09.035>

Kanani, G. A. ve Bahrami, H. S. (2011). Effect of Changing Solvents on Poly(ϵ -Caprolactone) Nanofibrous Webs Morphology. *Journal of Nanomaterials*. 2011(31), 1-10. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1155/2011/724153>

Kausar, A. (2019). Polyacrylonitrile-based nanocomposite fibers: A review of current developments. *Journal of Plastic Film & Sheeting*. 35(3), 295-316. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1177/8756087919828151>

Kaval, Ş. (2018). Sol-Jel Yöntemiyle Hazırlanmış Ag katkılı HfO₂ İnce Filmlerin Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, BÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Batman.

Kayacan, O. ve Bulgun, E. Y. (2005). Akıllı Tekstiller ve Elektriği İleten Tekstil Esaslı Malzemeler. *Tekstil ve Mühendis*. 12(58), 29-34. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/137420>

Kırıştı, M. (2011). Plazma Muamele Edilmiş Kitosan/İletken Polimer Kompozit Nanofiblerinin Elektroeğirme Yöntemi ile Hazırlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Isparta.

Kim, H. S., Kim, K., Jin, H. J. ve Chin, I. J. (2005). Morphological characterization of electrospun nano-fibrous membranes of biodegradable poly(L-lactide) and poly(lactideco-glycolide). *In Macromolecular Symposia*. 224(1), 145-154. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/masy.200550613>

Kim, Y.S., Park, J.H., Choi, D.H., Jang, H.S., Lee, J.H., Park, H.J., ... Kim, D. (2007). ITO/Au/ITO multilayer thin films for transparent conducting electrode applications. *Applied Surface Science*. 254(5), 1524-1527. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.07.080>

Kocakuşak, R. (2018). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Güneş Enerjisinin, Türkiye'deki Önemi ve Ges Kurulum Araştırması. *Yüksek Lisans Tezi*, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, İstanbul.

Krupka, J. (2017). Sheet resistance and resistivity measurements of thin conducting semiconducting and superconducting films. *2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 20-22 Sept. 2017, Pavia, Italy*.

Küçük, A. ve Evcin, A. (2014). Elektroeğirme Yöntemiyle Bor Katkılı Hidroksiapatit Nanofiblerinin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 14 (3), 319-324. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/18>

Labet, M. ve Thielemans, W. (2009). Synthesis of Polycaprolactone: a review. *The Royal Society of Chemistry*. 12(38), 3484-3504. doi:10.1039/b820162p

- Lallave, M., Bedia, J., Ruiz-Rosas, R., Rodríguez-Mirasol, J., Cordero, T., Otero, J. C., ... Barrero, İ. G. (2007). Filled and hollow carbon nanofibers by coaxial electrospinning of alcell lignin without binder polymers. *Advanced Materials*. 19(23), 4292–4296. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/adma.200700963>
- Lannutti, J., Reneker, D., Ma, T., Tomasko, D. ve Farson, D. (2007). Elektrosponning for tissue engineering scaffolds. *Materials Science and Engineering*. 27(3), 504–509. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.05.019>
- Leach, M. K., Feng, O. Z., Tuck, S. J. ve Corey, J. M. (2011). Elektrosponning Fundamentals: Optimizing Solution and Apparatus Parameters. *J Vis Exp*. 47(2494), 1-4. Erişim adresi: doi: 10.3791/2494
- Li, Z. ve Wang, C. (2013a). Introduction of Elektrosponning. *One-Dimensional nanostructures (s. 1-13)*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Li, Z. ve Wang, C. (2013b). Effects of Working Parameters on Elektrosponning. *One-Dimensional nanostructures (s. 15-28)*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Liu, H. Q. ve Hsieh, Y. L. (2002). Ultrafine fibrous cellulose membranes from electrospinning of cellulose acetate. *Journal of Polymer Science*. 40(18), 2119-2129. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/polb.10261>
- Lubasova, D. ve Martinova, L. (2011). Controlled morphology of porous polyvinyl butyral nanofibers. *Journal of Nanomaterials*. 2011(2011), 1-6. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1155/2011/292516>
- Matabola, K. P. ve Moutloali, R. M. (2013). The influence of Elektrosponning parameters on the morphology and diameter of poly(vinylidene fluoride) nanofibers-effect of sodium chloride. *Journal of Materials Science*. 48 (16), 5475-5482. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7341-6>
- Mülazim, İ. ve Canbolat, M. F. (2017). Farklı Tipteki Toplayıcı Plakaların Elektrostatik Çekim ile Elde Edilen Nanoliflerin Morfolojisi Üzerine Etkilerinin Araştırılması. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*. 29(1), 161-170. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/304863>
- Ocak, M. E. (2015). Işık Tayfı Nedir? [https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/isik-tayfi-nedir-\(Erişim_Tarihi:_28.06.2021\)](https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/isik-tayfi-nedir-(Erişim_Tarihi:_28.06.2021)).
- Oflaz, K. (2016). Manyetik Nanofiber Membranlar. *Yüksek Lisans Tezi*. SÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Özdoğan, E., Demir, A. ve Seventekin, N. (2006). Nanoteknoloji ve tekstil uygulamaları. *Tekstil ve Konfeksiyon*. 16(4), 225-229. Erişim adresi: <https://app.trdizin.gov.tr/publication/paper/detail/TmpFM05UVTE=>
- Özek, S., Çiftci, Ş., Göde, F., Aksoy, K. ve Aksoy, S. A. (2015). Nanokil Katkılı PAN Nanolif Sentezi ve Karakterizasyonu. *SDU Journal of Science (E-Journal)*. 10 (1), 107-117. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/116432>
- Özkanlı, N., N. (2021). Geçirgenlik Kavramının Seramik Formlara Yansıması. *Atatürk Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*. 27(46), 285-293. Erişim adresi: <https://doi.org/10.32547/ataunigsed.854498>

Özsağiroğlu, E. (2011). Enzimatik Polimerizasyon ile Sentezlenen Polikaprolaktona Reaksiyon Koşullarının Etkisinin ve Polikaprolaktonun Biyobozunurluğunun İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. Kimya Mühendisliği anabilim dalı. İstanbul.

Panapoy, M., Singsang, W. ve Ksapabutr, B. (2010). Electrically conductive poly(3,4ethylenedioxythiophene) poly(styrene sulfonate)/polyacrylonitrile fabrics for humidity sensors. *Physica Scripta*. 2010(T139), 1-5. Erişim adresi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/2010/T139/014056/meta>

Pelipenko, J., Kristl, B., Jankoviç, S. ve Baumgartner, P. K. (2013). The impact of relative humidity during Elektrospinning on the morphology and mechanical properties of nanofiber. *Int. J. Pharm.* 456(1), 125-134. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.07.078>

Pillay, V., Dott, C., Choonara, Y. E., Charu, T., Tomar, L., Kumar, P., ... Valence, M. K. N. (2013). A Review of the Effect of Processing Variables on the Fabrication of Electrospun Nanofibers for Drug Delivery Applications. *Journal of Nanomaterials*. 2013(22), 1-23. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1155/2013/789289>

Rahaman, M. S. A., İsmail, A. F. ve Mustafa, A. (2007). Polymer Degradation and Stability. A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber. *Sciense Direct*. 92(8), 1421-1432. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.03.023>

Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Lim, T. C. ve Ma, Z. (2005). An Introduction to Elektrospinning and Nanofibers. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd*. Singapore 1-381.

Reich, S., Burgard, M., Langner, M., Jiang, S., Wang, X., Agarwal, S., Ding, B., Yu, J. ve Greiner, A. (2018). Polymer nanofibre composite nonwovens with metal-like electrical conductivity. *Npj/Flexible Electronics*. 2(5), 1-6. Doi:10.1038/s41528-017-0018-5

Reneker, D.H. ve Yarin, A.L. (2008). Elektrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*. 49(10), 2387-2425. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.02.002>

Sabantina, L., Rodriguez-Cano, M. A., Klöcker, M., Garcia-Mateos, F. J., Ternero-Hidalgo, J. J., Mamun, A., ... Ehrmann, A. (2018). Fixing PAN Nanofiber Mats during Stabilization for Carbonization and Creating Novel Metal/Carbon Composites. *Polymers*. 10(7), 735-746. Erişim adresi: <https://doi.org/10.3390/polym10070735>

Sahay, R., Thavasi, V. ve Ramakrishna, S. (2011). Design Modifications in Elektrospinning Setup for Advanced Applications. *Journal of Nanomaterials*. 2011(17), 1-18. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1155/2011/317673>

Silney, D. (2016). What is light? The visible spectrum and beyond. *Eye*. 30(2016), 222-229. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1038/eye.2015.252>

Sill, T. J. ve von Recum, H. A. (2008). Elektrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*. 29(13), 1989-2006. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.01.011>

Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S. ve Ramkumar, S. S. (2005). Elektrospinning of Nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 96(2), 557-569. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/app.21481>

- Sunar, B. S. ve Hasçıçek, C. (2017). Elektroeğrilmiş Nanoliflerin İlaç Taşıyıcı Sistem Olarak ve Doku Mühendisliğinde Kullanımı. *Marmara Pharmaceutical Journal* 21(3), 425-435. Erişim adresi: DOI: 10.12991/marupj.306787
- Süpüren, G., Kanat, Z. E., Çay, A., Kırıcı T., Gülümser, T. ve Tarakçıoğlu, İ. (2007). Nano Lifler (Bölüm 2.). *Tekstil ve Konfeksiyon*. 17(2), 83-89. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/218015>
- Taygun, M. E., Hatinoğlu, G., Öztürk, A., Yerli, N. ve Küçükbayrak, S. (2018). Polimer/Biyoaktif Cam Çözeltilerinin Reolojik Karakterizasyonlarının Yapılması ve Nanokompozit Malzeme Üretimi. *Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences*. 1(1), 1-6. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/524709>
- Tezcan, T. (2017). Elektrik Direnç Kaynağı. *Yüksek Lisans tezi*. BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Tiwari, M. K., Yarin, A. L. ve Megaridis, C. M. (2008). Electrospun fibrous nanocomposites as permeable, flexible strain sensors. *J. Appl. Phys.* 103(4), 044305. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1063/1.2885112>
- Tiyek, İ. ve Bozdoğan, F. (2007). Poliakrilonitril Lif Üretiminde Koagülasyon Banyo Sıcaklığının Lif İyapısına Etkisinin Geniş Açılı X-Işınları Difraksiyonu İle İncelenmesi. *Tekstil ve Konfeksiyon*. 2(2008), 114-120. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/218355>
- Üner, İ. ve Gürcüm, H., B. (2019). Elektronik tekstillerde iletken mürekkep uygulamaları. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*. 25(7), 794-804. Erişim adresi: doi: 10.5505/pajes.2019.55890
- Üstündağ, G., C. (2009). Elektrospinning Yöntemi ile Biyomedikal Kullanıma Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi ve Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Varol, S. H. ve Yağımlı, M. (2008). Optoelektronik. Çarpık, G (Ed.). *Optoelektronik & Fiber optik* (s. 1-20) içinden. Beta.
- Vassiliadis, S., Provatidis, C., Prekas, K. ve Rangoussi, M. (2004). Electrically Conductive Spun Yarns. *Proc. Xth International Izmir Textile and Apparel Symposium*. 37-49. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Savvas-Vassiliadis/publication/314233476_Electrically_Conductive_Spun_Yarns/links/58bc17cea6fdcc2d14e57579/Electrically-Conductive-Spun-Yarns.pdf
- Vatansever, B. D., Yıldız, A. ve Ağrgan, A. Ö. (2018). Elektro Lif çekim Yöntemi ile Piezoelektrik Nanolif üretimi ve Karakterizasyonu. *NKUBAP.06.GA.17.093 nolu proje*, Tekirdağ.
- Wang, M. J., Gray, C. A., Reznick, S. A., Mahmud, K. ve Kutsovsky, Y. (2003). Carbon Black. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 4(1), 761-803. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/0471238961.0301180204011414.a01.pub2>
- Xue, P., Tao, X. M., Leung, M. Y. ve Zhang, H. (2005). 5-Electromechanical properties of conductive fibres, yarns and fabrics. Tao, X. (Ed.). *Wearable Electronics And Photonics* (s. 81-104) içinde. <https://doi.org/10.1533/9781845690441.81>.

- Yang, G., Li, X., He, Y., Ma, J., Ni, G. ve Zhou, S. (2018). From nano to micro to macro: Electrospun hierarchically structured polymeric fibers for biomedical applications. *Progress in Polymer Science*. 81(2018), 80-113. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.12.003>
- Yang, T., Zhou, N., Zhang, Y., Jiao, K. ve Li, G. (2009). Synergistically improved sensitivity for the detection of specific DNA sequences using polyaniline nanofibers and multi-walled carbon nanotubes composites. *Biosensors and Bioelectronics*. 24(7), 2165–2170. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2008.11.011>
- Yıldız, S. (2018). İletken Polimerler ve Kullanım Alanları. *Tekstil Mühendisliği Bölümü Haftalık Semineri, 21 Şubat 2018*, U.Ü. Tekstil Mühendisliği Bölümü Binası Ahmet Rasim Büyüktür Seminer Salonu, Bursa.
- Zargham, S., Said, Z., Amir, T., Saied, R. A. ve Rogheih, D. (2012). The Effect of Flow Rate on Morphology and Deposition Area of Electrospun Nylon 6 Nanofiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 7(4), 42-49. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1177/155892501200700414>
- Zussman, E., Burman, M., Yarin, A. L., Khalfin, R. ve Cohen, Y. (2006). Tensile Deformation of Electrospun Nylon-6,6 Nanofibers. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. 44(10), 1482-1489. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/polb.20803>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şaban ÇUNAYEV
Doğum Yeri ve Tarihi : Azerbaycan, Balaken, 05.02.1993
Yabancı Dili : Türkce, Rusca, İngilizce, Avarca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Balaken reyon Qaysa köy orta okulu
(1999-2010)

Lisans : Azerbaycan Devlet Petrol ve Sanayi
Üniversitesi, Malzeme Bilimi
Mühendisliği Bölümü (2010-2014)

Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Ana
Bilim Dalı (2017-2021)

İletişim (e-posta) : chunayev08@gmail.com
Yayımları :

Çunayev, Ş., Düzyer, Ş., Tezel, S., Koç, K. S. 2019. Effect of Reduction Time on the Electrical Properties of PAN/AgNO₃ Nanofibers. International Congress On Engineering and Life Science, 11-14 Nisan 2019, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu

Gebizli, D. Ş., Çunayev, Ş., Koç, K. S. 2020. İletken Poliakrilonitril/Karbon siyahı (PAN/CB) Nanoliflerin Yüzey ve Elektriksel Özelliklerinin Karakterizasyonu. International Marmara Sciences Congress, 19-20 Haziran 2020, Kocaeli.