



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GRAFEN KATKILI NANOLİF YÜZEY İLE
KAPLANMIŞ DOKUNMAMIŞ KUMAŞLARIN
GELİŞTİRİLMESİ, İLETKENLİK VE SENSÖR
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

GÜL ÖZKAN

DOKTORA TEZİ

Tekstil Mühendisliği

Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Mustafa Sabri ÖZEN

İSTANBUL, 2024



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GRAFEN KATKILI NANOLİF YÜZEY İLE
KAPLANMIŞ DOKUNMAMIŞ KUMAŞLARIN
GELİŞTİRİLMESİ, İLETKENLİK VE SENSÖR
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

GÜL ÖZKAN

(723417008)

DOKTORA TEZİ

Tekstil Mühendisliği

Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Mustafa Sabri ÖZEN

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 723417008 nolu Doktora Öğrencisi Gül ÖZKAN'ın “Grafen Katkılı Nanolif Yüzey ile Kaplanmış Dokunmamış Kumaşların Geliştirilmesi, İletkenlik ve Sensör Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı tez çalışması, 28.06.2024 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Mustafa Sabri ÖZEN	(Danışman)	
Marmara Üniversitesi		(İMZA)
Prof.Dr. Erhan SANCAK	(Üye)	
Marmara Üniversitesi		(İMZA)
Dr. Öğr. Üyesi Vedat ÖZYAZGAN	(Üye)	
Haliç Üniversitesi		(İMZA)
Doç. Dr. Sinem BUDUN GÜLAS	(Üye)	
İstanbul Aydın Üniversitesi		(İMZA)
Dr. Öğr. Üyesi Nergis DEMİREL GÜLTEKİN	(Üye)	
Marmara Üniversitesi		(İMZA)

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı ile Gül ÖZKAN'ın Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı Tekstil Mühendisliği Programında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı Tekstil Mühendisliği programında gerçekleştirilmiştir. Doktora çalışmam süresince bana yol gösteren, bilgi ve deneyimlerini paylaştan, desteklerini her zaman gösteren, tezimi yönlendiren, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa Sabri ÖZEN'e çok teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde yer alan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Erhan SANCAK ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Vedat ÖZYAZGAN'a değerli yorumları, katkıları ve destekleri için teşekkür ederim. Bölüm başkanımız, yıllardır öğrencisi olduğum, kendisinden çok kıymetli bilgiler öğrendiğim Sayın hocam Prof. Dr. İsmail USTA'ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her daim iletişimde olduğum, her türlü bilgi ve birikimi ile beni yönlendiren, üretim, test ve analiz kısımlarında bana yardımcı olan, desteğini esirgemeyen hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nergis DEMİREL GÜLTEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

Çalışmalarım boyunca bana ellerinden gelen desteği sağlayan Sayın Arş. Gör. Onur ATAK'a, Sayın Dr. Derya SALTİK'a, Mekatronik Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Mustafa Caner AKÜNER'e, Arş. Gör. Mehmet Fatih ÇELEBİ'ye de teşekkürlerimi iletirim. Hayat arkadaşlığı yaptığımız günden itibaren beni maddi manevi destekleyen, her daim yanımda olduğunu hissettiren, anlayış gösteren, Sevgili eşim Ziya ÖZKAN ve bu süreçte zorlandığım, yetişemediğim zamanlarda canım yavrum, kızım Defne, büyük bir birey gibi yanımda olmuş, beni anlamaya çalışmıştır. Her ikisine de sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi iletiyorum.

Beni bugünlere getiren, tüm hayatım boyunca destekleyen, bana güvenen, maddi manevi yanımda olan Sevgili annem Gülten SEYHAN'a ve babam Şerafettin SEYHAN'a, Sevgili kayınvalidem Gülbiye ÖZKAN, kızımın da bakımını üstlenerek bana çok büyük destek olmuştur, hepsine ayrı ayrı teşekkürlerimi birer borç bilirim. Özellikle tez üretim, test ve yazım kısımlarında büyük desteğini hissettiğim İstanbul Nişantaşı Üniversitesi yöneticilerime, mesai arkadaşlarıma ve motivasyon kaynağı dostlarıma da ayrı ayrı teşekkür ederim.

Haziran,2024

Gül ÖZKAN

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
YENİLİK BEYANI.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
TABLO LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Grafen ve Grafen Oksit.....	1
1.1.1. Grafen ve Türevlerinin Özellikleri	4
1.1.2. Grafenin Üretimi ve Sentezlenmesi.....	8
1.1.3. Grafen Oksitin İndirgenmesinde Uygulanan Yöntemler.....	11
1.1.4. Grafen Oksitin Kullanım Alanları	14
1.2. Tekstil Yüzeylerinde Nano Yapıların Elde Edilme Yöntemleri....	17
1.2.1.Kaplama Prosesleri	20
1.2.2.Nanolif Üretim Yöntemleri.....	24
1.3. Piezoelektrik.....	27
1.3.1. Piezoelektrik Malzemeler	27
1.3.2. Piezoelektrik Sensörlerin Tekstilde Kullanımı.....	31
1.3.3. GO Katkılı PVDF Nanoliflerin Piezoelektrik Özellikleriyle İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar	35
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	44
2.1. Materyal	44
2.1.1. Kullanılan Malzemeler	44
2.1.2. Kullanılan Cihazlar.....	45
2.2. Yöntem.....	50

2.2.1. Grafen Oksit Sentezi.....	50
2.2.2. Kaplama Patının ve Sulu Dispersiyonun Hazırlanması	52
2.2.3. Saf Polimer Çözeltilisinin Hazırlanması.....	55
2.2.4. Elektro Çekim ile PVDF Nanolif Yüzeyin Dokunmamış Kumaş Üzerinde Eldesi	59
2.3. Karakterizasyon Teknikleri.....	63
3. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	69
3.1. XRD Analizi Sonuçları	69
3.2. FTIR Analizi Sonuçları.....	70
3.3. SEM Analizi Sonuçları	73
3.4. Kalınlık Ölçüm Sonuçları	75
3.5. Mukavemet Ölçüm Sonuçları	77
3.6. Elektriksel Direnç Ölçüm Sonuçları	84
3.7. Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	86
3.8. Sensör Ölçüm Sonuçları	92
4. SONUÇLAR	99
KAYNAKÇA	103
ÖZGEÇMİŞ.....	125

ÖZET

GRAFEN KATKILI NANOLİF YÜZEY İLE KAPLANMIŞ DOKUNMAMIŞ KUMAŞLARIN GELİŞTİRİLMESİ, İLETKENLİK VE SENSÖR ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu tez çalışmasında, grafen katkılı nanolif yüzey ile kaplanmış dokunmamış kumaşların geliştirilmesi ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Fonksiyonel özellikleri geliştirilmiş dokunmamış kumaş geliştirilmesi için 2 üretim tekniği belirlenmiştir. Birinci yöntemde Grafen Oksit ile emdirme yöntemi uygulanmış %100 filament esaslı (spunbonded) dokunmamış kumaşların üzerinde GO katkılı Poliviniliden florür (PVDF) nanolif üretilmiş ve indirgenmiştir. İkinci yöntem ise aynı özellikteki dokunmamış kumaşlar rakle ile kaplanmış, indirgenmiş ve sonrasında üzerlerinde indirgenmiş GO katkılı PVDF nanolif üretilmiştir. Elde edilen yapıların karakterizasyon özelliklerinin yanı sıra mekanik dayanımları, elektriksel dirençleri ve su temas açıları da fonksiyonel özellik olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, geliştirilmiş Hummers yöntemiyle grafitten grafen oksit sentezlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, birinci üretim tekniği için belirlenen emdirme yöntemi için, sentezlenen grafen oksitten 2g/L konsantrasyonda sulu dispersiyonlar ultrasonik banyoda hazırlandı. Emdirme yöntemi, 1/20 banyo oranında, 60°C banyo sıcaklığında 1 saat süreyle gerçekleştirilmiş, ardından kumaş etüvde 90°C’de kurutulmuştur. İkinci üretim tekniği için belirlenen rakle kaplama için öncelikle GO kaplama patı, 25g/L GO sulu dispersiyonundan yeterince katılaşana kadar karıştırılarak elde edildi. %100 PES dokunmamış kumaş, hazırlanan GO patı rakle ile kaplandı. Kumaşın her iki yüzüne birer pasaj olacak şekilde ve kaplama kalınlığı 0.2mm olarak uygulandı. Kumaş kaplama sırasında her iki yüzüne ayrı ayrı olacak şekilde 110°C’de 10’ar dakika fikse işlemi uygulandı.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, rakle ile kaplanan numunelere indirgeme işlemi yapılmıştır. Kaplanan dokunmamış kumaşlar 0.2 Mol C vitamini çözeltisi ile geri soğutmalı sistemde 95°C’ de 90 dakika ve kütlece %0.05 C vitamini ilaveli %10 kuşburnu çözeltisi ile geri soğutmalı sistemde 95°C’ de 5 saatte indirgeme yapılmıştır.

Daha sonra indirgenmiş kumaş destile su ile kademeli soğutma ile yıkanmış ve 90°C’de etüvde kurutulmuştur. Aynı zamanda rakle ile kaplanmış kumaşlara indirgenmiş GO katkılı PVDF nanolif çekileceği için, GO partiküllerine ayrı ayrı olacak şekilde C vitamini ve kuşburnu ekstraktı ile olmak üzere indirgeme işlemi yapıldı.

Çalışmanın dördüncü aşamasında emdirme yöntemi uygulanmış dokunmamış kumaş numunelerinin üzerine elektro çekim yöntemi ile PVDF ve GO katkılı PVDF nanolif çekilmiş ve kumaşlar indirgenmiştir. Aynı zamanda rakle ile GO kaplanmış ve indirgenmiş dokunmamış kumaşlara da PVDF ve indirgenmiş GO katkılı PVDF nanolif yüzeyler elektro çekim ile uygulanmıştır. Polimer çözeltileri katkısız PVDF olmak üzere kütlece %0.5 - %1 - %2 GO ve RGO katkılı olacak şekilde hazırlanmıştır. Doğal ve çevre dostu indirgeme maddeleri belirlenerek, çevre ve insan sağlığına olan zararların önlenmesi amaçlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen tüm numunelerinin XRD, FTIR ve SEM yöntemleri ile karakterizasyon analizleri yapılmıştır. Geliştirilen kumaşların fonksiyonel özelliklerini ve kullanım alanı önerisini de belirleyebilmek için elektriksel direnç, su temas açısı ve mekanik dayanım ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Belirlenen iki farklı yöntem kendi içinde GO ya da RGO katkı oranları ve indirgeme maddelerine göre değerlendirilirken aynı zaman da kendi aralarında da değerlendirme yapılmıştır.

Haziran,2024

Gül ÖZKAN

ABSTRACT

In this thesis study, it is aimed to develop non-woven fabrics coated with graphene-doped nanofiber surface and examine their electrical properties. Two production techniques have been determined to develop nonwoven fabrics with improved properties. In method first, GO-doped PVDF nanofiber was produced and reduced on 100% spunbonded non-woven fabrics coated with GO by dipping method. In the second production technique, spunbonded nonwoven fabrics with the same properties were coated with a squeegee, reduced, and then reduced GO-doped PVDF nanofiber was produced on them. In addition to the characterization features of the obtained structures, their mechanical strength, electrical resistance and water contact angles were also determined as functional properties.

In the first part of the study, graphene oxide was synthesized from graphite by using the improved Hummers method.

In the second part of the study, aqueous dispersions of the synthesized graphene oxide at a concentration of 2g/L were prepared in an ultrasonic bath for coating by the dipping method determined for the 1st production technique. The coating process by dipping method was carried out at a bath ratio of 1/40, at a bath temperature of 60°C for 1 hour, and then the spunbonded nonwoven fabric was dried in an oven at 90°C. For coating with the squeegee method determined for the 2nd production technique, GO squeegee paste was obtained by mixing 25g/L GO aqueous dispersion until it solidified sufficiently. GO paste prepared on 100% PES non-woven raw fabric was coated with a doctor. It was applied to both sides of the fabric with a passage and a coating thickness of 0.2 mm. During fabric coating, a fixing process was applied to both sides separately at 110°C for 10 minutes.

In the third part of the study, reduction was performed on the spunbonded nonwoven samples coated with a squeegee. The coated non-woven fabrics were reduced with 0.2 M vitamin C solution at 95°C for 90 minutes in a back-cooled system, and with 10% rosehip solution with 0.05% vitamin C addition at 95°C for 5 hours in a back-cooled system. Then, the reduced fabric was washed with distilled water with gradual cooling and dried in an oven at 90°C. At the same time, since reduced GO-doped PVDF nanofiber will be drawn onto the rake-coated fabrics, the reduction process was performed on GO particles separately with vitamin C and rosehip.

In the fourth part of the study, pure PVDF and GO-doped PVDF nanofibers were produced by electrospinning method on the non-woven fabric samples coated by dip coating and the fabrics were reduced. At the same time, PVDF and reduced GO-doped PVDF were electrospinning onto GO-coated and reduced nonwoven fabrics with a squeegee. Polymer solutions were prepared as pure PVDF with 0.5% - 1% - 2% GO and RGO added. By identifying natural and environmentally friendly reducing agents, it is aimed to prevent harm to the environment and human health. Characterization analyzes of all fabric samples were performed using XRD, FTIR and SEM methods. In order to determine the functional properties and usage area recommendations of the developed fabrics, electrical resistance, water contact angle and mechanical strength measurement results were evaluated. The two different methods determined were evaluated according to their GO or RGO additive ratios and reducing agents, and they were also evaluated among themselves.



YENİLİK BEYANI

GRAFEN KATKILI NANOLİF YÜZEY İLE KAPLANMIŞ DOKUNMAMIŞ KUMAŞLARIN GELİŞTİRİLMESİ, İLETKENLİK VE SENSÖR ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tez çalışmasında, grafen katkılı nanolif yüzey ile kaplanmış dokunmamış kumaşların geliştirilmesi ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla emdirme yöntemi uygulanmış dokunmamış kumaşların üzerine PVDF nanolif ve GO katkılı PVDF nanolif ve aynı zamanda rakle ile kaplanmış indirgenmiş dokunmamış kumaşların üzerine PVDF nanolif ve RGO katkılı PVDF nanolif elektro çekim yöntemi ile toplanmıştır. Literatür incelendiğinde grafen oksit ile kaplama yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu örme ve dokuma kumaşlar üzerine yapıldığı görülmüştür. Elektro çekim işlemi ile ilgili literatür incelendiğinde ise PVDF nanolifin ya da grafen oksit /indirgenmiş grafen oksit katkılı PVDF nanolifin elektro çekim ile emdirme yöntemi uygulanmış ve rakle ile kaplanmış dokunmamış bir kumaş üzerine toplandığı ile ilgili bir çalışmanın ilk olduğu söylenebilir. Elektro çekim yapılmış önceki çalışmaların çok büyük bir kısmında toplayıcı olarak ya direkt toplama silindiri ya da alüminyum folyo/yağlı kağıt kullanıldığı görülmektedir. Toplayıcı olarak %100 poliester filament esaslı yöntem ile üretilmiş dokunmamış kumaş çalışması diğer parametreleri ile birlikte özgün bir çalışma niteliğindedir.

Aynı zamanda literatürde tekstil yüzeylerin indirgenmesinde indirgeme maddeleri olarak da çevreye ve insan sağlığına zararlı maddelerin kullanıldığı görülmektedir. Grafen oksit kaplı dokunmamış kumaşların indirgenmesinde kuşburnu ve C vitamini indirgeme maddelerinin seçimi çalışmaya çevreci bir yaklaşım da kazandırmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm üretimler, uygulamalar, test ve analizlerle birlikte elde edilen tüm sonuçlar özgün bir çalışma sonucu ortaya çıkmıştır. Tez çalışmasının, literatüre katkı sağlayacak ve gelecekteki çalışmalara da yol gösterecek nitelikte ve özgün değerde olduğu söylenebilir.

Haziran,2024

Gül ÖZKAN

SEMBOLLER

°C : Santigrat derece

σ : Sigma

π : Pi sayısı

% : Yüzde

° : Derece işareti

λ : Lamda dalga boyu

Å : Ångström

Θ : Teta

Δ : Delta

ε : Epsilon

γ : Gama

Ω : Ohm

KISALTMALAR

GO	: Grafen oksit
PVDF	: Poliviniliden florür
PES	: Poliester
g	: Gram
L	: Litre
M:	: Mol
RGO	: İndirgenmiş grafen oksit
XRD	: X ışını kırınımı
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
nm	: Nanometre
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
GPa	: Gigapaskal
UV	: Ultraviyole
DNA	: Deoksiriboz nükleik asit
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
PZT	: Kurşun zirkonat titanat
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
LED	: Işık yayan diyot
COOH	: Karboksilik asitler
GOF	: Floro katkılı grafen
Hz	: Hertz
V	: Volt
BT	: Baryum titanat
mm	: Milimetre
μW	: Mikrowatt
PANI	: Polianilin
Ti₃C₂	: Titanyum karbür
PDMS	: Polidimetilsiloksan
ZnO	: Çinko oksit
CH₂	: Metilen

PVDFNF	: Poli(viniliden florür) nanolif
PDA	: Polidopamin
BTO	: Baryum titanat oksit
PPS	: Polifenilen sülfid
PVDF-TrFE	: Poliviniliden flüorid-trifloroetilen
GNP	: Grafen nanoplateletleri
GQDs	: Grafen kuantum noktaları
SiC	: Silisyum karbür
CH₄	: Metan
C₆₀	: Fulleren
sp³	: Bir s orbitali ve üç p orbitali
sp²	: Bir s orbitali ve iki p orbitali
C₂H₄	: Etilen
Cu	: Bakır
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
NO₂	: Azot dioksit
NH₃	: Amonyak
CO₂	: Karbon dioksit
B	: Bor
Mw	: Megawatt
mW	: Molekül ağırlığı
Ag	: Gümüş
μC	: Mikrocoulomb
H₂SO₄	: Sülfürik asit
H₃PO₄	: Fosforik asit
KMnO₄	: Potasyum permanganat
H₂O₂	: Hidrojen peroksit
HCl	: Hidroklorik asit
CH₂OH	: Etanol
DMF	: Dimetilformamid
C₃H₆O	: Aseton

rpm	: Dakikadaki devir sayısı
Au	: Altın
Pd	: Paladyum
MPa	: Mega Pascal
kΩ	: kiloohm
I	: Akım
R	: Direnç
N	: Newton
NL	: Nanolif
NW	: Nonwoven
KB	: Kuşburnu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Grafenin Altıgen Yapısı, sp^2 Hibritleşmesine Sahip Karbon Atomları ve Karbon Atomlarının 120° Açıyla Üç σ Bağı Oluşturması	2
Şekil 1.2. Grafitten Grafen Oksit ve İndirgenmiş Grafen Oksit Üretilmesi.....	4
Şekil 1.3. Grafenin Türevleri	6
Şekil 1.4. Grafen Üretim Yöntemleri	8
Şekil 1.5. Grafenin Tekstilde Kullanım Alanları	17
Şekil 1.6. Emdirme Yöntemi	20
Şekil 1.7. Rakle ile Kaplama Yöntemi.....	21
Şekil 1.8. Şablon Baskı Şematik Gösterimi	22
Şekil 1.9. İnk-jet Baskı Prosesi	23
Şekil 1.10. Lif Çaplarının Şematik Olarak Karşılaştırılması	24
Şekil 1.11. Elektro Çekim Yönteminin Şematik Gösterimi	27
Şekil 1.12. Poliviniliden Florür Alfa Faz Yapısı (solda), β Faz Yapısı (sağda).....	29
Şekil 2.1. Santrifüj Cihazı	45
Şekil 2.2. Ultrasonik Banyo	46
Şekil 2.3. Hassas Terazı ve Kimyasal Malzemeler	46
Şekil 2.4. Mekanik Karıştırıcı	47
Şekil 2.5. Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı.....	47
Şekil 2.6. Elektro Çekim Cihazı.....	48
Şekil 2.7. Geri Soğutma Düzenegı.....	49
Şekil 2.8. Etüv	49
Şekil 2.9. Filtrasyon Düzenegı	50
Şekil 2.10. Grafen Oksit Sentezinde H_2O_2 İlavesinden Önce (a) ve Sonra (b) Reaksiyondaki Renk Değışimi	51
Şekil 2.11. Kurutulmadan Önce Grafen Oksit	51
Şekil 2.12. Dokunmamış Kumaşa Rakle Kaplama İşlemi Uygulanması (solda), Rakle ile GO Kaplanmış Dokunmamış Kumaş (sağda)	53
Şekil 2.13. Kaplanmış Kumaşın İndirgeme İşlemi Sonrası Kademeli Yıkama Aşaması.....	54
Şekil 2.14. Elektro Çekim Öncesi İndirgenmiş GO Rakle Kaplı Dokunmamış Kumaş.....	54
Şekil 2.15. Elektro Çekim ile Dokunmamış Kumaş Üzerinde Elde Edilmiş Nanolifli Yapı Numuneleri	56

Şekil 2.16. İplik Formundaki PVDF ile GO Katkılı Polimer Çözeltilisinin Hazırlanması	57
Şekil 2.17. Filtrasyon ile Yıkama İşlemi.....	58
Şekil 2.18. Santrifüj Hazırlık İşlemi ve pH Kontrolü (solda), Çöken Partikül Kontrolü	59
Şekil 2.19. Elektro Çekim İşlemi	60
Şekil 2.20. Rakle ile Kaplanmış, İndirgenmiş ve Üzerinde RGO Katkılı PVDF Nanolif Üretilmiş Numune	60
Şekil 2.21. Emdirme Yöntemi Uygulanmış Kumaşın Elektro Çekim Sonrası İndirgenmesi.....	61
Şekil 2.22. Emdirme Yöntemi Uygulanmış Kumaş Elektro Çekim Sonrası İndirgenmiş Halde Kurutma Aşaması	62
Şekil 2.23. SEM Cihazı.....	64
Şekil 2.24. Kaplama Cihazı ve İşlemi (solda), Au/Pd Kaplanan Numuneler (sağda) ..	64
Şekil 2.25. Dijital Kalınlık Ölçme Aleti	65
Şekil 2.26. Instron 4411 Mukavemet Test Cihazı.....	65
Şekil 2.27. Dikey ve Yatay Yönde Hazırlanmış Mukavemet Test Numuneleri	66
Şekil 2.28. Keithley 2450 4 Nokta Uç Elektriksel Direnç Ölçüm Cihazı.....	66
Şekil 2.29. Su Temas Açısı Test Cihazı.....	67
Şekil 2.30. Fluke Marka Multimetre	68
Şekil 2.31. Kütle Ağırlık Seti.....	68
Şekil 3.1. GO'lu/GO'suz Elektro Çekim PVDF Nanoliflerin ve Kuşburnu Ekstraktı Tozu ve C Vitamini ile Kimyasal İndirgeme İşleminde Sonra XRD Spektrumları.	70
Şekil 3.2. Dokunmamış Kumaşın FTIR Spektrumları, GO Kaplı Dokunmamış Kumaş, Kuşburnu ve C Vitamini (a) ile İndirgenmiş Numuneler ve Saf PVDF Nanolifleri, Ağırlıkça% 0.5 GO-PVDF ve İndirgenmiş GO-PVDF Kompozit Nanolifleri (b), Saf PVDF Nanolifleri, Ağırlıkça% 1 GO-PVDF ve İndirgenmiş GO-PVDF Kompozit Nanolifleri (c), Saf PVDF Nanolifleri, Ağırlıkça% 2 GO-PVDF ve İndirgenmiş GO-PVDF Kompozit Nanolifleri (d).	71
Şekil 3.3. Grafen Oksit Miktarının β Faz Oranına Etkisi.....	73
Şekil 3.4. GO ile Kaplanmış (a), Kuşburnu Tozu Ekstraktı ile İndirgenmiş (b) ve C Vitamini ile İndirgenmiş Dokunmamış Kumaşın SEM Görüntüleri (c) (200x).	74

Şekil 3.5. Elektro Çekim PVDF Nanoliflerin (a), GO Katkılı PVDF Nanoliflerin (b), Kuşburnu Tozu Ekstraktı ile İndirgenmiş (c) ve C Vitamini ile İndirgenmiş (d) SEM Görüntüleri (10kx).....	74
Şekil 3.6. Elektro Çekim ile Üretilmiş Saf PVDF, GO Katkılı PVDF ve Kuşburnu Toz Ekstraktı ve C Vitamini ile İndirgenmiş GO Katkılı Ortalama Nanolif Çapları.....	75
Şekil 3.7. Katkı İçeriğinin Bir Fonksiyonu Olarak PVDF Nanoliflerin Mekanik Özellikleri. Numunelerin Makine Yönünde (a ve c) ve Çapraz Yönde (b ve d) Uzama (%) ve Çekme Mukavemeti Değerleri.....	79
Şekil 3.8. Katkı İçeriğinin Bir Fonksiyonu Olarak PVDF Nanoliflerin Mekanik Özellikleri. Numunelerin Makine Yönünde (a ve c) ve Çapraz Yönde (b ve d) Uzama (%) ve Çekme Mukavemeti Değerleri.....	82
Şekil 3.9. Kuvvet Uygulanmış Numunelerin Multimetre ile Direnç Ölçümleri	92
Şekil 3.10. Birinci Üretim Tekniği ile Üretilmiş Numunelerin Kuvvete Bağlı Direnç Değişimi	93
Şekil 3.11. İkinci Üretim Tekniği ile Üretilmiş Numunelerin Kuvvete Bağlı Direnç Değişimi	94

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. Birinci Üretim Tekniği İçin Üretilen Nanolifli Yapıların Ortalama Kalınlıkları	76
Tablo 3.2. İkinci Üretim Tekniği İçin Üretilen Nanolifli Yapıların Ortalama Kalınlıkları	76
Tablo 3.3. Dokunmamış Yüzey Elektriksel Direnç Ölçümleri (Emdirme Yöntemi) ...	85
Tablo 3.4. Nanoliflerin Elektriksel Direnç Ölçüm Sonuçları	85
Tablo 3.5. Dokunmamış Yüzey Elektriksel Direnç Ölçümleri (Rakle Yöntemi).....	86
Tablo 3.6. Elektro çekim Sonrası İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri - Ağırlıkça %0.5 GO katkılı PVDF nanolif	87
Tablo 3.7. Elektro çekim Sonrası İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri - Ağırlıkça %1 GO katkılı PVDF nanolif	87
Tablo 3.8. Elektro çekim Sonrası İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri - Ağırlıkça %2 GO katkılı PVDF nanolif	88
Tablo 3.9. GO ve RGO Kaplamalı Dokunmamış Kumaş Su Temas Açısı Sonuçları (°) ve Damlacık Görüntüleri (emdirme yöntemi)	89
Tablo 3.10. GO ve RGO Kaplamalı Dokunmamış Kumaş Su Temas Açısı Sonuçları (°) ve Damlacık Görüntüleri (rakle yöntemi)	89
Tablo 3.11. Elektro çekim Öncesi İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri (Ağırlıkça %0.5 GO katkılı PVDF nanolif).	90
Tablo 3.12. Elektro çekim Öncesi İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri (Ağırlıkça %1 GO katkılı PVDF nanolif).	91
Tablo 3.13. Elektro çekim Öncesi İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri (Ağırlıkça %2 GO katkılı PVDF nanolif).	91
Tablo 3.14. Şekil 3.10 x Eksenli Kumaş Kodları Numaralandırması	93
Tablo 3.15. Şekil 3.11 x Eksenli Kumaş Kodları Numaralandırması	95
Tablo 3.16. Numunelerin Kuvvet Karşısında Okunan Gerilim Değerleri (1.üretim numuneleri)	96
Tablo 3.17. Elde Edilen Gerilime Karşı Güç Sonuçları (1.üretim numuneleri)	97
Tablo 3.18. Numunelerin Kuvvet Karşısında Okunan Gerilim Değerleri (2.üretim numuneleri)	97
Tablo 3.19. Elde Edilen Gerilime Karşı Güç Sonuçları (2.üretim numuneleri)	98

BÖLÜM I

1. GİRİŞ

1.1. Grafen ve Grafen Oksit

Kendine has özelliklerini, çeşitli sentez tekniklerini, grafen oksidi indirmek için kullanılan yöntemleri ve sensör teknolojisindeki önemli rollerine özellikle odaklanarak geniş kapsamlı uygulamalarını incelemek çalışmanın uygulaması öncesinde büyük önem arz etmektedir.

Grafen nanomalzeme grubu, her biri çeşitli uygulamalar için benzersiz avantajlar sunan, dikkate değer özellikler sergileyen çok çeşitli karbon bazlı yapılardan oluşmaktadır. Skoda ve ark. tarafından açıklandığı üzere, bu malzemeler boyut, şekil, katman sayısı, yüzey kimyası bakımından farklılık göstermekte ve bunların hepsi farklı özelliklerine katkıda bulunmaktadır [1].

Bu grubun en tanınmış üyesi olan grafen, olağanüstü elektronik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Grafenin atomik kafesinde, iletim bandı ve değerlik bandı üst üste biner ve bu da onu geleneksel yarı iletkenlerden ayıran bir özelliktir. Bu örtüşme, elektronların bir enerji boşluğuna ihtiyaç duymadan malzemedede serbestçe dolaşabildiği ve olağanüstü yüksek elektrik iletkenliğine yol açan bir durumla sonuçlanır. Bu ayırt edici özellik grafene "sıfır bant aralıklı yarı iletken" ismini kazandırmıştır [2].

Grafenin olağanüstü elektrik iletkenliğinin daha iyi anlaşılması, atomik yapısının incelenmesi ile sağlanabilir [3 - 6]. Bir karbon atomunda, iki iç kabuk ve dört dış kabuk orbitaline dağılmış toplam altı elektron bulunmaktadır [7]. Dış kabuk içinde sadece iki boyutlu elektron kabukları tamamen doludur ve elektron iletimi için üç boyutlu bir kabuk bırakır [8]. Bu benzersiz elektronik konfigürasyon, grafenin elektronların hızlı hareketini kolaylaştırmasını sağlayarak iletkenliğini daha da artırır. Grafenin elektrik iletkenliği, bakır gibi geleneksel iletken malzemelerle kıyaslandığında bile gerçekten olağanüstüdür. Bu özellik, elektronik, enerji depolama ve yüksek performanslı iletken kaplama uygulamalarında kullanım avantajı sağlar. Karbonun farklı geometrik şekillerdeki kristallerinden olan grafit, düşük yoğunluklu, maliyeti düşük bir malzemedir. Yüksek termal iletkenliğe ve elektriksel dirence sahip olan grafitin iletkenliği yapısına bağlıdır.

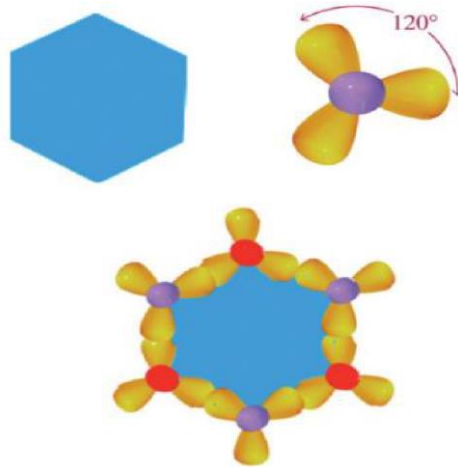
Tek kristal yapıdaki grafitin iletkenliği, zayıf metalinki ile aynıdır ve $4-6 \times 10^{-5}$ ohm değerinde elektriksel direnç gösterir [9].

Karbon atomlarının altıgen şeklinde dizilmesiyle meydana gelen tabakalardan grafit oluşur [10]. Karbon atomları birbirleri ile sp^2 şeklinde bağlıdır. Doğada bulunabildiği gibi grafit laboratuvarıda da üretilebilir [11]. Her bir karbon atomu kendisine komşu diğer üç karbon atomu ile güçlü kovalent bağ oluşturur. Dördüncü elektron ise, diğer katmandaki karbon atomu ile zayıf Van der Waals bağ oluşturur. Grafit yüzeyler, bu zayıf bağlardan dolayı birbirlerinden kolayca ayrılabilir. Bu sayede grafit, kaygan bir özellik kazanmış olur [12].

Karbonun farklı geometrik şekillerdeki kristallerinden oluşan ve düzlemsel formuna sahip olan tek bileşiği olan grafen, ilk defa 2004 yılında Novoselov ve Geim tarafından yüksek derecede yönlendirilmiş grafitin mekanik ayrıştırma metodu ile elde edilmiştir [13].

Sp^2 hibritleşmesi yapan ve bal peteği kristal yapısında bulunan grafitin, nanotüpün ve aynı zamanda C_{60} 'ın ana yapıtaşı olan grafen, 2004 yılında sentezlenebilmiştir.

şekil 1.1'de grafenin altıgen yapısı, sp^2 hibritleşmesine sahip karbon atomları ve karbon atomlarının 120° açıyla üç σ bağı oluşturması şematik olarak görölmektedir.



şekil 1.1. Grafenin Altıgen Yapısı, sp^2 Hibritleşmesine Sahip Karbon Atomları ve Karbon Atomlarının 120° Açıyla Üç σ Bağı Oluşturması [14]

Kimyasal yöntem, grafenin sentezi için en uygun yöntemdir. Karbon atomları arasında yeni bağlar oluşturularak karbon tabakalarının birbirinden uzaklaştırılması sağlanır.

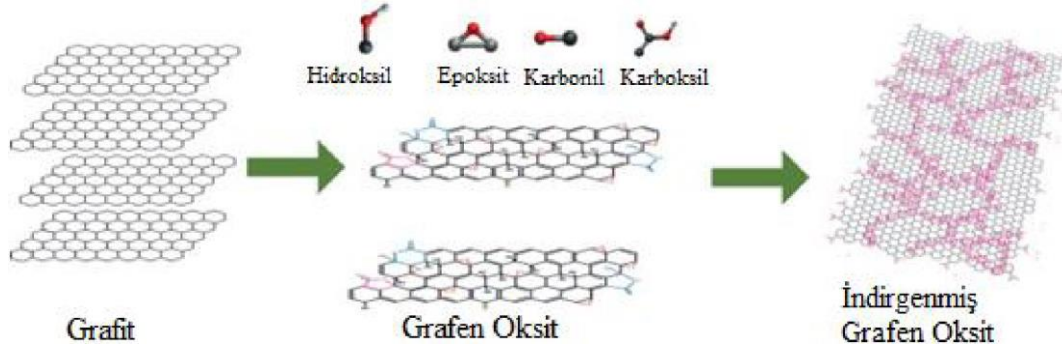
İndirgeme işlemi ile de birbirinden uzaklaşmış bağlar bozunur. Böylece tek ya da çok katmanlı karbon tabakaları elde edilebilmektedir. Bu yapı, indirgenmiş grafen oksit olarak isimlendirilir [15].

Grafenin, kimyasal yöntemin yanı sıra termal bozunma, buhar çöktürme, mekanik ayrışma yöntemi ile hazırlanması da mümkündür. Grafit, kimyasal yöntemle asit ve yükseltgenler ile grafen oksite (GO) yükseltgenir ve grafen oksitin sulu dispersiyonu, ultrasonik banyoda grafen oksit tabakalarına ayrılmış olur. Belli indirgeyiciler, sıcaklık ve süre kullanılarak ayrılmış olan bu grafen oksit tabakalarından oksijenin uzaklaştırılması sağlanır ve böylece indirgenmiş grafen oksit elde edilmiş olur [16].

Grafit oksit, grafen üretiminde oldukça önemli bir ara malzeme olup, temel olarak karbon, oksijen ve hidrojen atomlarından oluşmaktadır. Grafit oksitin C/O oranı genellikle 1.5-2.5 arasındadır [17]. C/O oranı GO'nun eksfoliasyon seviyesi, katman sayısı, tabaka boyutu, sp^2 ve sp^3 bölgelerin kısmi fraksiyonu ve fonksiyonel grupların konsantrasyonu gibi yapısal özellikleri etkilemektedir [18]. Grafen oksit, grafitin okside olmuş formudur ve katmanlar arasında oksijen içerikli fonksiyonel grupların varlığından dolayı daha fazla katmanlar arası mesafeye sahip olan çok katmanlı bir yapıdır. Grafen oksit, grafit oksitin eksfoliye olmuş formudur ve grafit ve grafen arasındaki diğer bir önemli ara malzemedir. Grafen oksit, grafit oksitin yapısal olarak farklı ancak kimyasal olarak benzer bir formudur. Bir başka ifade ile grafen oksit (GO), grafitin oksitlenmesi ile elde edilir. GO'ya indirgeme işlemi uygulandığında ise indirgenmiş grafen oksit üretilmiş olur [15].

Grafit, oksitlenip grafen oksit tabakalarına dönüştüğünde, grafitten ve grafenden farklı olarak kahverengi-sarı renkte, grafitten ve grafenden daha az elektriksel iletkenliğe sahip ve suda iyi dağılan bir malzeme formuna dönüşmektedir [19].

Grafen iletken ancak grafen oksit yalıtkandır [20]. Grafiti oluşturan grafen tabakaların üzerine hidroksit (-OH), karboksil (-COOH), karbonil (-C=O), vb. oksijenli grupların bağlanması sonucu oluşan yapıya grafen oksit adı verilir [21]. Şekil 1.2'de grafitten grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit elde edilmesinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 1.2. Grafitten Grafen Oksit ve İndirgenmiş Grafen Oksit Üretilmesi [22]

GO, bozulmuş konjuge π - π bağları içerdiğinden çok iletken değildir ve yüksek yoğunlukta oksijen içeren fonksiyonel gruplara sahiptir. İletkenliğini geri kazandırmak için GO tabakaları indirgenmelidir. Bunlar; kimyasal, elektrokimyasal ve termal olarak indirgenme şeklinde olabilir [23].

1.1.1. Grafen ve Türevlerinin Özellikleri

İki boyutlu bir karbon allotropu olan grafen, benzersiz atomik yapısı ve karbon atomlarının hassas düzenlenmesi nedeniyle dikkate değer bir bilimsel ve teknolojik öneme sahip bir malzemedir [24]. Bu atomik konfigürasyon, çok çeşitli uygulamalarda grafenin olağanüstü özelliklerini ve performansını tanımlamak için önemli bir rol oynamaktadır.

Altıgen Kafes Yapısı: Grafenin atomik mimarisinin özünde, genellikle bal peteği desenine benzetilen ve tek bir karbon atomu katmanından oluşan altıgen bir kafes yatmaktadır. Grafenin dikkat çekici özelliklerinin çoğunun altında yatan temel yapısal unsur budur. Kafes içindeki her karbon atomu, üç komşu karbon atomuyla güçlü kovalent bağ oluşturarak düzlemsel, sp^2 hibridize bir yapı ortaya çıkarır. Bu düzlemsel geometri, grafenin olağanüstü iki boyutlu yapısına ve sadece bir karbon atomu kalınlığındaki düz, atomik olarak ince yapısına katkıda bulunur [25].

Karbon-Karbon Bağı: Grafenin yapısal bütünlüğü, kafesi içindeki karbon atomlarının sp^2 hibridizasyonunun doğrudan bir sonucudur. Bu hibridizasyonda her bir karbon atomu, elektronlarını komşu karbon atomlarıyla paylaşarak üç sigma (σ) bağı oluşturur. Bu σ -bağları yüksek güç ve kararlılıklarıyla karakterize edilir ve grafenin olağanüstü mekanik gücü ve sağlamlığının kritik bir belirleyicisi durumuna gelir. Bu karbon-karbon

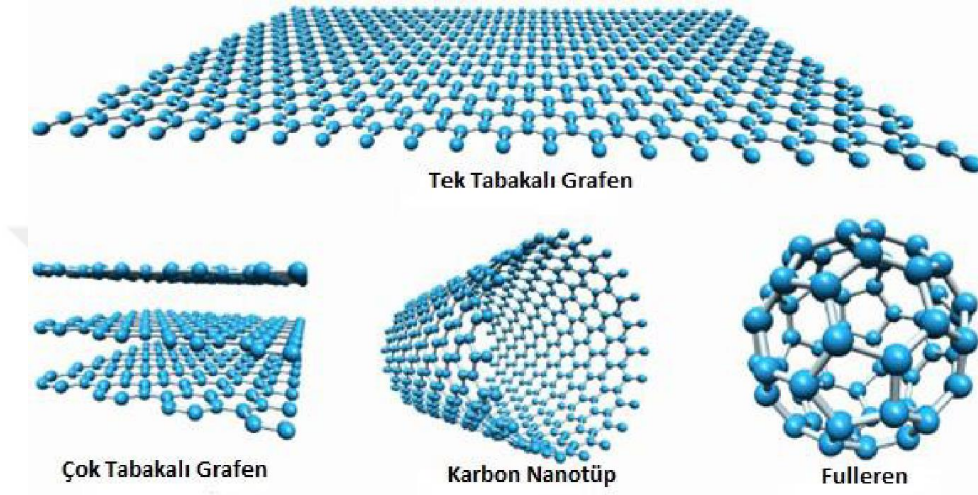
bağlarının gücü, grafenin şimdiye kadar test edilmiş en güçlü malzemelerden biri olarak tanımlanmasına katkıda bulunur [26].

π -Elektron Sistemi: Grafenin atomik yapısının belirleyici bir özelliği de konjuge π -elektron sistemidir. Bu elektronlar altıgen kafes boyunca serbestçe hareket ederek sürekli bir elektron yoğunluğu bulutu oluşturur. Bu π -elektron sistemi, grafenin yüksek elektrik iletkenliği ve dikkat çekici elektron hareketliliği de dahil olmak üzere olağanüstü elektronik özelliklerinin oluşmasına sebep olur. π -elektronlarının kafes boyunca serbestçe hareket edebilmesi, grafeni diğer malzemelerden ayıran benzersiz bir elektronik bant yapısıyla sonuçlanır [27,28].

Elektronik Bant Yapısı: Grafenin benzersiz bant yapısı, grafene sıfır bant aralıklı yarı iletken özelliği kazandırır. Bu bağlamda, malzeme içindeki elektronlar ve delikler göreceli parçacıklar gibi davranarak grafenin eşsiz elektrik iletkenliğine ve yüksek hızlı elektronik ve optoelektronik uygulamalar için umut verici potansiyeline katkıda bulunur. Grafendeki enerji bantlarının doğrusal dağılımı, geleneksel yarı iletkenlerde ve metallerde bulunan parabolik bantlarla tam bir tezat oluşturmakta ve malzemenin farklı elektronik özelliklerini daha da açığa çıkarmaktadır [5].

Karbon-Karbon Bağ Uzunluğu ve Bağ Açısı: Grafenin atomik yapısının temel bir yönü, kafes içindeki bitişik karbon atomları arasındaki bağ uzunluğudur. Yaklaşık 0.142 nanometre olan bu bağ uzunluğu, karbon-karbon bağlarının gücünü ve kafesin genel kararlılığını yansıtır. Bu bağların olağanüstü gücü, grafenin olağanüstü mekanik özelliklerinde kritik bir faktördür ve çeliği 100 kattan fazla aşan gerilme mukavemeti ile bilinen en güçlü malzemelerden biri olarak tanımlanmasına katkıda bulunur. Grafen katmanları, genellikle az katmanlı veya çift katmanlı grafen olarak adlandırılan çok katmanlı grafen yapıları oluşturmak için üst üste yığılabilir. Bu katmanların düzeni malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin, bitişik katmanlardaki karbon atomlarının doğrudan birbirinin üzerinde olduğu çift katmanlı grafen, katmanlar arası etkileşimler nedeniyle tek katmanlı grafene kıyasla farklı elektronik özellikler sergiler. Çok katmanlı grafendeki istifleme düzenini ve katmanlar arası etkileşimleri anlamak, elektronik davranışını manipüle etmek ve yeni elektronik cihazlar tasarlamak için çok önemlidir [29,30].

Tek katmanlı veya birkaç katmanlı grafen (2-10 tabakalı olabilir), grafen oksit (tek tabaka), indirgenmiş grafen oksit (tek tabaka), ultra ince grafit (10 tabakadan fazla fakat 100 nm'nin altında kalınlıkta), grafen quantum noktaları (GQDs), nanotabakalar, grafen nano şeritler gibi başka grafen formlarını da içeren “Grafen” terimi aslında karbon atomlarının 2 boyutlu tek tabakasına karşılık gelmektedir [31]. Şekil 1.3'te grafenin türevleri şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.3. Grafenin Türevleri [32]

Grafenin elektriksel özelliklerinin yanı sıra üstün termal iletkenliğini de göz önünde bulundurmak önemlidir [33,34]. Grafen bu açıdan bakır ve silikon gibi geleneksel malzemeleri geride bırakarak elektronik cihazlarda ısı dağıtımı ve termal yönetim içeren uygulamalar için çok önemli bir materyaldir. Olağanüstü termal iletkenliği, gelişmiş elektronik cihazlarda aşırı ısınmayla ilgili sorunları azaltarak cihaz performansının ve ömrünün artmasını sağlayabilir. Grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksit (RGO) gibi grafen türevleri de büyük ilgi görmektedir [35,36]. Örneğin GO, yüzeyindeki oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı nedeniyle farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu fonksiyonel gruplar GO'yu sensörler [37] kompozitler [38] ve ilaç dağıtım sistemlerindeki uygulamalar [35] için oldukça çok yönlü hale getirmektedir. Ayrıca, C Vitamini [39,40] ve kuşburnu tozu özü [41,42] gibi doğal indirgeyici ajanların kullanımı da dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle GO'nun RGO'ya indirgenmesi, elektriksel özelliklerini daha da geliştirmekte ve fonksiyonel uygulamalarını genişletmektedir.

Öte yandan grafen, enerji seviyelerinden bağımsız kalan ve yerel voltajlara dayanan sabit optik iletkenliği ile karakterize edilen gelişmiş optik özellikler sergiler [43]. Özellikle,

her bir grafen katmanı, gelen beyaz ışığın yaklaşık %2.3'ünü adsorbe eder ve bu da %0.1'den daha düşük bir yansıma oranıyla sonuçlanır. Sonuç olarak, tek bir bozulmamış grafen katmanı olağanüstü şeffaflık ve esnekliğe sahiptir [43]. Yüksek yüzey alanı grafenin çok önemli bir özelliğidir ve yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu yüzey alanının kapsamı, grafen katmanlarının sayısı ile yakından ilgilidir [43]. Bu nedenle, grafen ve grafen bazlı malzemelerin yüzey alanları, kullanılan özel sentez yöntemine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilir.

Grafenin optik özellikleri, enerji seviyelerinden bağımsız olarak tutarlı kalan benzersiz optik iletkenliğinin optoelektronik ve fotonik uygulamaları için umut vaat etmektedir [44]. Bu özellik, grafenin geniş bir spektrumda gelen ışıkla verimli bir şekilde etkileşime girmesini sağlayarak onu fotodetektörler ve modülatörler de dahil olmak üzere çeşitli optik cihazlar için değerli bir aday haline getirmektedir [45,46]. Ayrıca, tek bir grafen katmanının olağanüstü şeffaflığı ve esnekliği, esnek ve şeffaf elektroniklerin geliştirilmesine katkı sağlamıştır [47,48]. Grafenin olağanüstü ışık absorbe kapasitesi, gelen ışığın çoğunu iletme kabiliyeti ile birleştiğinde, onu esnek ekranlar, dokunmatik ekranlar ve güneş pilleri gibi uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirmiştir [49,50].

Grafenin yüzey alanının önemi; moleküller ve diğer malzemelerle gelişmiş etkileşim potansiyelinde yatmaktadır ve bu da onu sensörler ve katalizörlerde değerli bir bileşen haline getirmektedir [43]. Spesifik yüzey alanı sentez yöntemine bağlı olarak değişebilir, kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi teknikler tipik olarak mekanik olarak pul pul dökülmüş grafene kıyasla daha büyük yüzey alanları ile sonuçlanır [51].

Optik avantajlarının yanı sıra doğasından gelen kırılgenliğine rağmen grafen, %25'e varan esnemeye dayanma konusunda dikkate değer bir yeteneğe sahiptir [52]. Bu içsel esneklik, özellikle elektronik bileşenlerin uzun ömürlülüğünü ve uyarlanabilirliğini sağlamada çok önemli bir rol oynadığı esnek elektronik alanında büyük önem taşımaktadır [53]. Yapısal kusurlardan arındırılmış bozulmamış haliyle tek katmanlı grafen, şimdiye kadar test edilmiş en güçlü malzemelerden biri olarak öne çıkmaktadır. 42N/m gibi etkileyici bir güce sahip olan grafen, 130GPa gibi şaşırtıcı bir değere denk gelmektedir [54]. Bir başka ifade ile grafenin dayanımı çeliğin dayanımından 100 kat daha fazladır denilebilir. Özellikle, polimer bileşimlerinin gerilme mukavemeti önemli

bir artış göstererek bu malzemelerin genel dayanıklılığına ve daha uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur [2].

Grafenin kimyasal özellikleri incelendiğinde, saf grafen tabakaların çoğunlukla reaktif olmadığı görülmektedir. Diğer malzemelerle reaksiyona girebilmesi için yüzey fonksiyonallizasyonu gereklidir. Grafen tabakaların kimyası, yüzeyi ile ilgilidir, ancak grafen nanoşerit formunda ise kenarları ile ilgilidir. Grafenin reaktifliğinde kalınlığı da oldukça önemli rol oynamaktadır [55].

1.1.2. Grafenin Üretimi ve Sentezlenmesi

Grafen üretim yöntemleri; aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı olmak üzere iki gruba ayrılır. Şekil 1.4'te grafenin üretim yöntemleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Grafen Üretim Yöntemleri [56]

Mikromekanik ayrılma: En popüler grafen üretim yöntemlerinden biri olup özel bir ekipman gerektirmeyen, hatasız grafen üretimi için elverişli, kolay ve basit bir yöntemdir. Grafit partikülleri yapışkan bant arasına yerleştirilir ve yüzey sürekli olarak soyulur. Grafiti sürekli soyma işlemi ayrılan ince partiküllerin neredeyse atomik olarak temiz düz yüzeye yapışmasına neden olur. Böylece soyma ve yeni bant değiştirme işlemi ile pürüzsüz tek tabakalar elde edilinceye kadar sürekli olarak tekrarlanarak partiküllerin gittikçe incilmesi sağlanır [55]. Diğer bir adı ile scotch bant yönteminin avantajları arasında; yüksek kalite, katman kontrolü, minimal ekipman ve doğrudan gözlem yapma imkanı sayılabilir. Sınırlı ölçeklenebilirlik, düşük verim, el becerisi ve tek kullanımlık

olması gibi dezavantajları bulunmasına rağmen grafen ve iki boyutlu malzemelerin incelenmesinde temel bir teknik olmaya devam etmektedir [57].

Sıvı fazlı eksfoliyasyon: Temel ilkeleri, grafen katmanlarını yığın malzemeden ayırmak için kesme kuvvetlerinin uygulanması esasına dayanır. Süreç, çözünürlük, viskozite ve uygulama gereksinimleri gibi faktörlere göre seçilen uygun bir çözücü veya dispersiyon ortamının seçilmesiyle başlar [58].

Çözücü seçildikten sonra, yığın grafit veya grafit oksit çözücüye eklenir ve bir başlangıç dispersiyonu oluşturulur. Daha sonra dispersiyona kesme kuvvetleri uygulanır ve grafit katmanlarının tek tek veya birkaç katmanlı grafen pullarına ayrılmasına neden olur. Çözücü molekülleri ve grafen katmanları arasındaki etkileşim van der Waals kuvvetlerini zayıflatarak pul pul ayrılmayı kolaylaştırır [59,60].

Ölçeklenebilir olması, çeşitli çözücüler ile kullanılabilmesi, kararlılığı, ayarlanabilir özellikleri gibi avantajları bulunan yöntemin [59] topaklaşma probleminin olması, düşük üretim verimi, hava ve neme karşı hassas organik çözücü kullanımı grafen üretiminde bu yöntemin uygulanma olasılığını kısıtlaması gibi dezavantajları bulunmaktadır [61].

Mekanik öğütme: Bilyalı öğütme ile kesme ve tesir kuvvetleri oluşturularak grafitten grafen eldesi gerçekleştirilir. Bu yöntemde sıvı ortamında ya da katı ortamda öğütme yapılarak grafitten grafen elde etmek mümkündür [62]. Grafitin mekanik olarak öğütülmesi kolay, düşük maliyetli ve etkili bir yöntemdir ve proses esnasında pek çok parametrenin kontrol edilebilmesi ile de büyük çaplı üretim için oldukça yüksek potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir. Ancak, uzun proses süresi, yüksek enerji tüketimi, düşük grafen verimi ve aynı zamanda da son üründe oluşan hatalar sebebiyle bu yöntem geniş alanlarda kullanılabilirliğini kısıtlamıştır [13].

Kimyasal indirgeme: Grafen oksit, suda ve diğer çözücülerde kolay dağılım sağlayan oksijen içeren gruplara sahip, işlevselleştirilmiş yüzeyi ile bilinen öncü bir malzemedir. Hidrazin veya sodyum borohidrit gibi indirgeme maddelerinin kullanımı gibi kimyasal yollarla grafen oksidi indirgeyerek, önemli ölçüde sp^2 karbon-karbon bağına eski haline getirmek ve onu indirgenmiş grafen okside ve hatta grafene dönüştürmek mümkündür. GO'nun kimyasal olarak indirgenmesi, basit ve ölçeklenebilir bir süreç, çözelti bazlı işleme teknikleriyle uyumluluk ve ortaya çıkan grafen tabakalarının özelliklerini ayarlama yeteneği dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar. Bununla birlikte, indirgeme

işleminin hatalarının ortaya çıkarılabileceğine ve grafen kafesinin homojenliğini bir dereceye kadar bozabıleceğine dikkat etmek önemlidir [63].

Epitaksiyel termal sentez: Grafenin, tek kristal silisyum karbür (SiC) yüzeyinde epitaksiyel termal sentezi en bilinen sentez tekniklerinden biridir [64]. “Epitaksi” terimi, tek kristal yüzey üzerinde tek kristal film biriktirilmesine olanak sağlayan bir yöntemi belirtmektedir [65]. SiC levhalar üzerinde grafenin doğrudan sentezlenmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yaklaşım, bir vakum veya inert gaz ortamında yüksek sıcaklıklarda SiC substrattan silikonun kontrollü süblimasyonuna dayanır ve geride kendiliğinden grafen katmanları oluşturan karbon bakımından zengin bir yüzey bırakır [66].

Epitaksiyel büyüme yöntemi: Sonraki transfer işlemlerine gerek kalmadan doğrudan bir alt tabaka üzerinde yüksek kaliteli grafen üretme avantajı sunar. Katman kalınlığı üzerinde mükemmel kontrol ve minimum kafes hataları sağlar. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık koşulları ve belirli SiC substratları gerektirmektedir. Bu sebeple uygulanabilirliğini de sınırlamaktadır [67].

Kimyasal buhar biriktirme (CVD): Yüksek kaliteli grafen sentezi için çok yönlü ve yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, katman sayısı üzerinde hassas kontrol ile geniş alanlı, atomik olarak ince grafen katmanlarının üretilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. CVD, çeşitli alt tabakalar üzerinde grafen büyümesini sağlamak için yüksek sıcaklıklarda öncü gazların kimyasal reaksiyonlarına dayanır [68].

CVD grafen sentezinin altında yatan temel ilkeler, hidrokarbon öncü gazlarının bir metal katalizör substrat varlığında ayrıştırılmasını içerir. Süreç, hidrokarbon moleküllerinin katalizör yüzeyine adsorpsiyonu ile başlar ve ardından karbon türlerine ayrışır. Bu karbon türleri daha sonra grafen katmanları oluşturmak üzere yeniden bir araya gelir [68].

Öncü gazların, katalizör malzemelerin ve büyüme koşullarının seçimi, sentezlenen grafenin kalitesini ve özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Yaygın öncü gazlar arasında metan (CH_4) ve etilen (C_2H_4) bulunurken, yaygın olarak kullanılan katalizörler bakır (Cu) ve nikeldir (Ni). CVD sırasındaki sıcaklık ve basınç koşulları, grafen katmanlarının oluşumunu kolaylaştırmak için dikkatlice kontrol edilir [69].

Tek katmanlı grafen, çift katmanlı grafen ve çok katmanlı grafenin tümü, belirli uygulamalara uyarlanabilmesi için değişen katman kalınlıklarıyla sentezlenebilir [68].

CVD ile sentezlenen grafen, elektronik malzemeler alanında umut vaat etmektedir. Olağanüstü elektrik iletkenliği, yüksek taşıyıcı hareketliliği ve geleneksel yarı iletken işleme teknikleriyle uyumluluğu onu çeşitli elektronik uygulamalar için ideal bir aday haline getirmektedir [70].

1.1.3. Grafen Oksitin İndirgenmesinde Uygulanan Yöntemler

GO indirgeme, bazal düzlemdeki oksijen içeren fonksiyonel grupların önemli bir kısmının ortadan kaldırılması sürecini ifade eder [71]. Bir başka ifade ile karbon atomları sp^3 'ten sp^2 hibritleşmesine dönüşür.

Grafen oksitin indirgenmesinde termal, kimyasal, elektrokimyasal, mikrodalga ve fotokimyasal yöntemler kullanılmaktadır.

Termal indirgeme: GO'nun yüzeyinden oksijen içerikli fonksiyonel grupların uzaklaştırılmasında en bilinen yöntemlerden biri termal indirgemedir. Bu yöntemde, oksijen içerikli fonksiyonel gruplar su, karbon dioksit ve karbon monoksit formunda uzaklaştırılır. Termal indirgeme, basit, düşük maliyetli ve çevre dostu bir elektriksel iletken grafen üretim yöntemidir. Ancak bu yöntem, karmaşık deney düzeneğine ihtiyaç duyar ve yüksek miktarda enerji tüketir [72, 73]. Termal indirgeme ile elde edilen grafen, fotovoltaiik hücreler, kapasitörler, sensörler ve transparan elektrotlar gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilir [74]. GO'nun indirgenmesinde etkili ve basit bir yöntem olan kimyasal indirgeme yöntemi, GO numunesi kimyasal indirgeme ajanı içeren çözeltide belirli bir süre ve sıcaklıkta bekletilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu sayede, oksijen içerikli fonksiyonel grupların uzaklaştırılması sağlanır [72]. Elde edilen indirgenmiş GO, grafen yapısına benzer ancak yapısal kusurlarla birlikte oksijen kalıntısı ve başka hetero atomlar da içermektedir. İndirgeme işlemi ile, GO'daki oksijen içerikli fonksiyonel grupların çoğu uzaklaştırılır böylece grafit aromatik yapısındaki p elektron konjugasyonu tekrar sağlanır [75].

Elektrokimyasal indirgeme: Tek adımlı veya iki adımlı indirgeme yaklaşımı şeklinde gerçekleştirilebilmektedir. Tek adımlı elektrokimyasal indirgemedir, bir elektrot yüzeyinde indirgenmiş GO ince filmlerin üretilmesi için, GO tabakaları tampon elektrolit varlığında sulu kolloidal süspansiyondan direk bir şekilde elektrokimyasal olarak indirgenir [76]. İki adımlı elektrokimyasal indirgemedir, bir GO ince film öncelikle

substrat olarak davranan bir elektrot yüzeyine biriktirilir ve ardından kurutulularak GO kaplı elektrot elde edilir. GO kaplı substrat elektrot, standart üç elektrotlu elektrokimyasal sistemde tampon veya destekleyici elektrot varlığında elektrokimyasal indirgeme işlemine tabi tutulur [73].

Mikrodalga ısıtma: Grafitik prekürsör malzemelerin indirgenmesinde ve eksfoliasyonunda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Mikrodalga uygulaması, toz haldeki GO'ya katı hal indirgenmesi ya da GO'nun süspansiyonda indirgenmesi şeklinde uygulanabilmektedir. Mikrodalga ile indirgeme yöntemi hızlı ve enerji tasarruflu bir yöntemdir. Mikrodalga destekli ısıtma, numunenin iç sıcaklığında ani bir artışa neden olarak enerjinin direk olarak numuneye transferini sağlar. İç sıcaklıktaki bu ani artış reaksiyon süresini belirgin bir şekilde kısaltır ve reaksiyon etkisini artırır. Ayrıca, çözücü ve numune arasındaki dielektrik sabitlerinin farklı olması nedeniyle, seçici dielektrik ısıtma numuneye direk enerji transferini belirgin bir şekilde artırarak iç sıcaklıkta ani bir yükselmeye neden olur ve böylelikle GO indirgenmiş olur [75].

Fotokimyasal indirgeme: GO'nun fotokimyasal indirgenmesi katkısız, hızlı, temiz ve çok yönlü bir indirgeme yöntemi olarak bilinmektedir. Yüksek kaliteli indirgenmiş GO eldesi, GO'nun güneş ışığına, UV ışınına ya da atomsal lazere maruz kalması sonucunda gerçekleşmektedir. İndirgeme prosesi, film ya da süspansiyon halde uygulanabilmektedir. Fotokimyasal indirgeme, herhangi bir fotokatalizör kullanılmadan GO'nun UV ışınına maruz kalmasıyla gerçekleşebilmektedir. Dispers haldeki GO, 335nm ve 532nm dalga boylarında atomsal lazerle nano-saniye lazer atışları sonucunda indirgenmiş GO'ya dönüşmektedir. Herhangi bir kimyasal indirgeyici madde ve yüzey aktif madde kullanım ihtiyacı ve ilave saflaştırma proses gereksinimi olmadan GO'nun indirgenmesinde basit ve avantajlı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [75,77].

GO'nun kimyasal indirgenmesinde güçlü indirgeyici maddelerin kullanılması önemli güvenlik ve çevresel hususları da gündeme getirmektedir. Özellikle hidrazin, yüksek toksisitesi ve olumsuz sağlık etkileri ile bilinmektedir ve kullanımı sırasında titiz güvenlik protokolleri gerektirir. Hidrazinle ilişkili riskleri azaltmak için yeterli havalandırma, kişisel koruyucu ekipman ve güvenlik yönergelerine sıkı sıkıya bağlılık zorunludur [78]. Çevresel kirlenmeyi önlemek için uygun bertaraf prosedürleri izlenmelidir. Araştırmacılar, RGO üretmek için daha güvenli ve çevre dostu yaklaşımlar

sunan alternatif indirgeme yöntemlerini keşfetmeye teşvik edilmektedir. Sonuç olarak, hidrazin ve sodyum borohidrit gibi güçlü indirgeyici maddeler kullanan kimyasal indirgeme yöntemleri, indirgenmiş grafen oksit üretmenin etkili yollarını temsil etmektedir. Bu yöntemler, indirgeme verimliliği ve elektrik iletkenliğinin iyileştirilmesi açısından avantajlar sunmaktadır [78]. Bununla birlikte, özellikle hidrazin söz konusu olduğunda, önemli güvenlik endişeleri ve çevresel etkileri de beraberinde getirmektedir [79].

Yukarı da belirtilen sebepler dolayısıyla bu tez çalışması için indirgeme maddesi olarak doğal ve çevre dostu indirgeme maddelerinden C vitamini ve kuşburnu toz ekstrakt belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde GO'nun indirgenmesinde çevre dostu çok çeşitli indirgeme maddeleri kullanıldığı da görülmüştür.

Kuila ve ark., [80] GO'nun indirgenmesinde yabani havuç kökünü çevre dostu indirgeme maddesi olarak kullanmıştır. Yabani havuç kökünde bulunan endofitik mikroorganizmaların GO'nun indirgenmesinde etkili olduğu belirtilmektedir.

Thi Vu ve ark. [81], GO'nun indirgenmesinde çevre dostu malzeme olarak kafein, Hou ve ark. [82], kurutulmuş kasımpatı çiçeği ekstraktı kullanmışlardır.

Xu ve ark., [83] farklı çevre dostu maddelerin GO'nun indirgenmesi üzerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında, askorbik asit, glukoz ve çay polifenolü çevre dostu indirgeme maddeleri olarak seçilmiştir. Yapılan çalışmada, en iyi indirgeme etkisinin elektriksel iletkenliğin en yüksek olduğu askorbik asit ile elde edildiği belirtilmiştir.

Upadhyay ve ark., [84] üzüm ekstraktının GO'nun indirgenmesinde çevre dostu indirgeme maddesi olarak kullanılmasını araştırmıştır. Çalışmada, üzüm ekstraktı ile indirgenmiş GO'nun sudan boyarmadde uzaklaştırma özelliği incelenmiş ve analiz sonucuna göre indirgenmiş GO'nun adsorban olarak oldukça etkili olduğu belirtilmiştir.

Bo ve ark. [85], fenolik bileşiklerden hidroksisinnamik asit yapısında bulunan kafeik asit ile GO'nun indirgenmesini incelemiştir. Çalışmada, farklı indirgeme sürelerinin etkisi araştırılmış ve en iyi indirgeme 24 saat süreyle yapılan uygulamada tespit edilmiştir.

Chu ve ark. [86], siyah soya fasulyesi ekstraktı ile GO'yu indirgemişlerdir. Farklı indirgeme sıcaklığı ile birlikte mikrodalga işlem uygulanmasının indirgenme etkisini

inceledikleri çalışmalarında, 95°C indirgeme reaksiyon sıcaklığı ve sonrasında yapılan mikrodalga uygulamasının indirgenme üzerine olumlu etkisi olduğu elektriksel direnç değişimiyle belirlenmiştir.

Suresh ve ark. [87], GO'nun indirgenmesinde çevre dostu indirgeme maddesi olarak ıspanak kullanmışlardır.

Khanra ve ark. [88], Mayayı, çevre dostu ve düşük maliyetli indirgeme maddesi olarak seçmişlerdir. Maya içeriğindeki nikotinamid adenin dinükleotid fosfat maddesi nedeniyle indirgeyici bir ajan olarak kullanılmaktadır.

Gurunathan ve ark. [89], GO'nun antikanser özelliğini incelemek üzere resveratrol ile indirgenmesini incelemişlerdir. Resveratrol, kırmızı üzümlerden elde edilen ve antioksidan özelliklere sahip bulunan bir bitki bileşiği olarak tanımlanmaktadır.

Chu ve ark. [90], esnek grafen elektrot ürettikleri çalışmalarında GO'yu hibisküs bitkisi ekstraktı ile indirgemişlerdir.

Haghigi ve Tabrizi [91], çevre dostu bir madde indirgeme maddesi olarak gülsuyu kullandıkları çalışmalarında, gülsuyu ile indirgemenin elektrokatalitik özelliğini araştırmışlardır.

Yaragalla ve ark. [92], antimikrobiyel ve antikanser özelliklerini incelemek üzere GO'yu üzüm çekirdeği ekstraktı kullanarak indirgemişlerdir.

Gültekin [56] tez çalışmasında; doğal indirgeme maddesi olarak kuşburnu, keçiboynuzu ve karanfil kullanılmıştır.

Gültekin [84] çalışmasında doğal indirgeme maddesi olarak C vitamini tercih etmiştir.

1.1.4. Grafen Oksitin Kullanım Alanları

GO günümüzde enerji depolamadan kompozit malzeme üretimine, sensör üretiminden farmakoloji sektörüne kadar birçok alanda kendine kullanım alanı bulmaktadır. GO'nun sensörler alanındaki en önemli uygulamalarından biri gaz algılama cihazlarında kullanılmasıdır. GO bazlı gaz sensörleri, diğerlerinin yanı sıra azot dioksit (NO₂), amonyak (NH₃) ve karbon dioksiti (CO₂) kapsayan çeşitli gazlara karşı olağanüstü hassasiyet sergiler. GO tabanlı gaz sensörlerinin altında yatan mekanizma, gaz molekülleri ile GO yüzeyi arasındaki etkileşime dayanır ve elektrik iletkenliğinde fark

edilebilir değişikliklerle sonuçlanır. Elektrik iletkenliğindeki bu değişiklikler, gerçek zamanlı gaz algılama ve izlemenin temelini oluşturur [63,94-95].

GO tabanlı biyosensör çalışmalarının özünde nanomateryal ve hedeflenen biyomoleküller arasındaki mükemmel etkileşim bulunmaktadır. GO yüzeyindeki fonksiyonel gruplar, antikorlar veya DNA probları gibi biyoreseptörlerin immobilizasyonunu sağlar ve bunlar seçici olarak ilgili biyomolekülleri yakalayıp onlarla etkileşime girebilir. Bu bağlanma olayı, elektrik iletkenliğinde veya optik özelliklerde fark edilebilir bir değişikliğe yol açarak, ilgilenilen biyomolekölün varlığını ve konsantrasyonunu gösteren ölçülebilir bir sinyal sağlar [63, 94 - 97].

GO tabanlı biyosensörler, kanser, bulaşıcı hastalıklar ve nörolojik bozukluklar da dahil olmak üzere çeşitli hastalıklarla ilişkili biyobelirteçlerin hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesini sağlayarak tıbbi teşhis alanında önemli ölçüde benimsenmiştir.

GO'nun adsorpsiyon ve desorpsiyon dâhil olmak üzere kimyasal süreçler yoluyla analitlerle etkileşime girme konusundaki benzersiz yeteneği, çevresel izleme, endüstriyel güvenlik ve analitik kimyayı kapsayan uygulamalarla kimyasal sensörlerin geliştirilmesinin önünü açmıştır. GO tabanlı kimyasal sensörlerin çalışması, hedef moleküllerin GO yüzeyine tersine çevrilebilir adsorpsiyonuna bağlıdır ve bu da elektrik iletkenliğinde veya diğer ölçülebilir özelliklerde değişikliklere yol açar. Bu adsorpsiyon-desorpsiyon süreci, analitin kimyasal yapısına ve GO yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplarla etkileşimine bağlıdır. Analit molekülleri GO yüzeyine bağlandıkça, GO'nun elektronik yapısında değişikliklere yol açarak ölçülebilir bir tepkiye neden olurlar [98].

Grafen oksitin hidrofilik yapısı, ona nem sensörlerinin geliştirilmesinde yararlanılan benzersiz özellikler kazandırmaktadır. Bu sensörler, GO'nun nem seviyelerindeki dalgalanmalara yanıt olarak su moleküllerini absorbe etme ve serbest bırakma yeteneğine dayalı olarak çalışır. Bu özellik, hava durumu izleme ve hassas nem kontrolünün zorunlu olduğu endüstriyel süreçler de dâhil olmak üzere çok sayıda uygulama için kullanılmaktadır. Bu sensörlerin duyarlılığı ve doğruluğu, operasyonel verimlilik ve ürün kalitesi için hassas nem yönetiminin zorunlu olduğu sektörlerde onları çok değerli kılmaktadır [96-99].

Grafen oksitin yüksek yüzey alanı, olağanüstü elektrik iletkenliği ve kolay işlevselleştirilebilmesi, onu süperkapasitörler, batarya elektrotları ve yakıt hücrelerini

içeren bir dizi uygulamada vazgeçilmez bir bileşen haline getirmektedir. Literatürde, GO'nun enerji depolama ve dönüştürme teknolojilerinde devrim yaratmada oynadığı önemli rolü, mekanizmalarını, avantajları ve zorlukları dikkat çeken bir araştırma konusu olmuştur [100 - 103].

GO'nun bir diğer kullanım alanı da kaplamalardır. GO bazlı kaplamalar, olağanüstü korozyon direnci, bariyer özellikleri ve elektrik iletkenliği ile dikkat çekmektedir. GO'nun kaplamalara dâhil edilmesi, kaplanmış yüzeylerin ömrünü ve işlevselliğini uzatan dikkate değer özellikler kazandırır. GO'nun geçirimsiz yapısı ve yüksek en-boy oranı, onu neme, gazlara ve aşındırıcı maddelere karşı etkili bir bariyer haline getirerek altta yatan alt tabakaların korozyonunu ve bozulmasını önler. GO bazlı kaplamaların altında yatan mekanizma, ince bir GO tabakasının alt tabaka yüzeyine biriktirilmesini içerir. Bu katman, alt tabakayı çevresel faktörlerden ve kimyasal saldırılardan koruyan koruyucu bir kalkan görevi görür. Ayrıca GO'nun elektrik iletkenliği, antistatik özelliklere sahip kaplamaların geliştirilmesine olanak tanıyarak elektronik ve telekomünikasyon alanlarında uygulama alanı bulmaktadır [104-109].

GO'nun olağanüstü özellikleri malzemelerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini artırarak havacılık, otomotiv, savunma, altyapı ve elektronik sektörlerindeki yenilikleri katalize eder [108, 109].

Çok yönlü iki boyutlu bir nanomalzeme olan GO, biyoyumluluk, geniş yüzey alanı ve kolay işlevselleştirme gibi benzersiz özellik kombinasyonu nedeniyle biyotıp alanında büyük ilgi görmüştür. GO'nun biyomedikal uygulamalardaki dönüştürücü potansiyeli ayrıca ilaç dağıtımı, doku mühendisliği ve tıbbi görüntüleme de dahil birçok alanda da kullanılmaktadır [110-115].

Grafen ve türevlerinin tekstildeki uygulamalarını inceleyecek olursak;

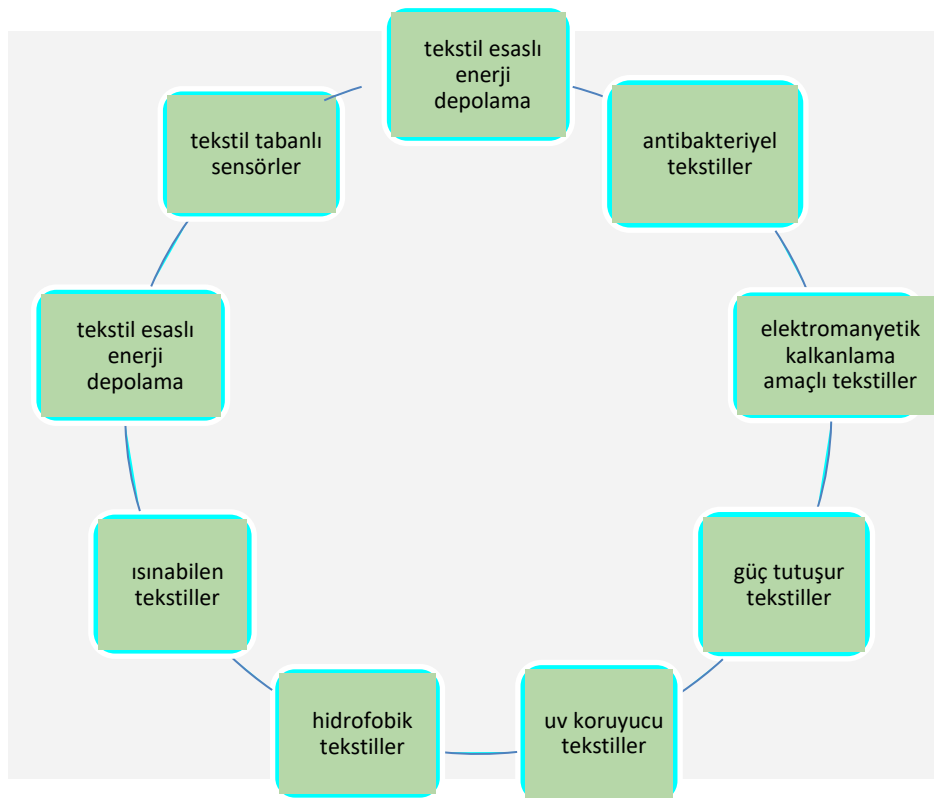
İletkenlik ve esneklik gibi özellikleri sayesinde grafen, elyaf, iplik ve kumaş gibi esnek giyilebilir elektronik tekstil alanlarında uygulanabilmektedir [116].

Malzemenin, mekanik ve optik özelliklerinin de iyi olması doğrudan ürünlere yansımakta ve kullanım alanını çeşitlendirmektedir. Tıbbi tekstiller ve giyilebilir elektronik tekstiller gibi çok fonksiyonlu kumaşların da elde edilmesinde grafen önemli bir malzeme haline gelmiştir [117].

Grafen ve türevleri, polimerlerin içinde katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır. Böylece üretilen liflerin, ipliklerin veya kumaşların hem mukavemetlerini hem de iletkenlik özelliklerini de arttırılabilmektedir [118].

İletken nano tekstiller bu özellikleri sayesinde nano-optoelektronik alanda da kullanım alanı bulmaktadır [119].

Şekil 1.5'te grafenin tekstilde kullanım alanları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Grafenin Tekstilde Kullanım Alanları [56]

1.2. Tekstil Yüzeylerinde Nano Yapıların Elde Edilme Yöntemleri

Nano yapıların tekstil endüstrisine entegrasyonu, malzeme bilimi ve mühendisliği alanında önemli bir adımı temsil etmektedir [120]. Nanometre ölçeğindeki boyutlarıyla karakterize edilen nano yapılar, tekstil malzemeleri ve uygulamalarında sayısız fırsat sunmaktadır.

Nano yapıların tekstillerdeki etkileri, sektördeki çeşitli uygulamalara kadar uzanmaktadır. Özellikle akıllı tekstiller [121] tıbbi tekstiller [122, 123] spor kıyafetleri

[124, 125] ve dış mekan giysileri nano yapıların entegrasyonundan önemli ölçüde faydalanmıştır. Akıllı tekstillerde, nano yapılar hayati belirtileri [121, 123], sıcaklığı ve çevresel koşulları izleyebilen sensörlerin geliştirilmesini sağlayarak giyilebilir teknoloji ve sağlıkla ilgili uygulamalardaki ilerlemelere katkıda bulunmuştur.

Nano yapılar, tekstil yüzeylerine çeşitli yöntemlerle uygulanabilmektedir. Bunlardan biri olan kimyasal yöntemler, hassas kontrol ve çok yönlülük sunarak tekstil yüzeylerinde nano yapıların geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [126]. Sol-jel yöntemi, tekstiller üzerinde nano kaplamalar hazırlamak için kullanılan kimyasal bir tekniktir. Sıvı bir ortamda metal alkoksitler veya kolloidal nanopartiküller içeren bir çözelti olan bir sol oluşturulmasını içerir. Bu sol, tekstil alt tabakasına uygulanır ve katı bir nano kaplama oluşturmak için kontrollü kurutma ve kütleme işlemlerinden geçirilir. Sol-jel yöntemi, hidrofobiklik, UV direnci ve antimikrobiyal özellikler de dahil olmak üzere tekstil özelliklerinin özelleştirilmesine olanak tanır [127, 128].

Nano yüzey kaplama teknikleri, nano yapıları tekstiller üzerinde biriktirmek, özelliklerini ve işlevlerini geliştirmek için çeşitli yöntemleri kapsar. Bu teknikler arasında Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) öne çıkmaktadır.

CVD: Yüksek sıcaklıklarda öncü gazların kontrollü kimyasal reaksiyonlarını kolaylaştırarak tekstiller üzerinde yüksek kaliteli nano kaplamaların sentezlenmesi için çok yönlü bir yöntemdir. Grafen ve metal oksitler gibi malzemelerin biriktirilmesini sağlayarak elektrik iletkenliği, mekanik mukavemet ve korozyon direnci gibi tekstil özelliklerini geliştirir [129].

Kimyasal yöntemlerin yanı sıra, fiziksel yöntemler de tekstil yüzeylerine nano yapıların eklenmesi, hassas kontrol ve özel işlevler sağlanması için değerli yaklaşımlar sunmaktadır.

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD): Tekstil mühendisliğinde kullanılan önemli bir tekniktir. PVD, malzemelerin vakum ortamında tekstil alt tabakaları üzerine buharlaştırılmasını ve yoğunlaştırılmasını içerir. Bu işlem ince ve düzgün bir nano kaplama ile sonuçlanır. Püskürtme ve buharlaştırma gibi PVD yöntemleri, metaller, seramikler ve polimerler dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin tekstiller üzerine biriktirilmesini sağlar. Bu kaplamalar bariyer performansı, aşınma direnci ve termal stabilite gibi tekstil özelliklerini geliştirir [130, 131].

Elektro çekim: Bu teknikte, bir polimer çözeltisine veya eriyiğine yüksek voltajlı bir elektrik alanı uygulanarak ultra ince polimer liflerinin veya nanoliflerin oluşmasını sağlar. Bu nanolifler tekstil yüzeyleri üzerinde biriktirilerek nano yapıları kaplamalar oluşturulabilir.

Nanopartikül yüzey kaplaması: Tekstil yüzeylerini modifiye etmek için değerli bir fiziksel yöntemdir. Nanopartikül süspansiyonlarının, nanopartiküllerin kumaş yüzeyine yapıştığı tekstiller üzerine uygulanmasını içerir. Nanopartiküller metaller, metal oksitler ve karbon bazlı malzemeler de dahil olmak üzere çeşitli malzemelerden oluşabilir. Kullanılan nanopartiküllerin türüne bağlı olarak, bu yöntem tekstillere antimikrobiyal özellikler, UV koruması ve elektrik iletkenliği gibi işlevler kazandırabilir [132, 133].

Radyasyon kaynaklı yöntemler: Tekstil yüzeylerinde nano yapılar oluşturmak için benzersiz fırsatlar sunmaktadır. Bu yöntemler, tekstil yüzeylerinin iyonlaştırıcı radyasyona veya elektron ışınlarına maruz bırakılmasını içerir. Radyasyon, tekstilin moleküler yapısı ile etkileşime girerek yüzeyde nano boyutlu kusurların ve modifikasyonların oluşmasına yol açar. Radyasyon kaynaklı nano yapılandırma, kullanılan spesifik radyasyon parametrelerine bağlı olarak boyanabilirlik, yapışma ve biyouyumluluk gibi tekstil özelliklerini geliştirebilir [132, 134, 135].

Biyolojik ve çevresel yöntemler, çevreye duyarlı üretim süreçlerine yönelik artan taleple uyumlu olarak, tekstil yüzeylerine nano yapıların eklenmesi için sürdürülebilir ve çevre dostu yaklaşımlar sunmaktadır. Bu yöntemler özellikle biyouyumluluk ve sürdürülebilirliğin temel hususları olduğu uygulamalarda değerlidir.

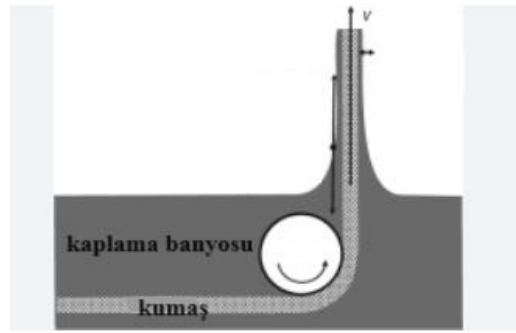
Biyosentetik nano yapı üretimi: Tekstil yüzeylerinde nano ölçekli yapılar oluşturmak için mikroorganizmaların yeteneklerinden yararlanan yeni bir yaklaşımdır. Bakteri ve mantar gibi mikroplar, doğrudan tekstiller üzerinde nanopartiküller üretmek üzere tasarlanabilir. Bu yeşil sentez yöntemi, sert kimyasallara ve yüksek sıcaklıklara olan ihtiyacı ortadan kaldırarak çevresel etkiyi azaltmaktadır. Biyosentezlenmiş nano yapılar, tekstil ürünlerine antimikrobiyal özellikler ve kirletici bozunma yetenekleri de dahil olmak üzere benzersiz işlevler kazandırabilir [136].

1.2.1.Kaplama Prosesleri

- Emdirme kaplama: Tekstil mühendisliğinde kumaş yüzeylere düzgün bir kaplama malzemesi tabakası uygulamak için kullanılan temel bir tekniktir.

Bu yöntem, tekstil malzemesinin bir kaplama çözeltisine tamamen daldırılmasını içerir. Süreç, nihai ürünün istenen özelliklerine bağlı olarak polimerler, nanopartiküller veya diğer fonksiyonel kimyasallar gibi çeşitli malzemelerden oluşabilen kaplama çözeltisinin hazırlanmasıyla başlar. Çözeltinin bileşimi ve viskozitesi, kaplama tabakasının kalınlığını ve homojenliğini belirleyen kritik faktörlerdir [137, 138].

Literatürde GO'nun tekstil yüzeylerine kaplanmasında en çok uygulanan teknik emdirme yöntemidir. Negatif yüklü yapısından dolayı sulu çözeltilerde dispersiyon eldesi açısından, grafen oksit oldukça ideal bir malzemedir. Kumaştaki fonksiyonel gruplarla grafen oksitteki negatif gruplar etkileşime girer ve böylece grafen oksitin tutunması artırılmış olur. Bu yöntemde, grafen oksit dispersiyonuna belirli bir süre emdirilen kumaş, sonrasında kurutulur. Daha sonra indirgeme işlemi istenmesi halinde uygulanabilir [76]. Şekil 1.6'da emdirme kaplama prosesi görülmektedir.

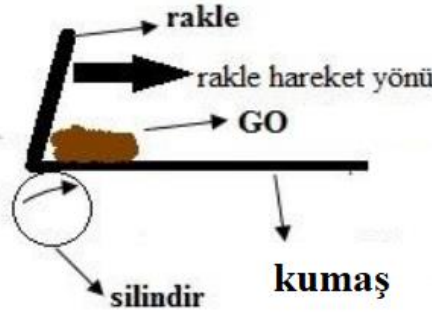


Şekil 1.6. Emdirme Yöntemi [139]

- Rakle kaplama: Kaplama uygulamalarındaki hassasiyeti ve homojenliği ile bilinmektedir [140, 141].

Süreç, genellikle su itici veya yansıtıcı maddeler gibi çeşitli fonksiyonel kimyasalları içeren ve uygun bir çözücü içinde karıştırılan kaplama karışımının hazırlanmasıyla başlar. Bu karışımın viskozitesi çok önemlidir; kolay uygulama için yeterince akışkan olmalı, ancak kumaşın doğal özelliklerini değiştirebilecek aşırı penetrasyonu önlemek

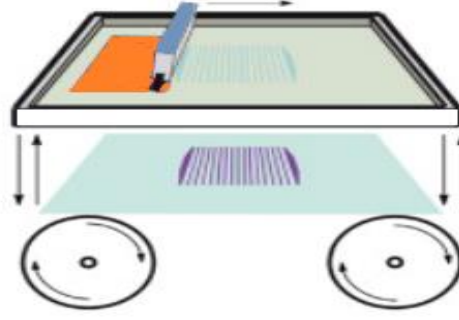
için yeterince viskoz olmalıdır. Uygulama sırasında sıyırma bıçağı (rakle) kumaş yüzeyini süpürerek kaplama karışımını eşit bir şekilde yayar. Bıçağın açısı ve basıncı kritik parametrelerdir. Bu parametreler, uygulanan kaplama tabakasının kalınlığını belirlerler. Optimum bir açı eşit dağılım sağlarken, doğru basınç kaplamanın kumaşın yapısına çok derinlemesine sızmadan kumaşın yüzeyine istenen ölçüde nüfuz etmesini garanti eder [142]. Rakle kaplama yöntemi şematik olarak Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Rakle ile Kaplama Yöntemi [93]

- **Şablon baskı:** Geleneksel tekstil baskıcılığında şablon baskı tekniği, en büyük paya sahiptir.

Bu yöntem, diğer baskı yöntemlerine göre daha basit ve hızlıdır. Şablon baskı tekniği, günümüzde, sensörler, güneş hücreleri, organik ışık yayan cihazlar ve ince film transistörlerin yapımında tercih edilmektedir. Şablon baskıda ilk önce şablon kumaşın belirlenen kısmına yerleştirilir ve sabitlenir sonra baskı patı şablonun üst kenarına dökülür. Raklenin şablonun üstünden aşağı doğru hareketi ile baskı patını şablonun gözeneklerinden kumaş yüzeyine doğru ittirilmesiyle baskı işlemi gerçekleştirilir. Raklenin 1 pasaj hareketiyle baskı patı kumaşa aktarılmış olur [143]. Şekil 1.8’de şablon baskı şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.8. Şablon Baskı Şematik Gösterimi [74]

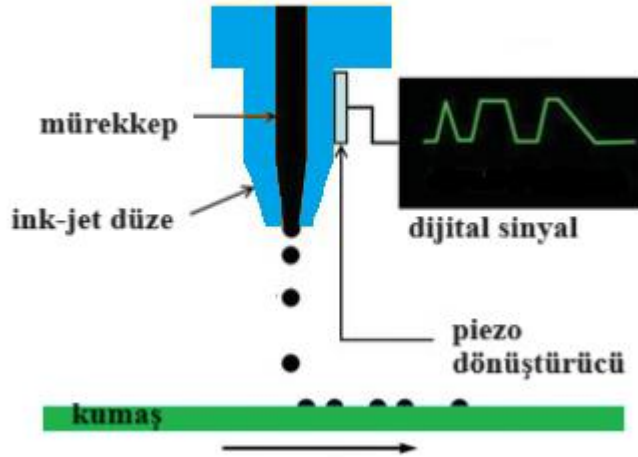
Şablon baskı tekniğinin avantajları; yeniden üretilebilirliği, basitliği, birçok yüzey ve malzeme ile uyumluluğunun yüksek olması sayılabilir. Bu sebeptendir ki, giyilebilir cihazların büyük çaplı üretimlerinde oldukça düşük maliyetlidir. Baskı işlemi sırasında baskı patının kuruma riski, baskı özelliklerini ve elde edilecek ürünün özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bir başka dezavantaj da; şablon ve kumaşın direkt temasıdır. Raklenin baskısı ile birlikte, kumaş üzerinde istenmeyen çizikler veya kırışıklıklar oluşabilir. Bu da doğrudan transparanlığı ve esnekliği etkileyebilir [143, 75]. Şablon baskının kalitesi, patın şablonun gözeneklerinden geçişi, baskılı yüzeyin düzgünlüğünü ve homojenliğini de etkileyeceğinden önemlidir. Grafen pat formülasyonları optimum vizkozitenin sağlanması ile uygun baskı patı yoğunlukla, grafen dispersiyonların jelaletleşmesi veya yüksek konsantrasyonlu grafen patlarının hazırlanması üzerinedir. Şablon baskıcılığında grafen pat kullanımındaki bir başka dezavantaj da, oldukça viskoz grafen dispersiyonu hazırlandığında yoğunluk sebebiyle grafenin topaklaşma riskidir [143].

- **İnk-jet baskı:** İnk jet baskıcılıkta kumaşla direkt temas eden fiziksel bir baskı şablonu kullanılmaz.

Grafen mürekkep formülasyonları ile uygulama ink jet baskı için oldukça dikkat çeken çalışma alanıdır. İstenilen şablonun oluşması için kumaş üzerinde baskı düzelerinden mikro-boyutlu mürekkep damlacıklarının sürekli oluşturulması ve püskürtülmesi ink jet baskı tekniğinin çalışma prensibidir. İnk-jet baskı tekniği, mürekkep damlacığının bilgisayar üzerinden dijital olarak kontrol edilerek istenilen noktaya doğru bir şekilde yerleştirilmesi esasına dayanır. İnk-jet baskı, mikro-damlacıkların oluşumu, mekanik

baskı üreten bir düze aracılığı ile piezo elektrik mekanizma veya basıncı ve hacmi artırmak üzere mürekkebin ısıtılması şeklindedir [143].

GO'nun hidrofilik yapısı nedeniyle GO esaslı mürekkepler suda ve yaygın kullanılan çözücülerde kolaylıkla çözünebildiklerinden dolayı uzun yıllardır ink jet baskıcılığında kullanılmaktadır [143]. İnk jet baskı tekniğinin avantajları, yüksek çözünürlüğe sahip olması, fiziksel bir baskı malzemesi gereksinimi olmaması, üretim halindeyken tasarım yenilemesine olanak tanınması olarak sayılabilir. Bu teknikte, temassız baskı yöntemi sayesinde kumaş yüzeyinde kuvvetli bir baskı oluşmaz ve böylece kirlenme, çizik ve kırışık oluşumu gibi dezavantajlar ortadan kaldırılmış olur. Aynı zamanda, çok ince grafen tabaka birikmesine imkan sağladığı için ince film uygulamalarında da bu yöntem öne çıkmaktadır. Dezavantajı ise, oldukça düşük üretim hızına sahip olmasıdır. Bir baskı cihazında çoklu düzeler ile çalışmak verimi artırmaktadır. Ancak bu durum, hata ve bozulma olasılığını artırmaktadır [143]. Şekil 1.9'da ink-jet baskı prosesi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.9. İnk-jet Baskı Prosesi [77]

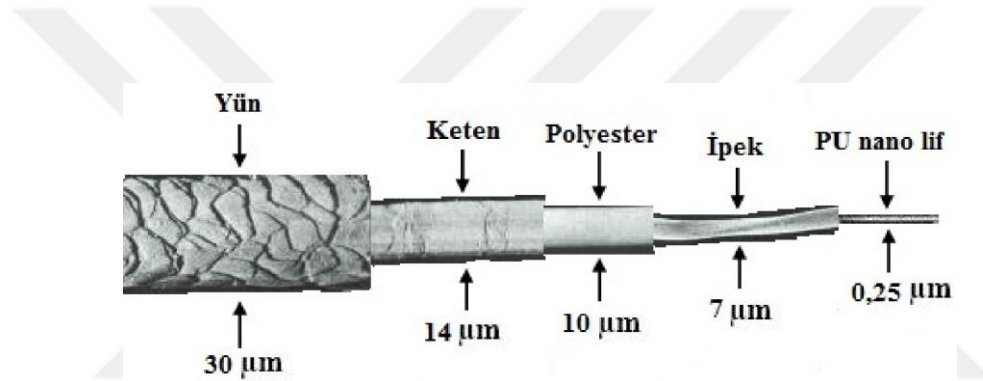
Tekstil materyallerinin kaplanmasında seçilen yöntem kadar kullanılan malzeme de önem ve farklılıklar arz etmektedir. Tekstil uygulamalarında kaplama malzemelerinin seçimi, istenen kumaş özelliklerine ulaşmanın en önemli yoludur. Polimerlerden nanopartiküllere ve fonksiyonel kimyasallara kadar geniş bir spektrumu kapsayan bu

malzemeler, tekstil malzemelerine çeşitli özellikler kazandırarak farklı uygulamalardaki kullanımlarını artırmaktadır.

1.2.2.Nanolif Üretim Yöntemleri

Yunanca sözlük anlamı cüce olan “nanos” sözcüğünden türemiş bir kelime olan Nano, ölçü birimi olarak herhangi bir birimin milyarda biri anlamı taşır [144].

Lifler söz konusu olduğunda 'nano' terimi, lif çapının büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir. Bir nanometre, metrenin milyarda biri ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$), mikronun 1000’de 1 ölçeğindedir [145]. Şekil 1.10’da lif çaplarının şematik olarak karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 1.10. Lif Çaplarının Şematik Olarak Karşılaştırılması

Çapı 1 mikrondan daha küçük olan lifler olarak ifade edilen nanolifler, yüksek gözenekli yapıda olmaları, yüksek filtreleme kabiliyetlerinin olması, biyo uyumluluklarının iyi olması, geniş yüzey alanına sahip olmaları, kaplama özelliğine sahip olmaları gibi önemli özellikleri sebebiyle çok çeşitli uygulama alanları bulmaktadırlar [146].

Nanoliflerden üretilmiş tekstil yüzeyleri şu avantajları sağlamaktadır: [147]

Yüksek yüzey alanı, kütle oranı,

Düşük yoğunluk,

Yüzey özelliklerindeki esneklik,

Çok iyi mekanik özellikler,

Yüksek gözenek hacmi,

Düşük gözenek boyutu.

Nanolif elde etme yöntemleri şu şekildedir:

- Fibrilasyon yöntemi ile nano lif üretimi
- İki bileşenli yöntem ile nano lif üretimi
- Eriyikten püskürtme (meltblown) yöntemi ile nano lif üretimi
- Elektro çekim (electrospinning) yöntemi ile nano lif üretimi [148]

Fibrilasyon yöntemi: Elektro çekim gibi solvent bazlı yöntemlerden temelde farklı bir süreç olan polimerlerin fiziksel olarak liflere bölünmesini içerir. Bu teknik öncelikle termoplastik polimerlere uygulanabilir ve polimer zincirlerini lifli yapılara ayırmak için mekanik kuvvetlerin uygulanması esasına dayanır. Fibrilasyon sürecinde polimer, mikrofibrillerin veya nanoliflerin oluşmasına yol açan yoğun mekanik gerilimlere maruz kalır. Süreç, moleküler zincirleri kuvvet yönünde hizalayan polimerin gerilmesi veya ekstrüzyonu ile başlar. Bu hizalama, malzemenin daha sonra ince liflere bölünmesini kolaylaştırdığı için çok önemlidir. Mekanik eylem - germe, dövme veya öğütme - polimer matrisi içinde stres noktaları yaratır. Bu gerilim noktaları, malzeme daha fazla işlendiğinde fibrillerin oluşmaya başladığı bölgeler haline gelir. Fibrilasyondan elde edilen nanolifler, elektro çekim gibi yöntemlerle üretilenlere kıyasla daha kısa uzunluğa ve daha düzensiz bir yapıya sahip olma eğilimindedir. Ancak bu düzensizlik belirli uygulamalarda avantajlı olabilir. Bu liflerin daha kısa ve daha kaotik yapısı, daha rastgele bir ağ oluşumuna yol açabilir; bu da artan yüzey düzensizliğinin partiküllerin yakalanmasını artırabileceği filtreleme gibi uygulamalarda faydalıdır [149; 150].

Fibrilasyonun en büyük avantajı solvent içermemesidir. Bu özellik, kimyasal çözücülere olan ihtiyacı ve buna bağlı atık ve kirlilik endişelerini ortadan kaldırdığı için onu daha çevre dostu bir seçenek haline getirmektedir [149].

İki bileşenli (bikomponent) yöntem: İki bileşenli yöntem olarak da adlandırılan biokomponent nanolif üretim tekniği, farklı yapıdaki polimerlerin aynı anda aktarılması ile fibril oluşturur [151].

Kullanılan polimerlerden en az biri nano boyutta olmalıdır ve farklı iki şırıngaya konularak elektro çekim gerçekleştirilir [152]. Farklı bileşenler ayrılarak ya da bileşenlerden biri çıkartılarak nanolifler üretilmiş olur [153].

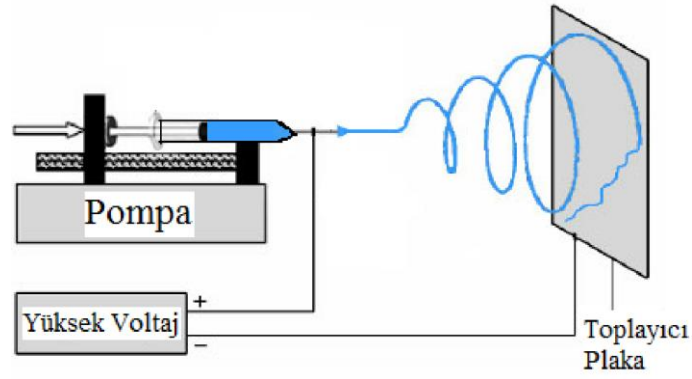
Eriyikten püskürtme (meltblown) yöntemi: Polimer eriyiğinin yüksek hızda hava uygulanarak elyafa dönüştürüldüğü benzersiz bir nanolif üretim tekniğidir. Elektro çekim gibi yöntemlerden farklı olan bu süreç, yapısal özellikleri nedeniyle öncelikle filtrasyon ve bariyer uygulamalarında kullanılan lifleri oluşturmak için termal ve aerodinamik kuvvetler kullanır [154 - 156].

Eriyik üfleme işleminde, polimer ilk olarak erimiş bir duruma gelene kadar ısıtılır. Bu erimiş polimer daha sonra birden fazla küçük deliğe sahip bir cihaz olan bir düze aracılığıyla ekstrüde edilir. Polimer düzeden çıkarken, malzemeyi incelten yüksek hızlı bir hava akımıyla karşılaşır. Hızlı hava akımı sadece lifleri çekmekle kalmaz, aynı zamanda onları soğutur ve dokunmamış bir yüzey oluşturmak için bir toplama yüzeyine serildiklerinde lifleri katılaştırır [154, 155]. Eriyikten püskürtme teknolojisinin en önemli avantajlarından biri, hızlı ve büyük miktarlarda elyaf üretme kabiliyetidir, bu da onu endüstriyel ölçekte üretim için ideal bir yöntem haline getirmiştir.

Elektro çekim (electrospinning) yöntemi: Bu yöntem, bir kaç nanometreden mikrometreye kadar değişen çaplarda ultra ince lifler oluşturmadaki çok yönlülüğü ve etkinliği ile tanınmaktadır. Bu süreç, yüksek voltajlı bir elektrik alanının uygulanması yoluyla bir polimer çözeltisini liflere dönüştürür ve çeşitli bilimsel ve endüstriyel alanlarda önemli ölçüde benimsenen bir tekniktir [157 - 160].

Elektro çekim işleminin esası, bir polimer eriyiğinden veya çözeltisinden sürekli lifler üretme kabiliyetinde yatmaktadır. Bir polimer çözeltisi yüksek bir elektrik alanına maruz kaldığında, yüklü hale gelir ve bir iğnenin veya düzenin ucundan fırlatılan bir jet oluşturur. Bu jet havada ilerlerken, çözücü buharlaşır ve geride topraklanmış bir yüzeyde toplanan yüklü bir polimer lifi bırakır. Bu süreç, yüksek yüzey alanı-hacim oranlarına sahip ultra ince liflerden oluşan dokunmamış bir yüzeyin oluşmasıyla sonuçlanır [158].

Elektro çekimin en önemli avantajlarından biri, üretilen liflerin özellikleri üzerinde sağladığı kontrol seviyesidir. Polimer konsantrasyonu, moleküler ağırlık, çözelti viskozitesi, yüzey gerilimi ve uygulanan voltaj gibi faktörlerin tümü, liflerin çapını, morfolojisini ve yapısını belirlemede önemli rol oynar. Araştırmacılar, bu parametreleri ayarlayarak ve değiştirerek liflerin özelliklerini belirli uygulamalar için uyarlayabilir ve elektro çekimi nanolif üretimi için oldukça uygun bir yöntem haline getirebilir [159]. Elektro çekim yönteminin şematik gösterimi Şekil 1.11'de görülmektedir.



Şekil 1.11. Elektro Çekim Yönteminin Şematik Gösterimi [161]

Literatürde bu yöntem ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu, toplayıcı bir levha, yağlı kağıt veya alüminyum folyo üzerinedir. Literatürden farklı olarak çalışmamızda, dokunmamış bir kumaş üzerine nano mertebesindeki liflerin toplanması ve fonksiyonel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.3. Piezoelektrik

Piezoelektrik, belirli malzemelerin uygulanan mekanik strese yanıt olarak bir elektrik yükü üretme yeteneğini ifade eder. Bu benzersiz ve işlevsel özellik evrensel olarak doğal değildir, ancak kristal kafeslerinde bir simetri merkezi bulunmayan belirli malzemelerde bulunur. Bu malzemelere stres uygulandığında, elektrik yükünün asimetrik dağılımına neden olarak bir elektrik potansiyeline yol açar [162]

Piezoelektriğin keşfi, Fransız fizikçiler Jacques ve Pierre Curie'nin bu alanın temelini atmasıyla 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanmaktadır [163]. Onların öncü çalışmaları turmalin, kuvars, topaz ve Rochelle tuzu gibi kristallerin bu eşsiz özelliği sergilediğini ortaya koymuştur [164]. Piezoelektriğin pratik uygulamaları ancak 20. yüzyılda, özellikle de I. Dünya Savaşı sırasında sonar teknolojisinin geliştirilmesiyle ivme kazanmıştır. Yıllar içinde piezoelektrik malzemelerin kapsamı bu doğal kristallerden çok çeşitli sentetik maddelere kadar büyük ölçüde genişlemiştir [165].

1.3.1. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler, mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştüğü veya tam tersinin gerçekleştiği, piezoelektrik etkiyi sergileyen benzersiz bir fonksiyonel malzeme sınıfını temsil eder. Enerji formlarını dönüştürme yeteneği, bu malzemeleri günlük

tüketici elektroniğinden gelişmiş havacılık sistemlerine kadar uzanan bir dizi uygulamada son derece değerli kılmaktadır [166 - 170].

Piezoelektrik malzemelerin arkasındaki temel ilke, mekanik stres uygulandığında elektriksel bir polarizasyon sergileme yetenekleridir. Tersine, bir elektrik alanı uygulandığında, bu malzemeler mekanik bir deformasyona uğrar ve bu da onları çeşitli sensör ve aktüatör uygulamalarında kullanışlı hale getirir [162].

Hem doğal hem de sentetik birçok piezo malzeme vardır. Kuvars gibi doğal piezoelektrik malzemeler, kararlılıkları ve yüksek kalite faktörleri nedeniyle kullanılmaktadır. Özellikle kuvars, bir elektrik alanı altında hassas ve tutarlı salınım davranışı nedeniyle zaman ölçme cihazlarında kullanımıyla ünlüdür. Bununla birlikte, doğal piezoelektrik malzemelerin kapsamı, doğal özellikleri ve belirli uygulamalar için bu özellikleri değiştirmenin karmaşıklığı ile sınırlıdır [171, 172].

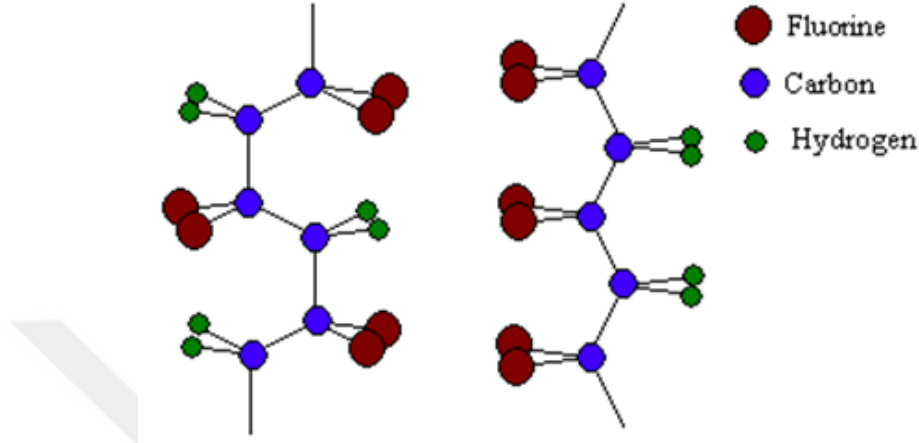
Öte yandan, belirli seramikler ve polimerler gibi sentetik piezoelektrik malzemeler, mühendislik açısından daha fazla kullanım esnekliği sunar. Kurşun Zirkonat Titanat (PZT), yüksek piezoelektrik katsayıları ve çok yönlülüğü ile bilinen, en yaygın kullanılan piezoelektrik seramiklerden biridir. PZT, bileşimi ve yapısı değiştirilerek belirli uygulamalara göre uyarlanabilir, bu da onu ultrasonik dönüştürücülerden piezoelektrik motorlara kadar geniş bir uygulama yelpazesi için uygun hale getirir [169].

Çalışmamızda kullanılan Poliviniliden Florür (PVDF), çok yönlü bir piezoelektrik polimeridir ve çeşitli uygulamalar için ideal bir aday olmasını sağlayan benzersiz özellik kombinasyonuyla çok önemli bir yere sahiptir. Tekrar eden $-CH_2-CF_2-$ birimlerinden oluşan yarı kristal bir polimer olan PVDF diğer birçok polimer tarafından rakipsiz bir kimyasal, termal, mekanik ve elektriksel özellikler dengesi sergiler [173]. Bu polimer, filmler, lifler ve kompozitler dahil olmak üzere farklı formlarda işlenebilir ve bu da onu çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir hale getirir [174].

PVDF'nin piezoelektrik özellikleri öncelikle moleküler yapısına bağlanmaktadır. PVDF'deki polimer zincirleri, kalıcı dipoller oluşturan alternatif karbon ve flor atomlarından oluşur. Bu dipoller, piezoelektrik özelliklerin ortaya çıkması için gerekli olan poling işlemi sırasında malzeme bir elektrik alanına maruz kaldığında hizalanır. PVDF'nin kristallik derecesi ve fazı da çok önemli bir rol oynamaktadır. PVDF çeşitli

polimorfik formlarda bulunabilir; β fazı, yüksek dipol momenti ve sentrosimetrik olmayan yapısı nedeniyle piezoelektrik uygulamalar için en önemli olanıdır [175, 176].

Aşağıda yer alan Şekil 1.12’de PVDF’in kimyasal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Poliviniliden Florür Alfa Faz Yapısı (solda), β faz Yapısı (sağda)[177]

PVDF'nin esnekliği öne çıkan bir diğer özelliğidir. Sert piezoelektrik malzemesi, seramiklerin aksine, PVDF piezoelektrik özelliklerini kaybetmeden kolayca bükülebilir, katlanabilir ve çeşitli şekillere sokulabilir. Bu esneklik, geleneksel piezoelektrik malzemelerin mümkün olmadığı giyilebilir elektronik, esnek sensörler ve aktüatörlerdeki uygulamalara kapı açmaktadır [166].

Dayanıklılık, PVDF'nin bir diğer önemli özelliği ve avantajıdır. Kimyasallara, aşınmaya ve çevresel bozulmaya karşı mükemmel direnç göstererek zorlu ortamlarda uzun süreli uygulamalar için uygun hale getirir. PVDF'nin mekanik kararlılığı ve gücü, piezoelektrik özellikleriyle birleştiğinde, onu güvenilirlik ve dayanıklılığın çok önemli olduğu endüstriyel, otomotiv ve havacılık sektörlerindeki sensörler ve aktüatörler için etkili bir malzeme haline getirir [168].

Çevresel açıdan bakıldığında PVDF, geleneksel piezoelektrik malzemelere, özellikle de Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) gibi kurşun içerenlere göre daha çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Kurşun bazlı malzemelerin kullanımıyla ilgili çevresel kaygılar, araştırmaları kurşunsuz alternatiflere yönlendirmiştir, toksik olmayan, geri dönüştürülebilir bir polimer olan PVDF, bu sürdürülebilir hedeflerle iyi bir uyum içindedir. İşleme ve geri dönüştürülebilirlik için daha düşük enerji gereksinimi, daha az

çevresel ayak izine katkıda bulunarak onu yeşil enerji uygulamaları için tercih edilebilir bir seçim haline getirmektedir [168,169].

PVDF'nin dielektrik sabiti, piezoelektrik katsayıları ve piroelektrik etkisi gibi elektriksel özellikleri, moleküler ağırlık, kristal faz ve işleme koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu parametrelerin optimizasyonu, PVDF'nin belirli uygulamalardaki performansını artırabilir. Örneğin, kristallliği artırmak ve daha yüksek bir β -faz içeriği elde etmek, yüksek hassasiyetli sensörlerde arzu edilen piezoelektrik tepkisini artırabilir [170, 176].

PVDF'nin uygulama spektrumu çok geniştir ve genişlemeye de devam etmektedir. Enerji hasadında PVDF, titreşimler ve hareketler gibi mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır. Bu özellik, vücut hareketlerinden veya ortam titreşimlerinden enerji elde edebildiği, kendi kendine güç sağlayan cihazlar ve giyilebilir teknolojiler için önemlidir. PVDF'nin biyouyumluluğu ve esnekliği, onu tıp alanında implante edilebilir cihazlar ve basınç sensörleri ve ultrason dönüştürücüler gibi teşhis araçları için uygun hale getirir [167].

Nanoteknolojideki gelişmeler, PVDF'nin piezoelektrik özelliklerini grafen, karbon nanotüpler ve metal oksitler gibi nanoparçacıkların gelişmiş mekanik, termal ve elektriksel özellikleriyle birleştiren PVDF nanokompozitlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu nanokompozitler gelişmiş performans özellikleri sergileyerek onları daha zorlu uygulamalar için uygun hale getirmektedir [178].

Özetle, PVDF'nin kimyasal yapısı ve özelliklerinin benzersiz kombinasyonu, esnekliği, dayanıklılığı ve çevre dostu olmasıyla birleştiğinde, onu piezoelektrik malzemeler arasında önde gelen bir seçenek olarak konumlandırmaktadır.

Poliviniliden Florürün (PVDF) üretimi ve işlenmesi, piezoelektrik özelliklerinin geliştirilmesinde ve çeşitli uygulamalar için uygunluğunun belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Yarı kristal bir polimer olan PVDF, her biri farklı özelliklere ve uygulamalara sahip filmler, lifler ve kompozitler dahil olmak üzere birden fazla biçimde üretilir. PVDF'nin çok yönlülüğü sadece malzeme özelliklerinden değil, aynı zamanda geçirdiği çeşitli işleme yöntemlerinden de kaynaklanmaktadır [170].

PVDF ayrıca sensörlerde, aktüatörlerde ve enerji toplama cihazlarında yaygın olarak kullanılan filmler halinde de üretilir [179]. Filmlere ve liflere ek olarak PVDF,

gelişmiş özelliklere sahip yeni hibritler oluşturmak için polimeri diğer malzemelerle entegre ederek kompozit olarak da üretilebilir. Bu kompozitler, PVDF'nin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilen iletken dolgu maddeleri, seramikler veya diğer polimerleri içermektedir. Örneğin, grafen veya karbon nanotüpler gibi nanoparçacıkların eklenmesi PVDF'nin elektrik iletkenliğini ve mekanik mukavemetini artırarak daha sağlam hale getirir [180].

PVDF'nin çeşitli form ve yapılar da işlenebiliyor olması, ona geniş bir uygulama alanı açmaktadır. Tıp alanında, PVDF implante edilebilir sensörler ve ultrason dönüştürücülerin üretiminde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde, titreşim algılama ve sönümlemede hizmet vermektedir. Yenilenebilir enerjide, PVDF filmler ve lifler ortamdaki mekanik titreşimlerden enerji hasadında kullanılır. PVDF'nin çok yönlülüğü çevresel algılama, giyilebilir teknoloji ve havacılık uygulamalarına da uzanmaktadır [176, 181 - 184]. PVDF, benzersiz özellikleri nedeniyle piezoelektrik cihazlar alanında büyük ilgi görmüştür. Piezoelektrik cihazlardaki uygulaması sensörler, aktüatörler ve enerji hasat sistemleri dahil olmak üzere çeşitli sektörleri kapsamaktadır. Bu uygulamaların her biri, PVDF'nin doğal özelliklerinden, özellikle de malzemenin uygulanan mekanik gerilime yanıt olarak elektrik yükü üretme yeteneği olan piezoelektrik etkisinden yararlanmaktadır.

1.3.2. Piezoelektrik Sensörlerin Tekstilde Kullanımı

Piezoelektrik sensörlerin tekstil ürünlerine entegrasyonu, akıllı malzemeler ve giyilebilir teknoloji alanında önemli bir ilerlemeyi göstermektedir. Bu sensörler kumaşa gömüldüğünde, vücut hareketleri veya dış basınç gibi mekanik enerjinin elektrik sinyallerine dönüştürülmesini sağlar. Bu dönüştürme, sağlık izlemeden etkileşimli giysilere kadar çeşitli uygulamalarda çok önemlidir. Piezoelektrik tekstiller, piezoelektrik malzemelerin benzersiz özelliklerinin çeşitli tekstil yapılarına uyumlu bir şekilde entegre edildiği malzeme bilimi ve tekstil mühendisliğinin bir kesişimini temsil etmektedir [185 - 193].

Piezoelektrik tekstillerin gelişimi, yapılarına göre, dokuma, dokunmamış (nonwoven) ve örme olmak üzere çeşitli kategorilerde sınıflandırılabilir. Her tür, farklı uygulama ihtiyaçlarına cevap veren farklı özelliklere ve üretim süreçlerine sahiptir. Piezoelektrik malzemelerin dokuma yapılar a dahil edilmesi, dokumanın bütünlüğünü ve estetik

özelliklerini korurken mekanik enerjiden yararlanabilen kumaşlar oluşturma fırsatı sunar [194]. PVDF gibi piezoelektrik liflerin dokuma kumaşlara entegrasyonu, bu liflerin geleneksel ipliklerle harmanlandığı veya kumaş yapısında bağımsız elemanlar olarak kullanıldığı özel dokuma teknikleri ile elde edilir. Piezoelektrik esaslı dokuma yapıların geliştirilmesindeki en önemli zorluk, piezoelektrik liflerin hizalanmasını ve bütünlüğünü etkileyebilecek gerilim ve basınç içeren dokuma işlemi sırasında piezoelektrik özelliklerin tehlikeye atılmamasını sağlamaktır [187].

Dokunmamış kumaşlar (nonwoven) tülbent haline getirilmiş liflerin mekanik, ısı veya kimyasal olarak birbirine bağlanmasıyla oluşturulur. Dokunmamış yapılar, doğal esnekliği ve karmaşık şekillere uyma kabiliyeti nedeniyle piezoelektrik uygulamalar için özellikle avantajlıdır. PVDF gibi piezoelektrik malzemelerin dokunmamış kumaşlara entegrasyonu tipik olarak, gelişmiş piezoelektrik özelliklere sahip ultra ince lifler üretebilen elektro çekim gibi işlemleri içerir. Elektro çekim ile dokunmamış kumaş üzerinde PVDF nanolif oluşturulması, enerji hasadı ve sensör uygulamalarında hassasiyetlerini ve verimliliklerini önemli ölçüde artıran yüksek bir yüzey alanı ve hacim oranı sergiler [195].

Esneklikleri ve rahatlıklarıyla tanınan örme kumaşlar, piezoelektrik entegrasyon için uygun olabilmektedir. Örme kumaşların ilmekli yapısı, tekstilin gerilebilirliğini ve dökümünü korurken piezoelektrik malzemelerin yerleştirilmesi için ideal bir ortam sağlar. PVDF liflerinin örme yapılara dahil edilmesi, piezoelektrik ipliklerin kumaş matrisine yerleştirilmesine izin veren örme teknikleri ile gerçekleştirilebilir. Bu entegrasyon, örme işleminin liflerin piezoelektrik özelliklerini olumsuz etkilememesini sağlamak için dikkatlice tasarlanmalıdır [189].

PVDF gibi piezoelektrik malzemelerin bu çeşitli tekstil yapılarına başarılı bir şekilde dahil edilmesi, hem malzeme özelliklerinin hem de tekstil üretim süreçlerinin derinlemesine anlaşılmasına bağlıdır. Yapı seçimi (dokuma, dokunmamış (nonwoven) veya örme) büyük ölçüde piezoelektrik tekstilin, materyalin kullanım alanına bağlıdır. Örneğin, dokuma piezoelektrik tekstiller, sertlik ve form stabilitesinin gerekli olduğu yapısal uygulamalar için daha uygun olabilirken, dokunmamış kumaşlar ve örme yapılar, esneklikleri ve vücut hatlarına uyulanabilirlikleri nedeniyle giyilebilir elektronikler ve tıbbi tekstil için daha uygundur.

Piezoelektrik tekstillerin geliştirilmesi, piezoelektrik malzemelerin dikkatli bir şekilde seçilmesini ve çeşitli tekstil yapılarına entegre edilmesini içeren multidisipliner bir çabadır. Dokuma, dokunmamış (nonwoven) veya örme tekstil türünün seçimi, bu akıllı tekstillerin işlevselliğini ve uygulama aralığını belirlemede çok önemli bir rol oynamaktadır. Piezoelektrik tekstillerin üretimi, piezoelektrik malzemeleri tekstil alt tabakalarına yerleştirmek veya eklemek için çeşitli teknikleri kapsayan incelikli bir süreçtir. Bu metodolojiler, piezoelektrik malzemelerin işlevsel özelliklerini tekstillerin esnekliği, konforu ve giyilebilirliği ile sorunsuz bir şekilde entegre etmeyi ve böylece enerji hasadı, algılama ve harekete geçirme yeteneğine sahip akıllı kumaşlar üretmeyi amaçlamaktadır. Entegrasyon teknikleri genel olarak kaplama, laminasyon ve tekstil üretim süreci sırasında piezoelektrik liflerin yapıya yerleştirilmesini ve her birinin kendine özgü avantajları ve uygulama alanları vardır [189 - 193].

Kaplama, bir tekstil tabakası üzerine ince bir piezoelektrik malzeme tabakası uygulamak için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, basitliği ve geniş tekstil alanlarını eşit şekilde kaplayabilmesi açısından avantajlıdır. Kaplama tekniklerindeki temel zorluk, kaplama kalınlığı, homojenliği ve elde edilen piezoelektrik tekstilin esnekliği arasında bir denge sağlamaktır [196, 197].

Her üretim tekniği farklı avantajlar ve zorluklar ortaya çıkarır. Üretim tekniğinin seçimi büyük ölçüde piezoelektrik tekstilin kullanım alanı rol oynar. Örneğin, esneklik ve konforun çok önemli olduğu giyilebilir elektroniklerde, piezoelektrik liflerin gömülmesi veya ince kaplama yöntemleri tercih edilebilir [189]. Buna karşılık, dayanıklılık ve sağlam piezoelektrik tepkinin gerekli olduğu uygulamalarda daha kalın piezoelektrik filmlerin laminasyonu daha uygun olabilir [198].

Piezoelektrik tekstillerin en önemli uygulamalarından birisi de basınç algılamadır. Bu tekstiller basınçtaki değişiklikleri algılayabilir, bu da onları tıbbi izlemeden etkileşimli arayüzlere kadar bir dizi uygulama için uygun hale getirir. Örneğin, akıllı bir giysiye entegre edilmiş bir piezoelektrik kumaş, kullanıcının hareketlerini veya nefes alma düzenini izleyebilir. Bu sensörlerin hassasiyeti çok önemlidir ve piezoelektrik malzemenin özelliklerine ve tekstilin yapısına bağlıdır. Dokuma yapılar, liflerin hizalanması nedeniyle dokunmamış kumaşlara kıyasla daha yüksek hassasiyet sunabilir, bu da stres transferinin verimliliğini ve ardından elektrik sinyali üretimini etkiler [199].

Piezoelektrik tekstiller, özellikle endüstriyel izleme ve yapısal sağlık izleme sistemleriyle ilgili titreşimleri tespit etme konusunda önemli bir yere sahiptir. Esnek, uyarlanabilir bir kumaş aracılığıyla titreşimleri tespit etme ve ölçme yeteneği, yapıların veya makinelerin bütünlüğünü izlemede önemli bir avantaj sunar. Kumaş çeşitli yüzeylere uygulanabilir, farklı şekillere uyum sağlayabilir ve gerçek zamanlı, sürekli izleme yetenekleri sağlayabilir. Algılama hassasiyeti ve tepki süresi, bu uygulamalar için tekstilin dokuma veya örgü sıklığı, elyaf yönlenmesi ve piezoelektrik malzemenin özelliklerinden etkilenen çok önemli faktörlerdir [187].

Piezoelektrik tekstillerin enerji hasadı işlevi dikkat çekici bir başka konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu özellik, özellikle giyilebilir teknolojide kendi kendine güç üreten cihazlar için önemlidir. Enerji hasadının verimliliği, piezoelektrik malzemenin enerji dönüşüm verimliliğine ve dönüşüm için mevcut mekanik enerjiye bağlıdır. Örneğin, bir ayakkabıya yerleştirilen piezoelektrik özellik tekstil materyalinin, yürüme basıncından enerji toplayarak potansiyel olarak küçük elektronik cihazlara güç sağlayabilir. Tekstil materyalinin dayanıklılığı ve yorulma direnci bu tür uygulamalarda hayati önem taşır ve zaman içinde tutarlı performans sağlar [192, 195].

Sağlık izleme alanında, piezoelektrik giyilebilir teknoloji muazzam bir potansiyel göstermiştir. Örneğin, piezoelektrik sensörlerle donatılmış akıllı tekstiller kalp atış hızı, solunum hızı ve kas aktivitesi gibi hayati belirtileri sürekli olarak izleyebilir. Giysi kumaşına dokunan bu sensörler göze batmaz ve rahattır, kullanıcının günlük faaliyetlerini etkilemeden uzun süreli izlemeye olanak tanır. Toplanan veriler kablosuz olarak sağlık hizmeti sağlayıcılarına iletilir, böylece gerçek zamanlı izleme ve potansiyel sağlık sorunlarının erken tespiti mümkün olur. Dikkate değer bir vaka çalışması, kardiyak izleme için geliştirilen akıllı bir gömlektir. Gömlek kumaşındaki gömülü piezoelektrik sensörler göğüs ve kalbin mekanik hareketlerini algılayarak bunları kalp ritimlerinin göstergesi olan elektrik sinyallerine dönüştürmektedir. Bu uygulama özellikle kronik kalp rahatsızlıkları olan hastalar için faydalıdır ve kalp sağlığını sürekli olarak izlemek için invazif olmayan ve kullanışlı bir yol sunar [167, 200].

Piezoelektrik tekstiller, spor ve fitness giyilebilir cihazlarında önemli bir kullanım alanı bulmuştur ve atletik performans ve hareket hakkında içgörü sağlamaktadır. Bu giyilebilir

cihazlar, sporcuların biyomekaniğini izleyip analiz ederek tekniklerini optimize etmeye ve sakatlanmaları önlemeye yardımcı olabilir. Örneğin, koşu kıyafetlerine entegre edilen piezoelektrik tekstil sensörleri adım, yürüyüş ve darbe kuvvetlerini izleyerek koşu verimliliğini artırmak ve sakatlanma riskini azaltmak için önemli geri bildirimler sunabilir. Bir başka uygulama da çeşitli spor dallarına yönelik antrenman giysileridir; giysilere yerleştirilen sensörler kas hareketlerini ve efor seviyelerini izleyerek sporculara ve antrenörlere antrenman rejimlerini geliştirmeleri için veri sağlar [201].

Sonuç olarak, piezoelektrik tekstiller, benzersiz elektriksel ve mekanik özellikleriyle çeşitli uygulamalar için çok yönlü bir uygulama olanağı ve kullanım alanı sunmaktadır. Tekstil materyallerinin doğal esnekliği ve dayanıklılığı ile birlikte basınç algılama, titreşimleri tespit etme ve enerji toplama yetenekleri, onları akıllı malzeme teknolojilerinin ön saflarında yer almasını sağlamaktadır.

1.3.3. GO Katkılı PVDF Nanoliflerin Piezoelektrik Özellikleri İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar

Jang ve ark., [202] GO katkılı PVDF nanolif membranlar elektro çekim yöntemiyle hazırlanmış ve bu hibrit membranlar su arıtma uygulamaları için karakterize edilmiştir. Temas açısı testlerine göre bu PVDF/GO nanolif kompozit membranlar oldukça hidrofilik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmaya göre, GO'nun PVDF'ye dahil edilmesi ile membran sisteminin kirlenme önleyici özelliğini geliştirdiği ve bu sayede su arıtma membranı olarak kullanılabilceği ön görülmüştür.

Şimşek, [203] tez çalışmasında piezoelektrik özellikli yüzey elde etmek amacıyla PVDF nano liflerinden meydana gelen bir yapı oluşturmak için elektro çekim yöntemini kullanmıştır. Elde ettiği bu yüzeylerden, elektrik sinyal çıktılarının alınabilmesini hedeflenmiştir. Bu sebeple, karbon bazlı iletken malzemeleri, serigrafi baskı yöntemiyle yüzeye aplike etmiştir. Tez çalışma sonucuna göre PVDF kullanılarak elde edilen ürün, germe ve elektriksel alana maruziyet gibi üretim süreçlerine ihtiyaç duymadan piezoelektrik özellik göstermiştir.

Issa ve ark. [204] elektro çekim yöntemiyle PVDF / GO kompozit elyaf materyallerinin üretiminde ağırlıkça %0.7 GO ilave etmişlerdir. %0,1GO ilavesinin β fazında önemli bir

artışa neden olduğu ve PVDF içeren bu malzemenin basınç sensörlerinde, dönüştürücülerde ve yapay kaslarda kullanılabileceği raporlanmıştır.

Abolhasani ve ark. [205] grafen katkılı PVDF kompozit nanolifli yapılar hazırlamış ve bunların morfolojisi, kristallliği, polimorfizmi ve elektriksel çıktıları incelenmiştir. Nanolifler, farklı grafen içerikleri ile elektro çekim tekniği kullanılarak üretilmiştir. Grafen katkılı PVDF kristallerinin polimorfizmini değerlendirmek için DSC, FTIR ve WAXD analizleri kullanıldı. Az miktarda grafen (ağırlıkça %0.1) ilavesinin nanoliflerin β fazı oluşumunu ve açık devre voltajını önemli ölçüde artırdığını gözlemişlerdir. Bununla birlikte, grafen içeriğindeki artış, rastgele yönlendirilmiş nanoliflerin elektrik çıkış voltajını azaltmıştır. Üretilen PVDF/grafen nanojeneratörün, parmak hareketini tam olarak senkronize etme yeteneğine sahip olduğu ve üretilen elektriğin, 30 saniye boyunca ticari bir LED'i yakabildiğini tespit edilmiştir.

Abbasipour ve ark. [206] tarafından yürütülen çalışmada, farklı nano dolgu maddeleri içeren elektro çekim PVDF nanoliflerin piezoelektrik tepkisi incelenmiştir. Araştırmacılar, nanolif morfolojisinin elde edilen nanokompozitlerin piezoelektrik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için grafen oksit, grafen nanotabaka ve halloysite nanotüpleri kullanmışlardır. PVDF matrisine nano dolgu maddelerinin eklenmesinin, nanokompozitlerin β -faz içeriğinde ve dielektrik sabitinde önemli bir artışa yol açtığı gözlemlenmiştir.

Gebrekrstos ve ark. [207] tarafından yürütülen çalışmada, grafen oksit (GO) ve onun işlevselleştirilmiş formları olan GOCOOH ve GOF'un (floro katkılı grafen türevleri) poli(viniliden florür) (PVDF)'nin piezoelektrik tepkisi ve kristal yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, PVDF'nin piezoelektrik özelliklerini belirlemede çok önemli bir faktör olan β fazının yaklaşık %38'ini sergilediğini ortaya koymaktadır. Elektro çekim işleminin GO, GOCOOH ve GOF ile birleştirildiğinde PVDF'deki β fazı içeriğini önemli ölçüde artırdığının ortaya çıkarmıştır. Grafen türevlerinin dahil edilmesinin β fazı içeriğinde etkileyici artışlarla sonuçlandığını göstermiştir: PVDF/GO %69, PVDF/GOCOOH %79 ve PVDF/GOF %89 şeklinde bir oranda artmıştır.

Shi ve ark. [208] Piezoelektrik nanojeneratörler için baryum titanat içeren elektro çekim nanokompozit elyaf materyaller üretilmiştir. Nanokompozit elyaf materyalin ağırlıkça %0.15 grafen nano tabakalardan ve ağırlıkça %15 (BT)'den oluşmuş olduğu durumda,

piezoelektrik nanojeneratörün açık devre voltajı ve elektrik gücü 11V'a kadar çıkabilir ve 2Hz yükleme frekansı ve 4mm gerilim altında 4.1 μ W olmaktadır. Taşınabilir elektronik ve giyilebilir cihazlar için etkili güç kaynağı olarak tanımlanmaktadır.

Roy ve ark. [209] çalışmalarında, giyilebilir ürünler oluşturmak için grafen oksit nanolifleri basınç sensörü ve piroelektrik solunum sensörü amacıyla üretmişlerdir. Elektro çekim ile üretilen bu PVDF/GO tabanlı nanojeneratörün maksimum piroelektrik çıkış gücü yoğunluğu $\sim 1.2\text{nW/m}^2$ olarak raporlanmıştır. Aynı zamanda cihaz, bir sıkıştırılmaya maruz kaldığında maksimum çıkış gücü yoğunluğu $\sim 6.2\text{mW/m}^2$ olarak bildirilmektedir

Chamankar ve ark. [210] tarafından yapılan çalışmada, enerji hasadı uygulamaları için esnek piezoelektrik basınç sensörleri oluşturmaya yönelik yenilikçi bir yaklaşım araştırılmıştır. Araştırmacılar, elektro çekim tekniği ile PZT (Kurşun Zirkonat Titanat) partiküllerinin değişen hacim fraksiyonlarına sahip PVDF-PZT nanokompozit lifler geliştirmeyi hedeflemiştir. Burdan yola çıkarak, PVDF-PZT nanokompozit liflerinin kristallliğini ve elektroaktif β fazını arttırmayı amaçlamışlardır. PZT ilavesi, nanokompozitlerin yapısal özelliklerini etkilemekle kalmayıp aynı zamanda piezoelektrik özelliklerini de geliştirdiğini göstermektedir. Performanstaki bu artış, polimer matrisi içinde PZT partiküllerinin varlığının neden olduğu PVDF polimer zincirlerinin yönlenmesine bağlanmaktadır.

Tiwari ve ark. [211] tarafından yürütülen çalışmada, esnek ve hafif nanohibrit malzemelerin geliştirilmesi yoluyla enerji hasadına yenilikçi bir yaklaşım araştırılmıştır. Bu nanohibrit, optimize edilmiş bir elektro çekim işlemi ile hazırlanan poli(viniliden florür) (PVDF) ve fonksiyonelleştirilmiş grafen oksitten oluşmaktadır. Nano dolgu maddelerinin eklenmesi, nanopartiküller ile polimer matrisi arasındaki etkileşimin artması sonucunda azalan elyaf çapı üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olmuştur. Bu çalışmanın sonuçlarından biri, nanopartiküllerin eklenmesiyle yaklaşık %88'lik bir elektroaktif faz elde edilmesidir. Bu yüksek elektroaktif faz içeriği, enerji hasadı uygulamalarına uygun verimli piezoelektrik malzemeler geliştirmek için çok önemlidir. Bu nanohibrit malzemelerin pratik uygulaması, elektro-mekanik tepkileri yakalamak için tasarlanmış nanojeneratör cihazlarının imalatı yoluyla gösterilmiştir. PVDF ve fonksiyonelleştirilmiş grafen oksit nanohibritinin etkili olduğu gösterilmekte ve

parmakla dokunma yoluyla 62V (tepeden tepeye) elektromekanik tepki ve $48.3\mu W\text{ cm}^2$ güç üretimi sağlanmıştır. Bu araştırmanın öne çıkan özelliklerinden biri yürüme, ayak vurma ve eğilme gibi çeşitli insan vücudu hareketlerinden enerji elde etme potansiyeli olmuştur. Bu cihazlar, günlük aktivitelerden önemli miktarda güç üretme kapasitesine sahiptir ve bu da onları düşük enerjili elektronik cihazlara ve sensörlere güç sağlamak için umut verici bir çözüm haline getirmektedir. Çalışma ayrıca, çekmeceleri açıp kapamak ve kapı paspasları üzerinde yürümek gibi gerçek hayattaki mekanik kaynakları kullanarak LED'lere güç sağlama yeteneklerini göstererek bu cihazların çok yönlülüğünü vurgulamaktadır. Bu pratik uygulama, bu nanohibrit malzemelerin çeşitli bağlamlarda sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunma potansiyelinin altını çizmektedir. Böylece PVDF ve işlevselleştirilmiş grafen oksit bazlı esnek ve verimli nanohibrit malzemeler geliştirilmiştir.

Ünsal ve ark. [212] tarafından yapılan çalışmada, indirgenmiş grafen oksit (RGO) ve polianilin (PANI) içeren poli(viniliden florür) (PVDF) nanolif bazlı piezoelektrik nanogeneratörler geliştirilmiştir. Çalışmada özellikle nanolif yüzeylerin yüzey alanı ile çıkış voltajı arasındaki ilişki vurgulanmıştır. En yüksek teorik yüzey alanı 10.520 cm^2 elde edilmiş ve bu da gram başına $48.151\text{ cm}^2\text{ g}^{-1}$ yüzey alanı ile sonuçlanmıştır. Çalışma, kaplama ve doping işlemlerinin piezoelektrik performans üzerindeki etkisini vurgulamaktadır; burada daha ince kaplamalar, dirençte bir miktar enerji kaybına rağmen daha yüksek performans göstermiştir. PANI ve RGO arasındaki etkileşimin de belirli örneklerde gelişmiş voltaj üretimine yol açtığı kaydedilmiştir. Katkılı nanoliflerin sensör olarak hassasiyeti de vurgulanmıştır.

Yang ve ark. [213] grafen katkılı poli(viniliden florür) (PVDF) nanoliflere dayalı, kendi kendine çalışan bir Piezoelektrik Enerji Toplayıcı Sistemi (PES) üzerine yürüttükleri çalışmalarında, grafen katkılı PVDF piezoelektrik katman, Ti_3C_2 MXene, Ag NWs elektrot katmanları ve koruyucu PDMS katmanından oluşan yenilikçi bir tasarım ortaya koymayı amaçlamıştır. Bu teknoloji, özellikle işitme engelli bireyler için işaret dili çevirisi ve hareket takibinde pratik uygulamalara sahiptir. Çalışma, daha yüksek grafen konsantrasyonlarının PVDF β -faz fraksiyonunu artırarak piezoelektrik özelliklerini ve gerilme mukavemetini geliştirdiğini göstererek malzeme karakterizasyonunu incelemektedir. PES, işaret dili hareketlerini etkili bir şekilde tanır ve el hareketinin doğru bir şekilde haritalanmasını sağlamaktadır. Yanık önleme için sıcaklığa duyarlı

yetenekler de sunan bu araştırma, PES'in insan-makine etkileşimi, tıbbi rehabilitasyon ve sanal gerçeklik potansiyelini vurgulamaktadır.

Zeyrek Ongun ve ark. [214] GO ve indirgenmiş RGO nanoparçacıklarının dahil edilmesi yoluyla elektro çekim β -PVDF nanojeneratörlerin piezoelektrik enerji hasat kapasitesini artırmaya odaklanan bir çalışma yürütmüştür. Araştırma, sentezlenen GO ve RGO nanopartiküllerinin PVDF matrisi içindeki uyumluluğunu ve etkili dağılımını göstermektedir. Elektro çekim tekniği sayesinde, GO/PVDF ve RGO/PVDF nanosheets ağırlıkça %0.4 ve %0.8 konsantrasyonlarda başarıyla elde edilmiştir. Bu son derece esnek ve gerilebilir elektrikle eğrilmiş materyaller daha sonra iletken alüminyum plakalarla bir sandviç yapı oluşturarak nanojeneratörleri imal etmek için kullanılmıştır. Çalışmanın bulguları, bozulmamış β -PVDF ile karşılaştırıldığında elektrik çıkışında kayda değer bir iyileşme olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, ağırlıkça %0.8 RGO'nun eklenmesi, yaklaşık 5Hz frekansta parmakla dokunma eylemi sırasında 4.38V'a ulaşan ortalama bir pozitif voltaj tepe noktası ile elektrik çıkış voltajında en yüksek artışa yol açmıştır. Bu artış öncelikle β -PVDF ve RGO nanopartikülleri arasındaki güçlü ara yüzey etkileşimlerine bağlanmaktadır. Ayrıca, nanojeneratörlerin dielektrik özellikleri, özellikle 0.8-RGO/NG kompoziti durumunda, GO ve RGO'nun dahil edilmesinin ardından önemli gelişmeler yaşamıştır. Bu kompozit, dielektrik sabitinde kayda değer bir artış göstererek 103Hz'de PVDF-NG'den yaklaşık dört kat daha yüksek olan 35.16'ya ulaşmıştır. 0.8-RGO/NG nanojeneratörlerin geliştirilmiş piezoelektrik performansı, onları enerji hasat cihazları, basınç sensörleri, taşınabilir elektronikler ve giyilebilir teknoloji dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygun hale getirdiği vurgulanmaktadır.

Yang ve ark. [215] çalışmalarında nanolif esaslı materyaller hazırlamak için, grafen oksit (GO), poliviniliden florüre (PVDF) elektro çekim yöntemiyle eklenmiştir. PVDF'nin β fazının içeriği, GO oranı ağırlıkça %2'ye yükseltildiğinde artırılabilirdiği ve indirgeme yoluyla RGO daha yüksek bir β fazı içeriği ürettiği, kısa devre akımının ve açık devre voltajının 700nA ve 16V'a ulaştığı raporlanmıştır.

Jin ve ark. [216] çalışmalarında PVDF nanolif ağının yüksek β -faz kristalinitesini üretmek için elektro çekim çalışma şartları (Grafen içeriği = ağırlıkça %1, toplayıcı mesafesi = 4cm ve dönme hızının = 2000dev/dak-1) olarak ayarlandığında kristallik

oranının %41.7'ye ulaşabildiğini tespit etmişlerdir. Yüksek performanslı PVDF nanoliften üretilen tülbent esaslı yüzeylerin sensör veya jeneratörlerde kullanılabileceği ön görülmektedir.

Hasanzadeh ve ark. [217] çalışmalarında, yerinde sentezlenmiş grafen-ZnO nanokompozitler kullanılarak elektro çekim yöntemi ile PVDF bazlı nanolifler içindeki piezoelektrik performansı artırma üzerinedir. Amaç, enerji hasat sistemleri ve giyilebilir piezoelektrik nanojeneratörlerdeki potansiyeli güçlendirmektir. PVDF bazlı nanoliflerin piezoelektrik özelliği, çıkış voltajı ölçümleri ile desteklenmekte ve G-ZnO katkılı PVDF nanoliflerin bozulmamış ve ZnO katkılı muadillerine kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, enerji hasadı ve giyilebilir elektronikteki pratik uygulamalar için esnek PVDF tabanlı nanolifli yapılar geliştirmeye yöneliktir.

Li ve ark. [218] çalışmalarında, giyilebilir sensörlerin ve nanojeneratörlerin hassasiyetini artırmayı amaçlayarak, elektro çekim yöntemi ile üretilen Poliviniliden Florür (PVDF) nanolifler içindeki piezoelektrik ve triboelektrik etkileri geliştirme amacı taşımaktadır. İlk olarak, nanopartikülleri PVDF'deki beta-faz içeriğini artırarak piezoelektrik katsayısının yükselmesine neden olur ve böylece piezoelektrik etkiyi artırır. İkinci olarak, PVDF'nin yüzey potansiyelini değiştirerek negatif yönde -740mV gibi yüksek bir değere kaydırır ve sonuç olarak triboelektrik etkiyi değiştirirler. Bu geliştirmelerin pratik uygulaması, ZnO@C/PVDF nanojeneratörlerin imalatı yoluyla gösterilmiştir. Bu nanojeneratörler, saf PVDF'ye kıyasla voltaj çıkışında dört katlık kayda değer bir artış sergileyerek onları hassas giyilebilir sensörler haline getirmektedir.

Ramasamy ve ark. [219] elektro çekim yöntemi ile üretilen Poli(viniliden florür) nanoliflerin (PVDFNF'ler) mekanik ve piezoelektrik özelliklerini geliştirmeye yönelik araştırmalarıyla enerji hasadı ve giyilebilir elektronik alanına katkıda bulunmayı amaçlamışlardır.. Araştırmacılar çalışmalarında, PVDFNF'lere nano dolgu maddesi olarak fenil-izosiyanat fonksiyonelleştirilmiş grafen oksit (IGO) eklemiştir. Yapılan bu ekleme, PVDFNF'lerde elektroaktif β -fazı da dahil olmak üzere daha pürüzlü bir yüzey morfolojisine ve gelişmiş kristalliğe yol açmıştır. En önemlisi, mekanik özellikler, bozulmamış olanlara kıyasla IGO katkılı PVDFNF'ler için nihai gerilme mukavemetinde %303 ve modülde %332'lik bir artışa sebep olmuştur. Kompozitlerin güç üretme kabiliyetleri %55.23 oranında geliştirilerek enerji dönüşüm uygulamaları için potansiyel

oluşturmuştur. Sonuç olarak, bu çalışma IGO'nun PVDFNF'lere dahil edilmesi yoluyla yüksek performanslı piezoelektrik kompozitlerin üretildiğini göstermiştir. Bu bulgular, geleneksel PVDFNF'lerle ilişkili zorlukları ele alarak esnek ve giyilebilir enerji hasat sistemleri için uygun, mekanik olarak sağlam, yüksek performanslı piezoelektrik kompozitlerin geliştirilmesinin uygunluğunu göstermektedir.

Su ve ark. [220] kas liflerini taklit etmek için polidopamin (PDA), ara yüzey yapışmasını arttırmak için de elektro çekim ile baryum titanat/poliviniliden florür (BTO/PVDF) nanolif esaslı dokunmamış piezoelektrik tekstil materyali üretilmiştir. Mekanik dayanım ve piezoelektrik özelliklerde iyileşmeler sağlandığı bildirilmiştir.

Adaval ve ark. [221] tarafından yürütülen çalışmada, potansiyel piezoelektrik uygulamalar için grafen oksit (GO) ile entegre edilmiş poli (viniliden florür) (PVDF) nanokompozitler araştırılmıştır. Dielektrik çalışmaları, PVDF/GO nanokompozitin 0.1Hz'de yaklaşık 119'a ulaşan dielektrik sabitini ve 0.0014 μ C/cm²'lik bir kalıntı polarizasyon Pr değerini göstermiştir. Saf PVDF'ye kıyasla ağırlıkça %0.15GO içeren PVDF/GO nanokompozit için yaklaşık 36.2pm/V'lik önemli ölçüde daha yüksek bir d33 değerini ortaya çıkararak üstün piezoelektrik özellikler elde edilmiştir. Gerinim algılama incelemeleri, ağırlıkça %0.15 ve %0.18 GO içeren PVDF/GO kompozitleri için sırasıyla yaklaşık 3 ve 4 V'luk tepeden tepeye gerilimler sergilenmiş ve bunların algılama ve enerji hasadı uygulamaları için potansiyelleri vurgulamıştır.

Chen ve ark. [222] tarafından yürütülen çalışma, elektro çekim, poli(viniliden florür) (PVDF) membranlar kullanılarak insan eklemine izlenmesi için sandviç yapıya sahip bir piezoelektrik basınç sensörünün (PPS) geliştirilmesini amaçlamıştır. Bu araştırma, kristal yapılarını, morfolojilerini ve piezoelektrik performanslarını geliştirmek için grafen oksidin (GO) PVDF nanoliflerine entegrasyonunu araştırmaktadır. Nanoliflerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir teknik olan elektro çekim, PVDF'nin α -fazını daha arzu edilen β -fazına dönüştürmede etkili olduğunu kanıtlayarak malzemenin piezoelektrik özelliklerini geliştirmektedir. GO'nun eklenmesi sadece PVDF nanoliflerdeki β -faz içeriğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda PVDF matrisi içinde yeni bir iletken ağ oluşturur. Bu ağ elektron iletimini artırır ve PVDF malzemesi içindeki tepe akımında bir artışa neden olur. Optimum PPS, üstün piezoelektrik özellikler ve hassasiyet sergileyen ağırlıkça %0.5 GO katkılı PVDF membranlarla elde edilmiştir. Bu

PPS, 120N'luk bir darbe kuvveti altında 1.05V'tan 4.93V'a maksimum çıkış voltajı artışı, 60.02nA'dan 190.17nA'ya tepe akım artışı ve 14.4 mV/N'den 38.8 mV/N'ye gelişmiş bir hassasiyet kaydetmektedir. Ayrıca, gerçek zamanlı insan eklemi izleme için ayakkabı veya dirsek eklemlerine entegre edildiğinde, PPS çeşitli bükülme durumlarına yanıt vererek mükemmel elektrik sinyali hassasiyeti gösterir. Yüksek iletkenliğe sahip Au elektrotun dahil edilmesiyle sensör kayda değer bir elektrik performansı elde etmiştir. PPS, giyilebilir elektronik ve gerçek zamanlı hareket algılama alanında önemli bir potansiyele sahip olarak gerçek dünyadaki uygulamalarda basınç değişikliklerini tespit etme kabiliyetini göstermektedir.

Ahmed ve ark. [223] tarafından yürütülen araştırma, poli(viniliden florür-trifloroetilen) kopolimerden (PVDF-TrFE) yapılmış elektrikle eğrilmiş nanolifler kullanılarak ultra hassas piezoelektrik basınç sensörlerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Çalışma, bu elektro çekim nanoliflerin piezoelektrik tepkilerini iyileştirmek ve onları ultra hassas basınç sensörleri için uygun hale getirmek için çok önemli olan β -faz içeriğini artırmayı amaçlamıştır. Sonuçlar, modifiye edilmiş nanoliflerin gelişmiş bir elektroaktif β -fazı sergilediğini ve bu sayede piezoelektrik sensörler için uygun adaylar haline geldiğini göstermektedir.

Paralı ve ark. [224] elektro çekim poliviniliden florür/piezoelektrik kurşun zirkonat titanat (PVDF/PZT) kompozitlerine bozulmamış grafen nanoplateletleri (GNP'ler) dahil ederek mekanik enerji hasadı için piezoelektrik materyallerin geliştirilmesine odaklanan bir araştırma yürütmüştür. Çalışmalarının temel amacı, GNP'lerin konsantrasyonunun ve şeklinin kompozit yüzeylerin özelliklerini ve mekanik enerji hasadı uygulamaları için uygunluklarını nasıl etkilediğini araştırmaktır. GNP konsantrasyonu ağırlıkça %1.5 ve 2'ye yükseldikçe, materyallerin ortalama lif çapının PVDF/PZT'ye (270nm) kıyasla sırasıyla 236nm ve 264nm'ye düştüğünü ortaya koymuştur. Lif çapındaki bu azalma, GNP'lerin eklenmesi nedeniyle kompozit yapı içinde gelişmiş ara yüzey etkileşimlerini ve kristalliği göstermektedir. Ayrıca, FTIR analizleri, ağırlıkça %1.5 ve %2GNP içeriğine sahip PVDF/PZT/GNP piezoelektrik yüzeylerin β -faz oluşumunu önemli ölçüde iyileştirdiğini ve %97.8'lik kayda değer bir β -faz fraksiyonuna ulaştığını göstermiştir. Nanogeneratörlerin mekanik enerji toplama özelliklerini değerlendirmek için, uygun elektrotlar ve kablolarla birlikte PVDF/PZT ve PVDF/PZT/GNP yüzeylerini kullanarak esnek nanogeneratörler üretmişlerdir. Piezoelektrik performans

değerlendirmeleri, ağırlıkça %1.5GNP içeriğine sahip PVDF/PZT/GNP nanojeneratörlerin, aynı $2.5\text{m}\Omega$ direnç yükü altında 20Hz'de PVDF/PZT tabanlı nanojeneratöre ($1.51\mu\text{W}$) kıyasla 5.75 kat daha yüksek elektrik gücü verimliliği ($8.68\mu\text{W}$) elde ettiğini göstermiştir.



BÖLÜM II

2. MATERİYAL ve YÖNTEM

2.1. Materyal

2.1.1. Kullanılan Malzemeler

Kullanılan kumaş

Çalışmada filament esaslı işlem ile üretilmiş, ısı ile bağlanmış %100 Poliester esaslı (PES), 25g/m² dokunmamış kumaş kullanılmıştır.

Kullanılan kimyasallar

- H₂SO₄: Sülfürik asit, Saflık derecesi: %95-98 Molekül ağırlığı: 98.08 g/mol grafen oksit sentezinde kullanılmak üzere İsolab'tan satın alındı.
- H₃PO₄: Fosforik asit, Saflık derecesi: %85 Molekül ağırlığı: 98.00 g/mol grafen oksit sentezinde kullanılmak üzere Merck'ten satın alındı.
- KMnO₄: Potasyum permanganat, Saflık derecesi: %99.0 Molekül ağırlığı: 158.03 g/mol grafen oksit sentezinde kullanılmak üzere, İsolab'tan satın alındı.
- H₂O₂: Hidrojen peroksit, Saflık derecesi: % 35 grafen oksit sentezinde kullanılmak üzere Merck'ten satın alındı.
- HCl: Hidroklorik asit, Saflık derecesi: % 37, Molekül ağırlığı: 36.46 g/mol, Yoğunluk: 1.19 g/cm³, grafen oksit sentezinde kullanılmak üzere, Merck'ten satın alındı.
- CH₂OH: Etanol, Saflık derecesi: % 99.9 Molekül ağırlığı: 46.07 g/mol, grafen oksit sentezinde kullanılmak üzere, İsolab'tan satın alındı.
- Grafit partikülleri, grafen oksit sentezinde kullanıldı.

Marka: Sigma-Aldrich, Partikül boyutu: +100 mesh, Molekül ağırlığı: 12.01 g/mol

- C Vitamini (L-Askorbik asit): Grafen oksitin indirgenmesinde kullanılmıştır. Sigma Aldrich'ten satın alındı.

- Suda çözünür kuşburnu ekstratı (Rosa Canina): Grafen oksitin indirgenmesinde kullanılmıştır. Naturalya Kimya'dan satın alındı.
- DMF: Dimetilformamid ($(CH_3)_2NCOH$), PVDF polimer çözeltisinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Markası: Sigma-Aldrich
- C_3H_6O : Aseton, PVDF polimer çözeltisinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Markası: Sigma-Aldrich
- Poliviniliden Florür (PVDF): ($M_w = 244000$, Solef ® 1000 serisi) Solvay tarafından sağlandı.

Tüm kimyasallar analitik reaktif saflığındaydı ve daha fazla saflaştırılmadan kullanıldı. Deneyler boyunca destile su kullanıldı. Tüm deney ve üretimler laboratuvar şartlarında yapılmıştır.

2.1.2. Kullanılan Cihazlar

Santrifüj cihazı: Sentezlenen grafen oksitin yıkamasında ve saflaştırılmasında Nüve marka NF 800R model santrifüj cihazı kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 2.1'de santrifüj cihazı görülmektedir.



Şekil 2.1. Santrifüj Cihazı

Ultrasonik banyo: Grafen oksit dispersiyonlarının, PVDF polimer çözeltilerinin hazırlanması ve homojen hale getirilmesinde kullanılmıştır. Şekil 2.2'de ultrasonik banyo ve içerisinde grafen oksit dispersiyonu hazırlanırken fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.2. Ultasonik Banyo

Hassas Terazî: Toz ve kumaşların ağırlıklarının belirlenmesi için kullanıldı. Şekil 2.3'te hassas terazi ve kimyasal malzemeler gösterilmiştir.



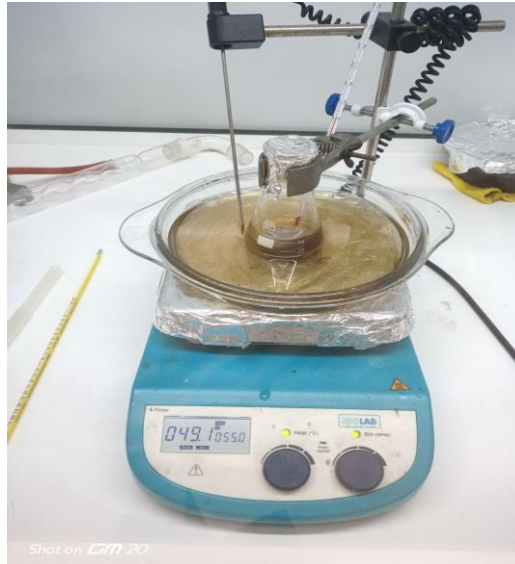
Şekil 2.3. Hassas Terazî ve Kimyasal Malzemeler

Mekanik Karıştırıcı: Kumaşa kaplanacak olan grafen oksit çözeltisinin homojen hale getirilmesinde kullanılmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 2.4'te mekanik karıştırıcı ile ilgili görsel verilmiştir.



Şekil 2.4. Mekanik Karıştırıcı

Isıticılı Manyetik Karıştırıcı: Çözelti, dispersiyon hazırlama ve indirgeme reaksiyonları esnasında çözelti sıcaklığını istenen düzeyde tutmak için kullanılmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 2.5'te ısıtıcılı mekanik karıştırıcı ile ilgili görsel verilmiştir.



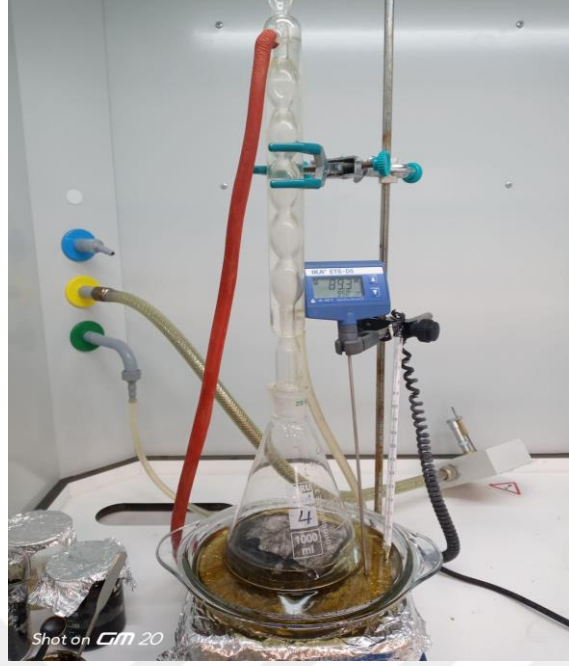
Şekil 2.5. Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı

Elektro Çekim Cihazı: Elektro çekim işlemi Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Inovenso/Ns 1 Nanospinner elektro çekim ünitesinde gerçekleştirildi. Cihazın fotoğrafı, Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Elektro Çekim Cihazı

Geri Soğutma Düzenegi: Grafen oksit ile kaplanmış kumaşın indirgenmesinde ve grafen oksitin çözeltiden indirgenmesi esnasında kullanılarak sıcaklık etkisiyle buharlaşan malzemenin geri kazanımı sağlanarak malzeme kaybı önlenmiştir. Şekil 2.7’de geri soğutma düzeneği ve kaplanmış kumaşın indirgenmesi görülmektedir.



Şekil 2.7. Geri Soğutma Düzenegi

Etüv: Grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit toz numunelerinin ve grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit ile kaplanmış kumaş numunelerinin kurutulması için kullanıldı. Etüv ile ilgili görsel, Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Etüv

Filtrasyon Düzenegi: İndirgenmiş GO’nun pH’ını dengelemek için vakum filtrasyon düzenegi kullanılmıştır. Şekil 2.9’da cihaz gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Filtrasyon Düzeneği

2.2. Yöntem

Bu tez çalışması için 2 üretim tekniği belirlenmiştir.

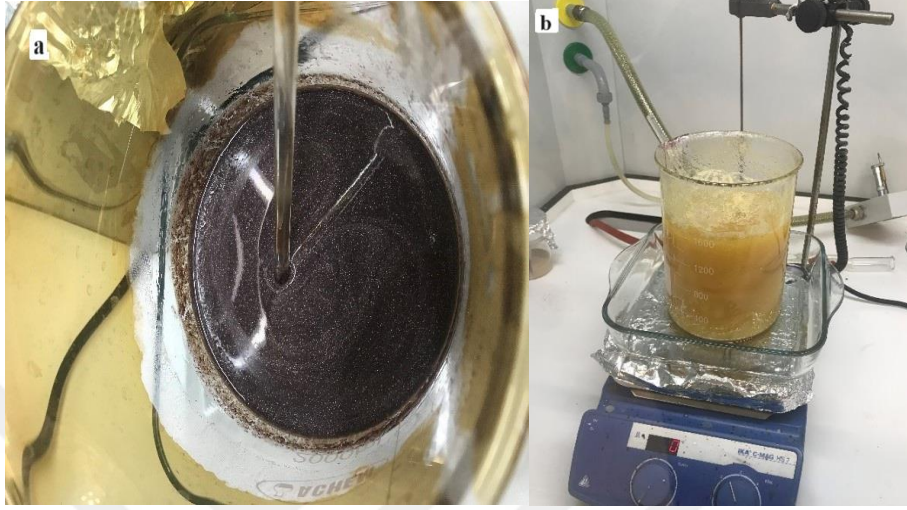
Birinci teknikte 25g/m^2 ağırlığında %100 PES filament esaslı dokunmamış kumaş GO çözeltisi ile emdirme yöntemi uygulanmış, üzerine GO katkılı PVDF polimer çözeltisi ve katkısız PVDF çözeltisi de olmak üzere elektro çekim yöntemi ile nanolif yüzey üretilmiş ve elde edilen yapı C vitamini ve kuşburnu toz ekstraktı ile indirgenmiştir.

İkinci teknikte ise 25g/m^2 ağırlığında %100 PES filament esaslı dokunmamış kumaşlar GO patı ile rakle ile kaplanmıştır. Rakle ile kaplanmış numuneler belirlenen indirgeme maddeleriyle indirgenmiş ve sonrasında üzerlerine indirgenmiş RGO katkılı PVDF polimer çözeltisi ve katkısız PVDF polimer çözeltisi de olmak üzere elektro çekim yöntemi ile nanolifler toplanmıştır. Kapanmamış dokunmamış kumaşa NW kodu verilmiştir.

2.2.1. Grafen Oksit Sentezi

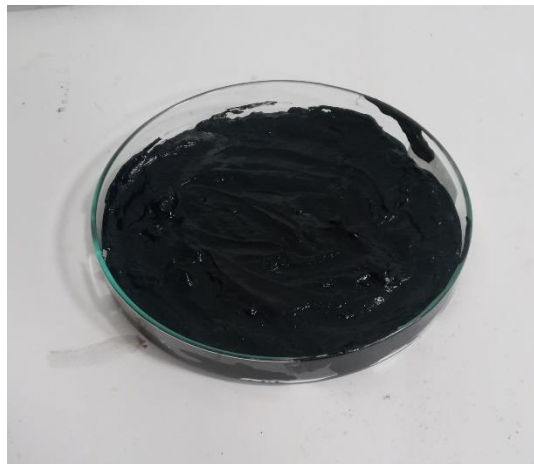
Çalışma için grafit partiküllerinden grafen oksit, geliştirilmiş Hummer's Metodu ile sentezlenerek elde edilmiştir [225]. Partikül grafit karışımına (3g) 9:1 oranında konsantre $\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{H}_3\text{PO}_4$ (360:40 mL) karışımı ve KMnO_4 (18g) eklendi. Reaksiyon daha sonra 50°C 'ye ısıtılıp, 12 saat karıştırılmıştır. Reaksiyon daha sonra oda sıcaklığına kadar soğutuldu ve %35 H_2O_2 (6 mL) ile buz (400 mL) üzerine döküldü. Ortaya çıkan

süspansiyon, önce 400ml 1 M HCl ve 200mL etanol (2x) ile tekrarlanan santrifüjleme (her biri 8000rpm'de 30 dakika) ile ve daha sonra pH 4-5 elde edilene kadar destile su ile yıkandı. Elde edilen katı ürün bir gece boyunca 60°C'deki etüvde kurutuldu.



Şekil 2.10. Grafen Oksit Sentezinde H₂O₂ İlavesinden Önce (a) ve Sonra (b) Reaksiyondaki Renk Değişimi

Elde edilen süspansiyon 8000rpm'de 30'ar dakika süreyle önce HCl, sonra etanol ve en son olarak da destile su ile pH 0-1'den pH 4-5 oluncaya kadar yıkandı. Son olarak elde edilen katı malzeme etüvde kurutularak grafit oksit eldesi gerçekleşti. Elde edilen GO ince bir film tabakası halindedir ve daha sonra bu film tabaka öğütülerek GO kullanıma hazır hale getirilmiştir. Elde edilen grafen oksitin etüvde kurutulmadan önceki hali Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Kurutulmadan Önce Grafen Oksit

2.2.2. Kaplama Patının ve Sulu Dispersiyonun Hazırlanması

1. üretim tekniği için GO dispersiyon banyosunun hazırlanması:

Dokunmamış %100 PES filament esaslı kumaşların GO ile emdirme yöntemi ile kaplanması için banyo oranı 1:20 belirlenmiştir. Elektro çekim yöntemi ile kumaşların üzerinde nanolif üretileceği için numuneler elektro çekim toplama silindirine uygun olacak kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan kumaşların ham ağırlıkları ortalaması 14.39g olarak ölçülmüştür. 2g/L olacak şekilde grafen oksit miktarı ile emdirme banyosu hazırlanmıştır. Ultrasonik banyoda 2 saat, daha sonra da manyetik karıştırıcıda 60°C’de partiküller iyice dispers oluncaya kadar karıştırılmıştır. Kaplama işlemi 60°C sıcaklıkta 30 dakika süre ile gerçekleştirildi. Tüm numunelerin tek tek olacak şekilde emdirme banyosunda kaplanması sağlandı ve etüvde kurutma işlemi gerçekleştirildi.

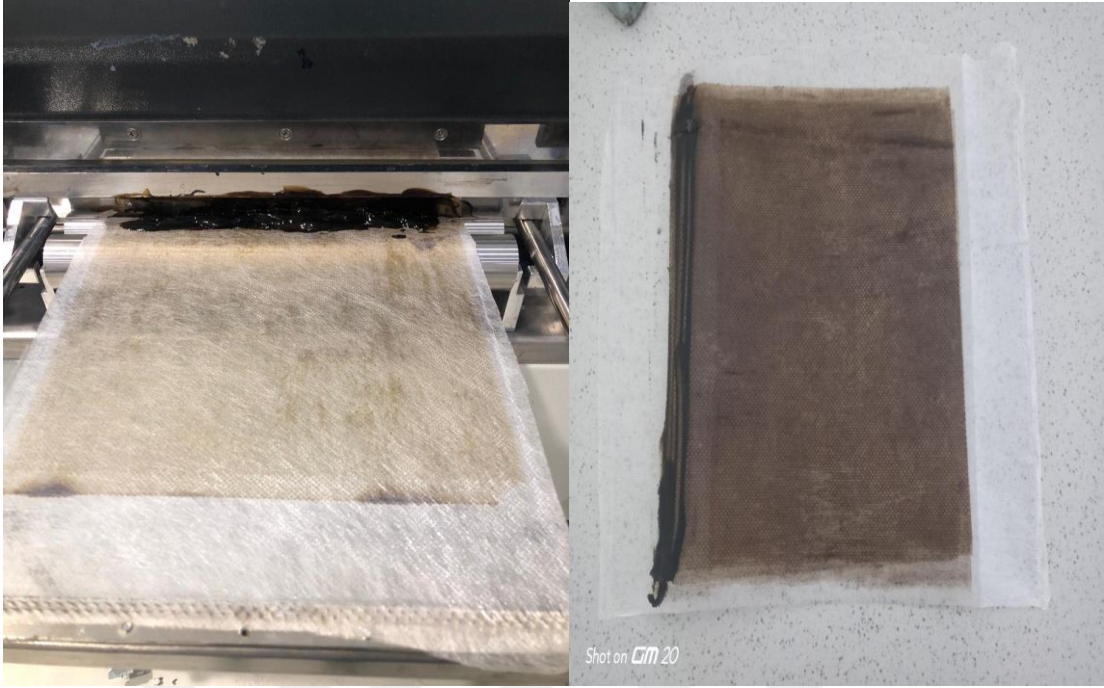
2. üretim tekniği için rakle kaplama patının hazırlanması:

25g/L GO sulu dispersiyonu hazırlandı. Bunun için 2.5g GO ile 100 mL destile su, bir beherde partiküllerin suda tamamen dispers olmasını sağlamak için hiç ısı vermeden ilk olarak oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Daha sonra ultrasonik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra en son olarak tekrar manyetik karıştırıcıda da karıştırılıp patın oldukça katı bir hal alması sağlanana kadar karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Yeterince katılaştığı gözlemlendikten sonra (yaklaşık 30 dakika kadar) mekanik karıştırıcıda karıştırılarak patın tamamen homojen hale gelmesi sağlanmıştır.

2.2.2.1. Rakle ile Kaplama

%100 poliester filament esaslı dokunmamış kumaşa, hazırlanan GO patı rakle ile kaplanmıştır. Kaplama kalınlığı 0.2mm olacak şekilde, kumaşın her iki yüzüne birer pasaj olacak şekilde kaplama yapılmıştır.

Kumaşın, kaplama sırasında her iki yüzüne de ayrı ayrı olmak üzere 110°C’de 10’ar dakika fikse işlemi uygulandı. İşlem sonucunda 2. üretim yöntemi için GO kaplanmış numuneler üretilmiştir. Rakle ile kaplama sonucu elde edilen numunelere NW- R-GO kodu verildi. Şekil 2.12’de dokunmamış kumaşlara rakle işleminin uygulanma işlem sırası ve rakle kaplama sonrası kumaşın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.12. Dokunmamış Kumaşa Rakle Kaplama İşlemi Uygulanması (solda), Rakle ile GO Kaplanmış Dokunmamış Kumaş (sağda)

2.2.2.2. Rakle ile Kaplanmış Kumaşın İndirgenmesi

Rakle ile GO kaplanmış dokunmamış kumaşların indirgenme işlemleri elektro çekim işlemi öncesinde C vitamini ve kuşburnu ekstraktı ile gerçekleştirilmiştir.

- Rakle ile GO kaplanmış kumaşın C vitamini ile indirgenmesi:

İlk olarak 0.2 M 200 mL C vitamini çözeltisi hazırlanmıştır. Bunun için 7.04g C vitamini 200mL su ile bir erlen içerisine eklendi. Tamamen çözünme gerçekleştikten sonra C vitamini çözeltisi ısıtıcı yardımıyla 95°C'ye kadar ısıtılmıştır. Bu esnada buharlaşma ile malzeme kaybı yaşanmaması için geri soğutmalı sistem kurulmuştur. GO kaplanmış olan kumaş C vitamini çözeltisi içinde 90 dakikada indirgenmiştir.

Sonrasında indirgenmiş GO kaplı kumaş destile su ile kademeli yıkandı ve ardından etüvde kurutuldu. Rakle ile kaplanmış ve C vitamini indirgenmiş dokunmamış kumaş numunelerine NW-C-RGO kodu verildi. Şekil 2.13'te kaplanmış kumaşın indirgeme işlemi sonrasında kademeli yıkama aşaması verilmiştir. Şekil 2.14'te GO rakle kaplı dokunmamış kumaş indirgenmiş ve kurutulmuş halde elektro çekim işlemi için hazır halde görülmektedir.



Şekil 2.13. Kaplanmış Kumaşın İndirgeme İşlemi Sonrası Kademeli Yıkama Aşaması



Şekil 2.14. Elektro Çekim Öncesi İndirgenmiş GO Rakle Kaplı Dokunmamış Kumaş

- Rakle ile GO kaplanmış kumaşın kuşburnu ekstraktıyla indirgenmesi:

Kütlece %10 kuşburnu toz ekstraktı (20g), %0.5 C vitamini (1g) ve 200 mL su, erlen içerisine eklendi. Manyetik karıştırıcı yardımıyla kuşburnu ekstraktının tamamen çözünmesi sağlandı. Tamamen çözünme sağlandıktan sonra çözelti geri soğutmalı sistem kurularak ısıtıcıda 95°C'ye ısıtılmıştır. Kumaş bu çözelti içinde 95°C'de 5 saatte indirgenmiştir.

Sonrasında indirgenmiş GO kaplı kumaş destile su ile kademeli yıkanmış ve ardından etüvde kurutulmuştur. Rakle ile kaplanmış ve kuşburnu ile indirgenmiş dokunmamış kumaş numunelerine NW-KB-RGO kodu verildi.

2.2.2.3. Emdirme Yöntemi ile Kaplama

Emdirme yöntemi için hazırlanan 2g/L GO sulu dispersiyonu ile her bir dokunmamış kumaş numunesi tek tek olacak şekilde manyetik karıştırıcıda 60°C'de 40 dakika emdirme yöntemi uygulanmış ve etüvde kurutulmuştur. Böylece GO kaplı numuneler, elektro çekim işlemi için hazır hale getirilmiştir. Emdirme yöntemi uygulanmış dokunmamış kumaş numunelerine NW-D-GO kodu verildi.

2.2.3. Saf Polimer Çözeltisinin Hazırlanması

Elektro çekim işlemi için saf polimer çözeltisi iplik formundaki PVDF kullanılarak, 50°C'de manyetik bir karıştırıcı kullanılarak 3:2 oranında (DMF/Aseton) ağırlıkça %10 PVDF ile hazırlandı.

Hem 1. hem de 2. üretim tekniğinde aynı şekilde hazırlanmış saf PVDF polimer çözeltisi ile elektro çekim yöntemi ile hazırlanmış olan dokunmamış kumaş numunelerinin üzerinde nanolif eldesi gerçekleştirildi. Her iki teknik için de elektro çekim parametreleri aynı olacak şekilde belirlenmiş ve ayarlanmıştır. Elektro çekim cihazında silindir-düze arası mesafe 12cm olarak ayarlandı. 25°C'de 200rpm silindir dönme hızıyla, 2mL/h besleme oranı ve 27kV elektrik akımıyla elektro çekim gerçekleştirildi. GO katkısız nanolifli yapıya PVDF kodu ve katkısız PVDF çekilen dokunmamış kumaşa da NWGO PVDF kodu verilmiştir.

Şekil 2.15'te elektro çekim ile dokunmamış kumaş üzerinde elde edilmiş nanolifli yapı numuneleri görülmektedir.



Şekil 2.15. Elektro Çekim ile Dokunmamış Kumaş Üzerinde Elde Edilmiş Nanolifli Yapı Numuneleri

2.2.3.1. GO Katkılı PVDF Çözeltisinin Hazırlanması

GO katkılı PVDF çözeltisinin hazırlanması için GO oranları belirlenerek ağırlıkça %0.5, ağırlıkça %1 ve ağırlıkça %2 olarak hazırlanmıştır.

%0.5'lik GO katkısı için 3 gram polimere oranla 0.015g GO, %1'lik GO katkısı için 0.030 g GO ve %2'lik GO katkısı için 0.060 g GO ilaveleri ile çözeltiler hazırlanmıştır. Çözeltiler, ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 60°C'de PVDF iyice çözünene kadar karıştırılmıştır. Emdirme yöntemi uygulanmış dokunmamış kumaşların üzerine farklı oranlarda GO katkılı PVDF nanolif elektro çekim işlemi ile toplandıktan sonra numune kumaşlara 05GO, 1GO ve 2GO kodları verilmiştir.



Şekil 2.16. İplik Formundaki PVDF ile GO Katkılı Polimer Çözeltisinin Hazırlanması

Yukarıda yer alan Şekil 2.16’da iplik formundaki PVDF, GO katkılı çözelti içinde hazırlık aşamasında görülmektedir.

2.2.3.2.İndirgenmiş Grafen Oksit Eldesi

- C vitamini ile indirgenmiş grafen oksit eldesi:

Poliester dokunmamış kumaş üzerine indirgenmiş GO katkılı PVDF nanolif üretimi yapılacağı için GO partiküllere indirgeme işlemi yapılmıştır. İlk olarak 0.2 M 200 mL C vitamini çözeltisine 2g GO eklendi ve ultrasonik banyoda çözelti karıştırılmıştır. Sonrasında geri soğutmalı sistemde ısıtıcıyla 95°C’de 90 dakikada indirgeme yapılmıştır. İndirgenmiş GO’nun pH’ını dengelemek için filtrasyonla yıkama işlemi yapılmıştır. Yıkama esnasında ara ara pH kontrolü yapılmıştır. pH’ın istendiği gibi 5-6 aralığında olduğu görüldüğünde etüvde kurutma işlemi yapılmıştır. Böylece C vitaminiyle indirgenmiş grafen oksit elde edilmiştir. Aşağıda yer alan Şekil 2.17’de RGO’nin filtrasyonla yıkama yapılarak pH dengeleme çalışması görülmektedir.



Şekil 2.17. Filtrasyon ile Yıkama İşlemi

- Kuşburnu ile indirgenmiş grafen oksit eldesi

Poliester esaslı dokunmamış kumaş üzerine indirgenmiş GO katkılı PVDF nanolif üretimi yapılacağı için GO partiküllere indirgeme işlemi yapılmıştır. Kütlece %10 kuşburnu, %0.5 C vitamini ve 200mL su bir erlen içerisinde eklendi. Manyetik karıştırıcı yardımıyla kuşburnu ekstraktının tamamen çözünmesi sağlanmıştır. Tamamen çözünme sağlandıktan sonra çözelti geri soğutmalı sistem kurularak ısıtıcıda 95°C'ye ısıtılmıştır. Çözelti erlen içerisinde 95°C'de 5 saatte indirgenmiştir. Böylece kuşburnu toz ekstraktı ile indirgenmiş grafen oksit elde edilmiştir. İndirgenmiş GO'nun pH'ını dengelemek için santrifüj işlemi yapılmıştır. Yıkama esnasında ara ara pH kontrolü yapıldı. pH'ın istendiği gibi 5-6 aralığında olduğu görüldüğünde etüvde kurutma yapılmıştır.



Şekil 2.18. Santrifüj Hazırlık İşlemi ve pH Kontrolü (solda), Çöken Partikül Kontrolü (sağda)

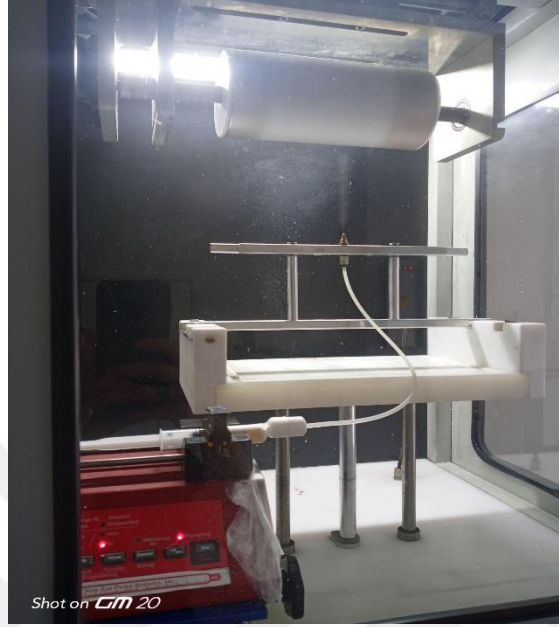
2.2.3.3.RGO Katkılı PVDF Çözeltisinin Hazırlanması

Rakle ile GO kaplanan ve indirgeme işlemi uygulanan dokunmamış poliester kumaş üzerine elektro çekim ile PVDF nanolif üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için kütlece %15'lik PVDF polimer çözeltisi hazırlanmıştır. Polimer çözeltisi RGO katkılı ve katkısız olarak hazırlanmıştır. 12 mL DMF ve 8 mL aseton içerisinde %0.5 için (0.015g), %1 için (0.03g) ve %2 için (0.060g) RGO, eklenerek ultrasonik banyoda 30 dakika kadar homojen olana kadar karıştırıldı. Daha sonra içerisine 3g PVDF eklenip 50°C'de manyetik karıştırıcıda polimer çözeltisi hazırlandı.

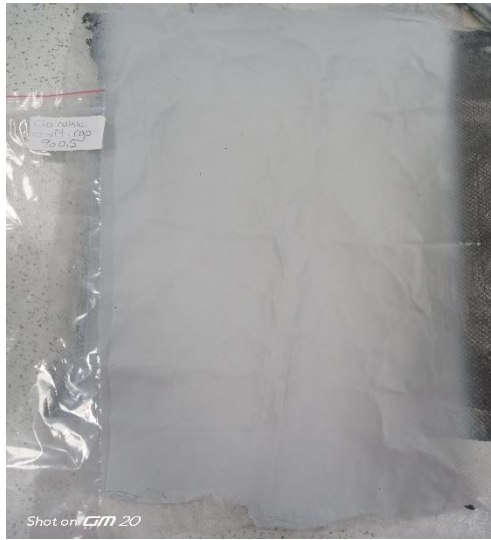
2.2.4.Elektro Çekim ile PVDF Nanolif Yüzeyin Dokunmamış Kumaş Üzerinde Eldesi

Elektro çekim cihazında silindir-düze arası mesafe 12cm olarak ayarlandı. 25°C'de 200rpm silindir dönme hızıyla, 2mL/h besleme oranı ve 27kV elektrik akımıyla elektro çekim yöntemiyle filament esaslı poliester dokunmamış kumaş üzerinde nanolif yüzey elde edilmiştir. Rakle ile kaplanmış ve C vitamini indirgenmiş dokunmamış kumaş üzerinde farklı oranlarda indirgenmiş grafen oksit katkılı PVDF nanolif yüzey üretildikten sonra, bu numunelere 05C-RGO, 1C-RGO ve 2C-RGO kodları verilmiştir. Rakle ile kaplanmış ve kuşburnu ile indirgenmiş dokunmamış kumaş üzerinde farklı oranlarda indirgenmiş grafen oksit katkılı PVDF nanolif üretildikten sonra bu

numunelere de 05KB-RGO, 1KB-RGO ve 2KB-RGO kodları verilmiştir. Rakle ile kaplanmış ve indirgenmiş ve üzerinde katkısız PVDF nanolif üretilmiş kumaşa da NWRGO PVDF kodu verilmiştir.



Şekil 2.19. Elektro Çekim İşlemi



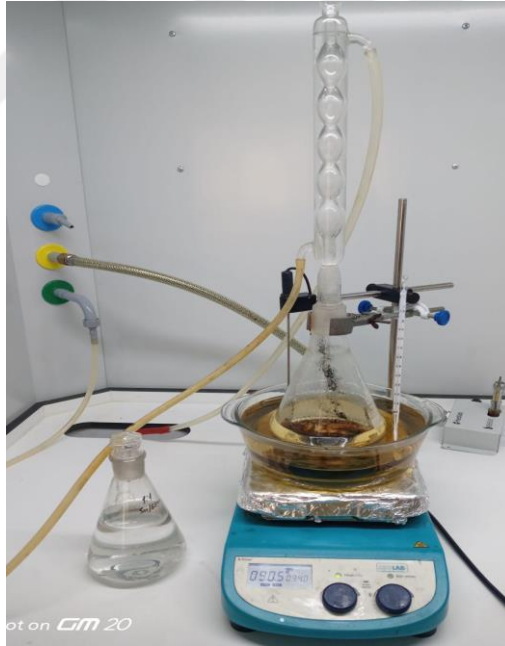
Şekil 2.20. Rakle ile Kaplanmış, İndirgenmiş ve Üzerinde RGO Katkılı PVDF Nanolif Üretilmiş Numune

Şekil 2.19’da elektro çekim işlem anı, Şekil 2.20’de rakle ile kaplanmış, C vitamini ile indirgenmiş ve üzerinde elektro çekim ile ağırlıkça %0.5RGO katkılı PVDF nanolif üretilmiş örnek bir numune görülmektedir.

2.2.4.1. GO Katkılı Nanolifli Yapının İndirgenmesi

- C vitamini ile indirgeme

Emdirme yöntemi ile GO uygulanmış dokunmamış kumaş, GO katkılı PVDF polimer çözeltisi ile üzerine elektro çekim yöntemi ile nanolif eldesinden sonra indirgenmiştir. 10.56g C vitamini 300 ml destile su ile ultrasonik karıştırıcıda homojen karışana kadar karıştırılmıştır. Erlenin içine alınan çözelti ile iyice ıslanması sağlanan kumaş 95°C'ye ısıtılmış manyetik ısıtıcıda 90 dakika indirgeme işlemine tabi tutulmuştur. Erlene geri soğutucu bağlanmıştır. İndirgeme işlemi sonrası kumaşa kademeli yıkama işlemi uygulanmıştır. 100 °C ile oda sıcaklığı arasındaki sıcaklıklarda olmak üzere 4 kademe şeklinde destile su ile yıkanmış ve etüvde 90 °C'de yarım saat kurutulmuştur. Emdirme yöntemi ile uygulanmış dokunmamış kumaş üzerinde, farklı oranlarda GO ile katkılanmış PVDF nanolif üretildikten sonra, C vitamini ile indirgenmiş ve bu numunelerin nanoyapılarına 05RGO-C, 1RGO-C ve 2RGO-C kodları ve dokunmamış kumaşlarına da NWRGO-C kodları verilmiştir.



Şekil 2.21. Emdirme Yöntemi Uygulanmış Kumaşın Elektro Çekim Sonrası İndirgenmesi

Şekil 2.21’de emdirme yöntemi uygulanmış ve üzerine elektro çekim ile PVDF nanolifli yapı, geri soğutucu bağlanmış düzenekte indirgenme işlemi esnasında görülmektedir.

- Kuşburnu toz ekstrakt ile indirgeme

Sırasıyla 20g kuşburnu toz ekstrakt ve 1g C vitamini 200ml destile su ile ultrasonik karıştırıcıda homojen olana kadar karıştırılmıştır. 95°C’de manyetik ısıtıcıda ısıtılan çözelti içerisine elektro çekim ile polimer çözeltisi çekilmiş olan kumaş iyice ıslanması sağlanarak konmuş ve geri soğutucu bağlanmıştır. 5 saat indirgeme işlemi gerçekleştirildikten sonra C vitamini indirgemesinde olduğu gibi 100°C ile oda sıcaklığı arasındaki sıcaklıklarda 4 kademe şeklinde destile su ile yıkanır ve açıkta bırakılarak kurutulmuştur. Emdirme yöntemi uygulanmış dokunmamış kumaş üzerinde, farklı oranlarda GO ile katkılandırılmış PVDF nanolifler toplandıktan sonra, kuşburnu ile indirgenmiş ve bu numunelerin nano yapılarına 05RGO-KB, 1RGO-KB ve 2RGO-KB kodları ve dokunmamış kumaşlarına da NWRGO-KB kodları verilmiştir. Emdirme yöntemi uygulanmış ve üzerlerine GO katkılı PVDF nanolif çekilmiş dokunmamış kumaş numunelerinin ortalama ağırlıkları 2.880 gram olarak ölçülmüştür. Elektro çekim öncesi ham ağırlıkları ortalama 1.448 gramdır. Şekil 2.22’de emdirme yöntemi uygulanmış ve üzerinde elektro çekim ile PVDF nanolif üretilmiş kumaş indirgendikten sonra, kurutulmadan hemen önceki hali ile görülmektedir.



Şekil 2.22. Emdirme Yöntemi Uygulanmış Kumaş Elektro Çekim Sonrası İndirgenmiş Halde Kurutma Aşaması

2.3. Karakterizasyon Teknikleri

X-ışını Kırınım (XRD) Analizi: Marmara Üniversitesi Nanoteknoloji ve Biyomalzemeler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan XRD analizi Cu Ka ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) radyasyon kaynağı ile θ - 2θ aralığı 5° - 70° arasında olacak şekilde uygulanmıştır. Ölçümler, 40 kV voltaj ve 30mA akım değerlerinde Shimadzu marka LabX XRD 6100 model cihaz ile yapılmıştır. Tabakalar arası mesafenin (d) hesaplanmasında eşitlik (1)'de verilen Bragg eşitliğinden faydalanıldı:

$$\lambda = \frac{2d \sin \theta}{n} \quad (1)$$

verilen eşitlikte, λ kullanılan X ışını kaynağının dalga boyunu, θ Bragg açısını, d tabakalar arası mesafeyi ve n ise kırınım sabitini ifade etmektedir [226].

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektroskopisi: Emdirme yöntemi ile GO uygulanmış dokunmamış kumaşların fonksiyonel grup analizlerinde Marmara Üniversitesi İstanbul Tekstil Araştırmaları Ar-Ge ve İnovasyon merkezinde Perkin Elmer firmasına ait Spectrum 100 FTIR cihazı kullanılmıştır. Spektrumlar 4000 - 400 cm^{-1} dalga sayısı aralığında ATR aparatı ile gerçekleştirilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM): GO katkılı PVDF nanolifler ile GO ile kaplanmış indirgenmiş ve indirgenmemiş tüm numunelerin yapısal analizinde İstanbul Teknik Üniversitesi Tekstil Teknolojileri ve Tasarım Fakültesinde Temag Laboratuvarı Tekstil Makina ve Malzemeleri Araştırma Geliştirme Merkezinde bulunan TESCAN marka VEGA 3 model SEM cihazı kullanılmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 2.23'te analizde kullanılan SEM cihazına ait görsel verilmiştir.

Numunelere kaplama işlemi, İstanbul Teknik Üniversitesi Tekstil Teknolojileri ve Tasarım Fakültesinde Temag Laboratuvarı Tekstil Makina ve Malzemeleri Araştırma Geliştirme Merkezinde bulunan QUORUM marka SC7620 model kaplama cihazında, altın/paladyum karışımı ile 165s süre ile uygulandı. Şekil 2.24'te kaplama işlemi için kullanılan cihaz (işlem esnasında) ve Au/Pd kaplanan numuneler verilmiştir.



Şekil 2.23. SEM Cihazı



Şekil 2.24. Kaplama Cihazı ve İşlemi (solda), Au/Pd Kaplanan Numuneler (sağda)

Kalınlık Ölçümleri:

GO ve RGO kaplı poliester dokunmamış kumaş numunelerinin kalınlık ölçümleri ve ayrıca GO ve RGO katkılı ve de katkısız PVDF nanoliflerin de kalınlık ölçümleri Mitutoyo kalınlık ölçme cihazı ile yapılmıştır.

Şekil 2.25'te kalınlık ölçme aleti ile kalınlık ölçme işlemi yapılması görülmektedir.



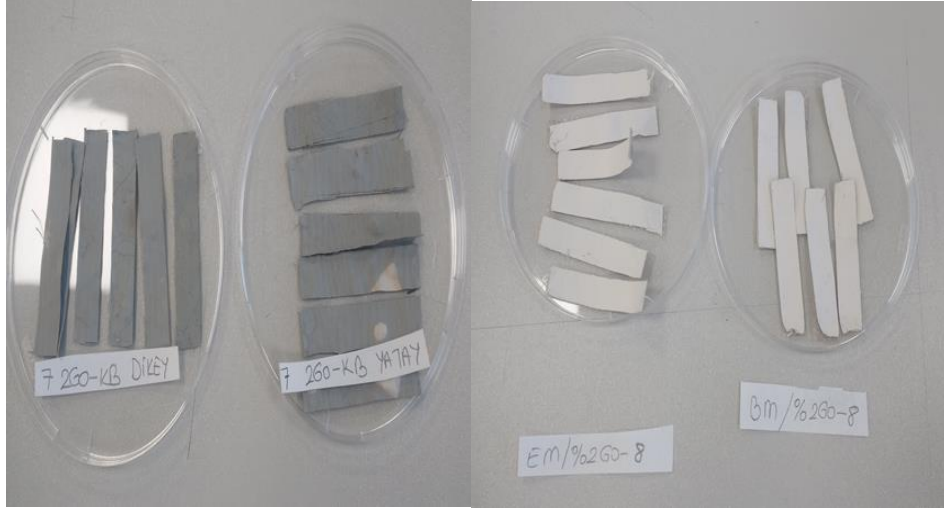
Şekil 2.25. Dijital Kalınlık Ölçme Aleti

Mukavemet Ölçümleri:

Üretilen nanolif yüzeylerin mukavemet ölçümleri Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tekstil Mühendisliği Laboratuvarlarında Instron 4411 cihazıyla yapılmıştır. Mukavemet testi koşulları 30mm/dk test hızı ve 10mm x 50mm numune boyutları olarak ayarlanmıştır. Ölçümler yatay ve dikey yönde olmak üzere 10 tekrar olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 2.26’da mukavemet ölçümlerinin yapıldığı Instron marka test cihazı ve Şekil 2.27’de ölçümü yapılacak nanolifli yapıların dikey ve yatay yönde hazırlanmış test numunleri görülmektedir.



Şekil 2.26. Instron 4411 Mukavemet Test Cihazı



Şekil 2.27. Dikey ve Yatay Yönde Hazırlanmış Mukavemet Test Numuneleri

Elektriksel Direnç Ölçümleri:

Üretilen numunelerin elektriksel direnç ölçümleri Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tekstil Mühendisliği Laboratuvarlarında 4-nokta uç (Keithley 2450 Sourcemeter Everbeing Int'l Corp) ile ölçülmüştür. Ölçümler hem tüm üretilen nanolifli yapılar hem de dokunmamış kumaşlar için ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 2.28'de üretilen numunelerin elektriksel direnç ölçüm işlemi görülmektedir.



Şekil 2.28. Keithley 2450 4 Nokta Uç Elektriksel Direnç Ölçüm Cihazı

Su Temas Açısı Testleri:

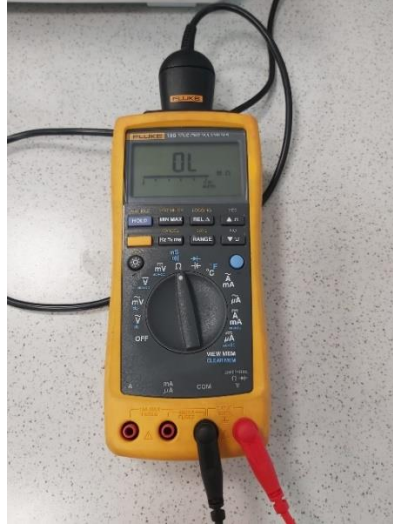
Bu tez çalışması için üretilen kumaş numunelerinin su temas açısı ölçümleri, Marmara Üniversitesi İstanbul Tekstil Araştırmaları Ar- Ge ve İnovasyon Merkezi Laboratuvarında KSV CAM 101 cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler hem nanolifli yüzeye hem de dokunmamış kumaş yüzeyine olmak üzere her numune için onar tekrar olacak şekilde ayarlanarak yapılmıştır. Şekil 2.29’da su temas açısının ölçümünün yapıldığı cihaz görülmektedir.



Şekil 2.29. Su Temas Açısı Test Cihazı

Sensör Ölçümleri:

Üretilen numunelerin, basınç sensörü olarak kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Laboratuvarlarında Fluke marka Dijital Multimetre ile direnç değişimleri ölçülmüştür. Ölçümler elektriksel olarak yalıtkan veri veren nanolifli yapı ile iletkenlik özelliği kazanmış dokunmamış kumaşa kütle ağırlığı uygulanarak yapılmıştır. Hem emdirme uygulanmış hem de rakle ile kaplanmış tüm kumaş numunelerinin dirençleri ölçülmüştür. Şekil 2.30’da Fluke marka dijital multimetre ve Şekil 2.31’de üretim numunelerine ölçüm esnasında uygulanan kütle ağırlık seti gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Fluke Marka Multimetre



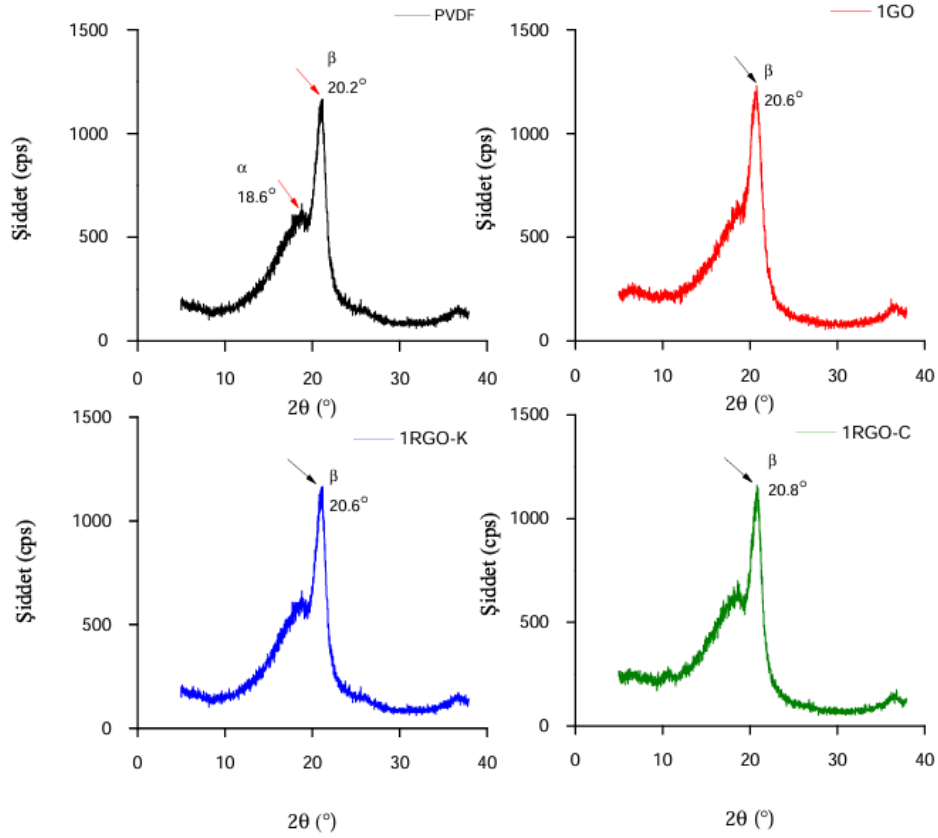
Şekil 2.31. Kütle Ağırlık Seti

BÖLÜM III

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. XRD Analizi Sonuçları

Elektro çekim PVDF nanoliflerin kristal yapısı X ışını kırınımı ile karakterize edildi. Aşağıda yer alan Şekil 3.1, PVDF, 1GO, 1RGO-KB ve 1RGO-C nanoliflerinin X ışını kırınımını göstermektedir. PVDF elektro çekim nanolif, sırasıyla α (020) ve β ((200), (110)) polimorflarının yansımalarıyla ilişkili $2\theta=18.6^\circ$ ve 20.2° 'de karakteristik pikler göstermektedir. PVDF'nin moleküler zincirleri, elektro çekim işlemi sırasında yüksek elektrik kuvvetleri tarafından tek eksenli olarak gerilir ve saf PVDF nanoliflerinde elektroaktif faz oluşumu gerçekleşir. Ağırlıkça %1 GO içeren numunede, $2\theta=18.6^\circ$ 'deki α zirvesinin 20.6° 'deki β karakteristik tepe zirvesine değiştiği gözlemlenmektedir. α -fazının karakteristik pikleri azalırken, β fazının (020) ve (110) yansımalarına karşılık gelen yeni bir kristalizasyon piki 20.6° 'de belirerek β fazının varlığını göstermektedir. GO ile elektro çekim, liflerde α 'dan β fazına dönüşüm, elektro çekim sırasındaki gerdirme ve yerinde kutuplamadan kaynaklanmaktadır. GO'nun bir nano katkı maddesi olarak dâhil edilmesi, β -faz kristalinitesini artırır. Ayrıca, β -fazının yoğunluğundaki hafif bir artış, GO'da bulunan karbonil grupları ile PVDF'deki CF_2 segmentleri arasındaki etkileşime bağlanabilir [227]. Kuşburnu ekstraktı tozu ve C vitamini ile yapılan indirgeme işleminden sonra karakteristik α fazı ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni muhtemelen RGO'nun karbonil gruplarının, yeterli PVDF zincirini β -fazının gerekli trans-trans (TT) konformasyonuna çekirdekletmesi için yetersiz miktarda olmasından kaynaklanmaktadır [228]. Ancak indirgeme işleminden sonra PVDF nanoliflerinin saf PVDF nanoliflerine göre hala β -fazı ile zenginleştiği görülmektedir. Sonuç olarak, elektro çekim nanoliflerin XRD spektrumlarının analizi, FTIR spektrumlarının analizi ile uyumludur.



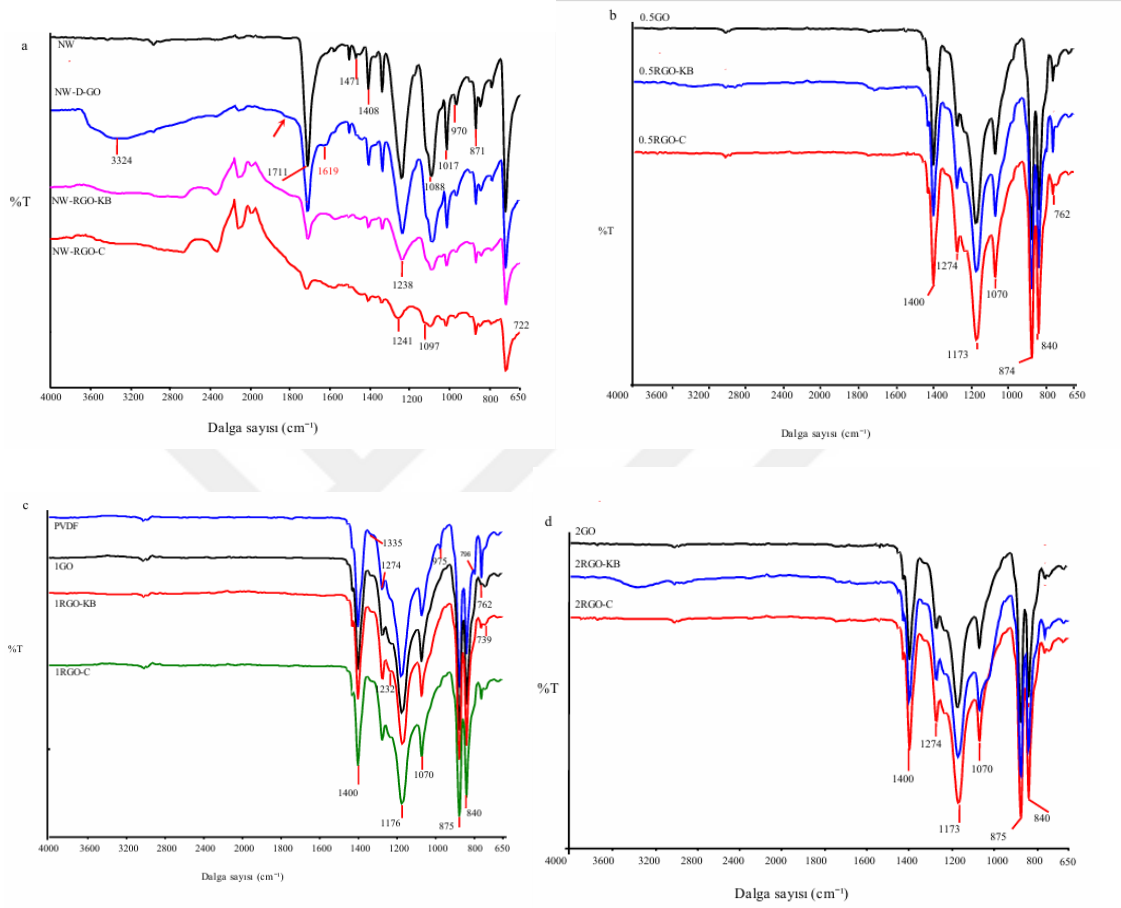
Şekil 3.1. GO'lu/GO'suz Elektro Çekim PVDF Nanoliflerin ve Kuşburnu Ekstraktı Tozu ve C Vitamini ile Kimyasal İndirgeme İşleminden Sonra XRD Spektrumları.

3.2. FTIR Analizi Sonuçları

FTIR, poliester dokunmamış kumaş yüzeyinde GO nano tabakalarının kaplanmasını ve indirgenmesini analiz etmek ve ayrıca PVDF nanolif içindeki kristal fazların yapısal dönüşümünü analiz etmek için yapılmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 3.2, GO, RGO-KB ve RGO-C kaplı poliester dokunmamış kumaşın ve nanolifli yapıların FTIR analizini göstermektedir. 722 cm^{-1} , 871 cm^{-1} ve 1408 cm^{-1} 'deki pikler aromatik gruptaki C-H bağına, 1711 cm^{-1} ve 1238 cm^{-1} 'deki pikler C=O'ya ve sırasıyla aromatik ester ve esterin C-O gerilme titreşimlerini ifade eder [229, 230]. Glikolün C-O gerilmesi 1017 cm^{-1} 'de, benzenin düzlem içi titreşimleri ise 970 cm^{-1} 'de görülmüştür. 1088 cm^{-1} 'deki tepe noktası ester C=O gerilme titreşimini temsil eder [231].

GO kaplama işleminden sonra $3600\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ arasındaki geniş bir pik, karboksilik asidin O-H gerilme titreşimlerini gösterir; GO'dakiler su molekülleri ve alkol grupları kaynaklı

olabilir. 1619 cm^{-1} 'de ortaya çıkan yeni tepe, oksitlenmemiş grafitik alandan gelen $\text{C}\equiv\text{C}$ uzanımlarına karşılık gelir [232]. GO'nun indirgenmesinden sonra $3600\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ arasındaki geniş pik kaybolmuş ve keskin piklerin şiddeti azalmıştır.



Şekil 3.2. Dokunmamış Kumaşın FTIR Spektrumları, GO Kaplı Dokunmamış Kumaş, Kuşburnu ve C Vitamini (a) ile İndirgenmiş Numuneler ve Saf PVDF Nanolifleri, Ağırlıkça% 0.5 GO-PVDF ve İndirgenmiş GO-PVDF Kompozit Nanolifleri (b), Saf PVDF Nanolifleri, Ağırlıkça% 1 GO-PVDF ve İndirgenmiş GO-PVDF Kompozit Nanolifleri (c), Saf PVDF Nanolifleri, Ağırlıkça% 2 GO-PVDF ve İndirgenmiş GO-PVDF Kompozit Nanolifleri (d).

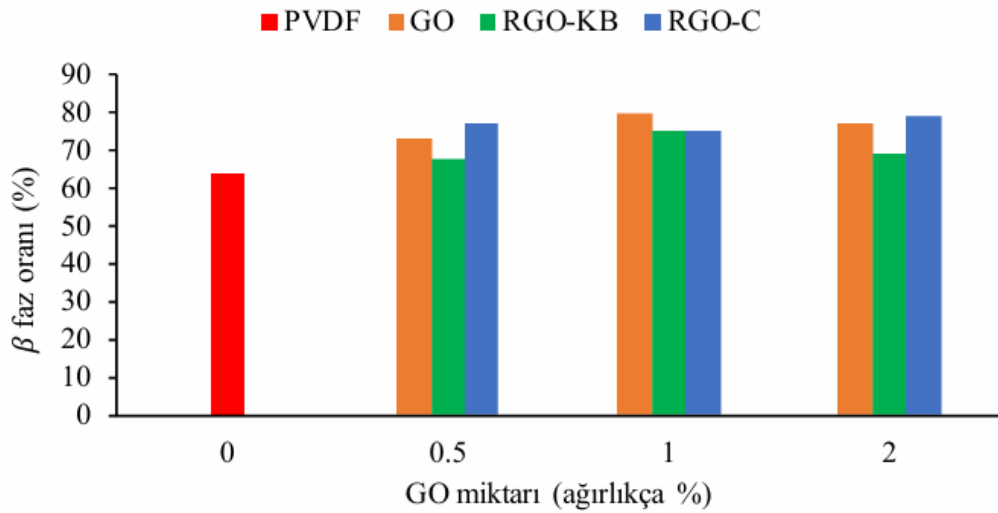
Elektro çekim ile üretilmiş PVDF nanoliflerin, ağırlıkça % 1 GO katkılı PVDF'nin ve indirgenmiş GO katkılı PVDF kompozit nanoliflerin FTIR spektrumları, Şekil 1c'de gösterilmektedir. Katkisız PVDF nanolifleri için karakteristik titreşim tepe noktaları, polar olmayan α fazına karşılık gelen 764cm^{-1} , 796cm^{-1} , 975cm^{-1} 'de gözlemlenir. 1274

ve 1232cm⁻¹'deki tepe noktaları sırasıyla polar β fazının ve yarı kutuplu γ fazının çekirdeklenmesini doğrulamaktadır. 1GO nanolif için tüm α -tepe noktalarının ortadan kalktığı ve elektroaktif β - ve γ -fazlarına karşılık gelen tepe noktaları daha güçlü hale geldiği gözlenmektedir. 1GO nanolifleri için 840 cm⁻¹ 'deki pik, saf PVDF'den daha yoğundur; bu GO'daki π -elektron bulutu ile oksijen içeren fonksiyonel gruplar (karbonil ve karboksilik gruplar) ve PVDF'nin -CH₂-CF₂- dipolleri arasındaki spesifik elektrostatik etkileşimi göstermektedir [233]. PVDF'nin beş kristal fazı (α , β , γ , δ , and ϵ) arasında, kararlı, polar olmayan α fazı, erime kristalizasyonundan kolayca elde edilebilen ve elektroaktivitesi olmayan en yaygın kristal fazdır. Polar β fazı ve γ fazı PVDF kristali, α fazından daha yüksek elektroaktiviteye sahiptir ve α fazını β fazına veya γ fazına dönüştürmek ve PVDF'nin piezoelektrikliğini arttırmak için farklı yöntemler kullanılmaktadır [234]. Piezoelektrik özellik, PVDF polimerinin β -fazının miktarına veya toplam kristalliğine bağlıdır [206]. FTIR, bir polimerdeki β kristal fazlarını aşağıdaki denklemle tanımlamak için yaygın olarak kullanılır:

$$F(\beta) = \frac{X_{\beta}}{X_{\alpha} + X_{\beta}} = \frac{A_{\beta}}{\left(\frac{K_{\beta}}{K_{\alpha}}\right)^{A_{\alpha} + A_{\beta}}} \quad (2)$$

burada K_{α} ve K_{β} belirli bir dalga numarasındaki soğurma katsayılarıdır. K_{α} 6.1x10⁴ cm² /mol ve K_{β} 7.7x10⁴ cm² /mol'dür. X_{α} ve X_{β} , α ve β kristal fazlarının kütle kesirleridir. A_{α} ve A_{β} 762 ve 840 cm⁻¹ 'deki soğurma bantlarının alanıdır [235]. Elektro çekim PVDF nanolifleri için F_{β} değerleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Saf PVDF nanolifleri için β -faz fraksiyonu %64 olarak elde edilmiştir. GO katkılarının eklenmesiyle β -faz içeriği artmıştır. En yüksek β -fazı içeriği %80 olarak 1GO örneğinde elde edilmiştir. Elde edilen sonuca göre PVDF nanoliflerine GO eklenmesiyle β fazı miktarının yaklaşık %25 arttığı söylenebilir. Ayrıca GO'nun kuşburnu tozu ekstraktı ve C Vitamini ile indirgenmesinden sonra β fazının miktarı hafif bir azalma göstermiştir. GO'nun indirgeme işlemi β fazının miktarını azaltsa da yine de saf PVDF nanoliften daha fazladır. İndirgenmiş numuneler için en yüksek β -fazı içeriği, %79 olarak 2RGO-C'de elde edilmiştir ki bu, saf PVDF nanolifinkinden yaklaşık %23 daha yüksektir. GO'nun PVDF nanolife katkı maddesi olarak eklenmesi, etkili dipol polarizasyonunu sağladı ve artan dipol-dipol kuvvetlerinden dolayı β faz kristallerinin çekirdeklenmesini kolaylaştırdı. PVDF zincirlerinin GO tabakalarına bağlanması, PVDF'deki CF₂ ile GO'nun -C=O ve COOH grupları arasındaki etkileşimden kaynaklanmıştır (hidrofilik etkileşim) [205]. 840 ve 762

cm⁻¹ 'deki zirveler, gelişmiş β -fazı gelişimini ve α -fazı baskılanmasını araştırmak için kullanılır. Saf PVDF için bu iki absorpsiyon bandının tepe yoğunluklarının göreceli oranı 2.2 iken en yüksek değer 5.0, ağırlıkça %1 GO içeren nanolif için elde edildi. 1GO numunesinin daha yüksek değeri, PVDF zincirleri üzerindeki yüksek elektronegatif flor ile GO oksijen atomları üzerindeki serbest elektron çiftleri arasındaki güçlü Van der Waals etkileşimleri nedeniyle β -kristal fazının gelişimini doğrular. [236]. 1RGO-KB ve 1RGO-C nanolifli yapılar için tepe yoğunluklarının bağıl oranı sırasıyla 3.85 ve 3.81'dir. GO'nun indirgenmesinden sonra β fazı miktarının ve pik yoğunluklarının bağıl oranının azalması, PVDF ile GO arasındaki etkileşimi sağlayan oksijen içeren fonksiyonel grupların uzaklaştırılmasıyla açıklanabilir. Hidrofilik etkileşimin bozulması β fazının miktarının azalmasına neden oldu.

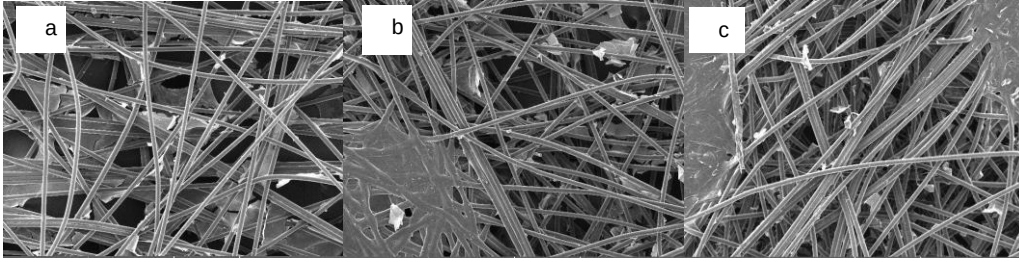


Şekil 3.3. Grafen Oksit Miktarının β Faz Oranına Etkisi

3.3. SEM Analiz Sonuçları

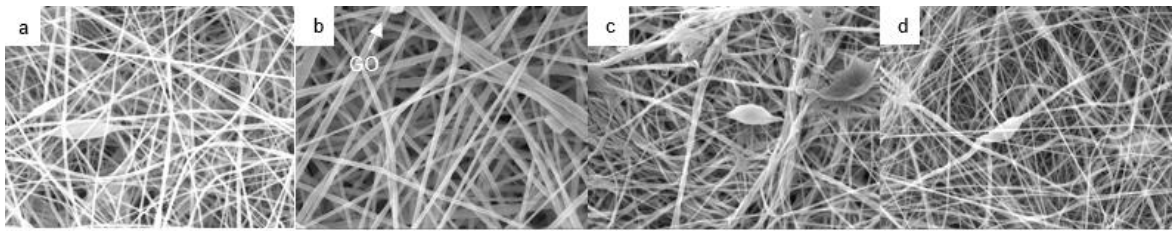
GO içeren ve içermeyen poliester dokunmamış kumaşın ve GO'nun indirgenmesinden sonraki yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu ile karakterize edilmiştir. GO ve RGO ile kaplanmış poliester dokunmamış kumaşın SEM görüntüleri Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4 (a)'da, poliester liflerin arasında ve çevresinde GO nano tabakalarının varlığı, GO nano tabakalarının sulu dispersiyondan kaplanma işlemini doğrulamaktadır. Şekil 3.4 (b) ve (c)'de sırasıyla GO'nun kuşburnu tozu ekstraktı ve C

Vitamini ile indirgenmesinden sonra 200 büyütme ile nano tabakaların varlığı gözlemlenebilir.



Şekil 3.4. GO ile Kaplanmış (a), Kuşburnu Tozu Ekstraktı ile İndirgenmiş (b) ve C Vitamini ile İndirgenmiş Dokunmamış Kumaşın SEM Görüntüleri (c) (200x).

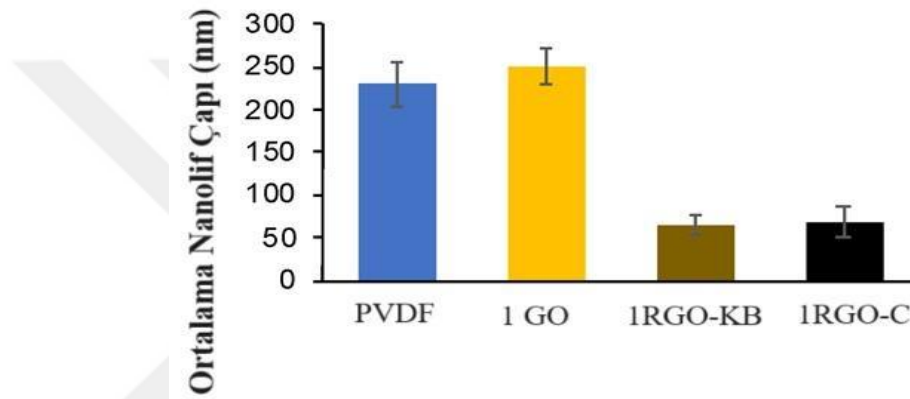
Saf PVDF ve GO katkılı PVDF nano lifli yapılarının yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir ve Şekil 3.5'te verilmiştir. Şekil 3.5 (a)'da PVDF nano liflerinin yüzeyi pürüzsüz ve tekdüze olduğu görülmektedir. Ancak boncuklu nanoliflerin oluştuğu da görülebiliyor. PVDF polimer çözeltisine ağırlıkça %1 GO eklenmesiyle boncuk oluşumu olmadan nanolifler elde edilmiştir. GO katkılı PVDF nanoliflerin C Vitamini ve kuşburnu ekstraktı kullanılarak kimyasal indirgeme işleminden sonra nanolifler, indirgeme işlemi sırasında uygulanan ısıнын neden olduğu nanoliflerin birbirine yapışmasıyla sonuçlanan homojenliğin kısmi bozulmasıyla orijinal lifli morfolojisini korumuştur. Ayrıca görüntülerde büyük boncuklar veya toplanmış GO/RGO nano tabakaları gibi bazı kusurlar da görülmektedir. Ayrıca sonuçlar, PVDF nanolif yapısının sulu çözeltide 95⁰C'de belirli bir süre stabilitesini koruduğunu göstermektedir.



Şekil 3.5. Elektro Çekim PVDF Nanoliflerin (a), GO Katkılı PVDF Nanoliflerin (b), Kuşburnu Tozu Ekstraktı ile İndirgenmiş (c) ve C Vitamini ile İndirgenmiş (d) SEM Görüntüleri (10kx).

Nanoliflerin ortalama çapı Image J programı ile ölçülmüş ve aşağıda yer alan Şekil 3.6'da verilmiştir. Saf PVDF nanoliflerinin çapının 230 ± 26 nm olarak elde edildiği

görülmektedir. Aynı zamanda ağırlıkça %1GO katkılı PVDF nanolifleri $251 \pm 21\text{nm}$ olarak elde edildi. Sonuç, GO eklenen PVDF nanoliflerin saf PVDF nanoliflerden daha büyük çaplara sahip olduğunu göstermektedir. Ancak C vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu ile yapılan indirgeme işleminden sonra nanoliflerin çapında dikkate değer bir azalma görülmüştür. Kimyasal indirgeme işlemi sonrasında nanoliflerin çapının azalmasının nedeni, GO nanotabakalarının yüzeyinde ve kenarlarında yer alan oksijen içeren fonksiyonelliklerin ortadan kalkması ve dolayısıyla nanotabakaların düzlemler arası mesafesinin azalması sonucunda daha ince nanolifli yapı oluşması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 3.6. Elektro Çekim ile Üretilmiş Saf PVDF, GO Katkılı PVDF ve Kuşburnu Toz Ekstraktı ve C Vitamini ile İndirgenmiş GO Katkılı Ortalama Nanolif Çapları

3.4. Kalınlık Ölçüm Sonuçları

Her bir numunenin 10 farklı yerinden ölçüm alınarak ortalama sonuç dikkate alınmıştır. 1. üretim tekniğinde nanolifli yapıların kalınlık ortalamaları 0.1889mm, 2. üretim tekniğinde de nanolifli yapıların kalınlık ortalamaları 0.1982mm bulunmuştur. Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de nanolifli yapıların kalınlık ölçüm sonuçlarının ortalamaları verilmiştir.

Tablo 3.1. Birinci Üretim Tekniği İçin Üretilen Nanolifli Yapıların Ortalama Kalınlıkları

Numune	Nanolif Kalınlık Ortalaması (mm)
05GO	0.218
05RGO-C	0.199
05RGO-KB	0.196
1GO	0.219
1RGO-C	0.173
1RGO-KB	0.179
2GO	0.103
2RGO-C	0.233
2RGO-KB	0.14
NWGO PVDF	0.229

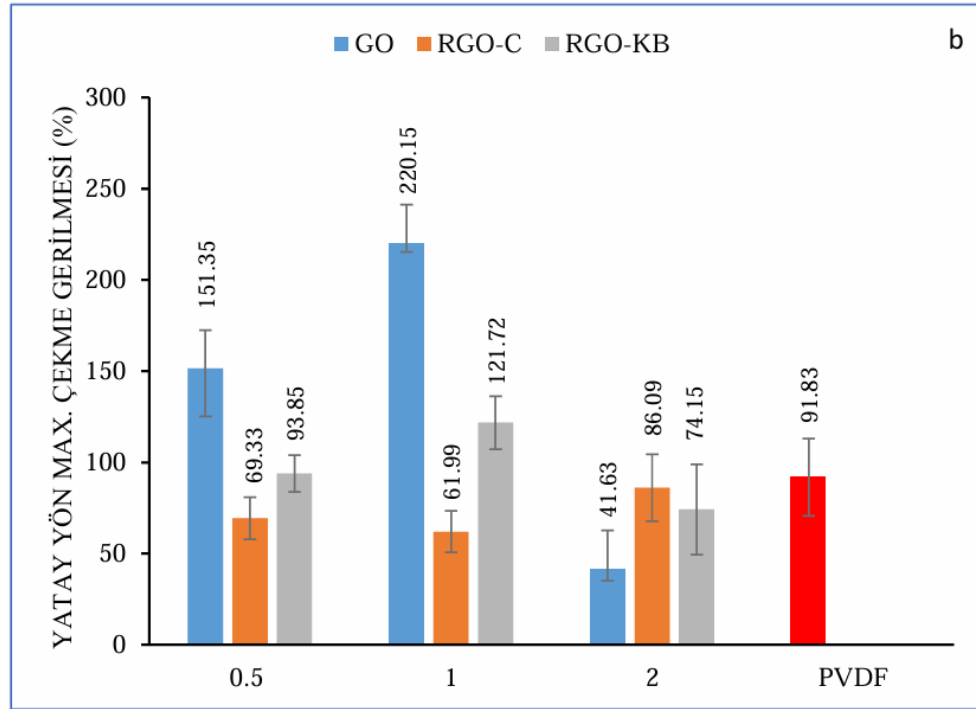
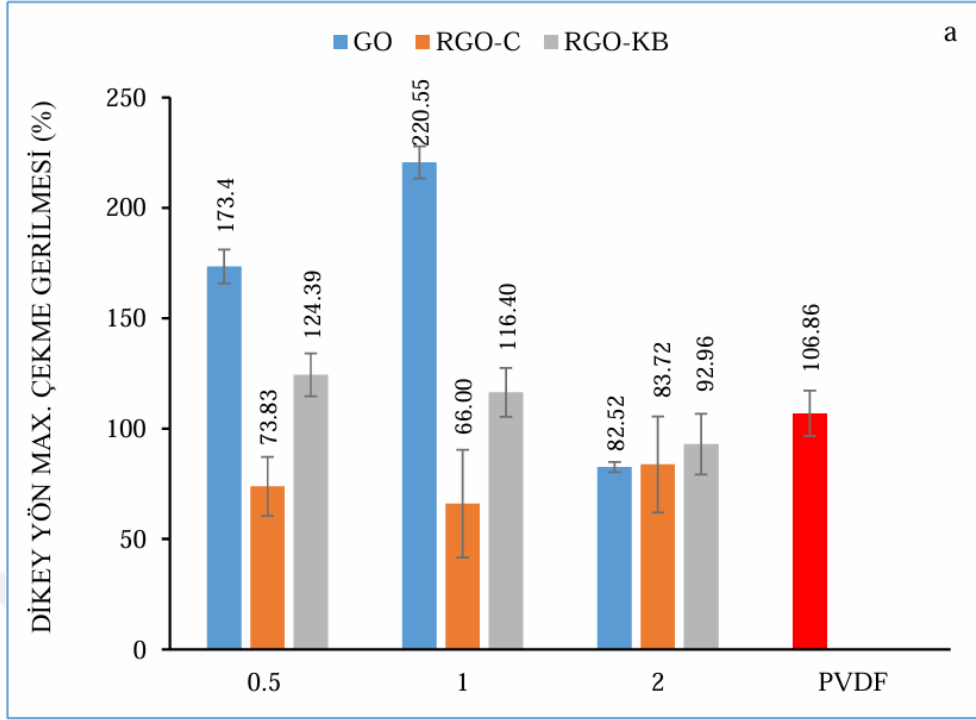
Tablo 3.2. İkinci Üretim Tekniği İçin Üretilen Nanolifli Yapıların Ortalama Kalınlıkları

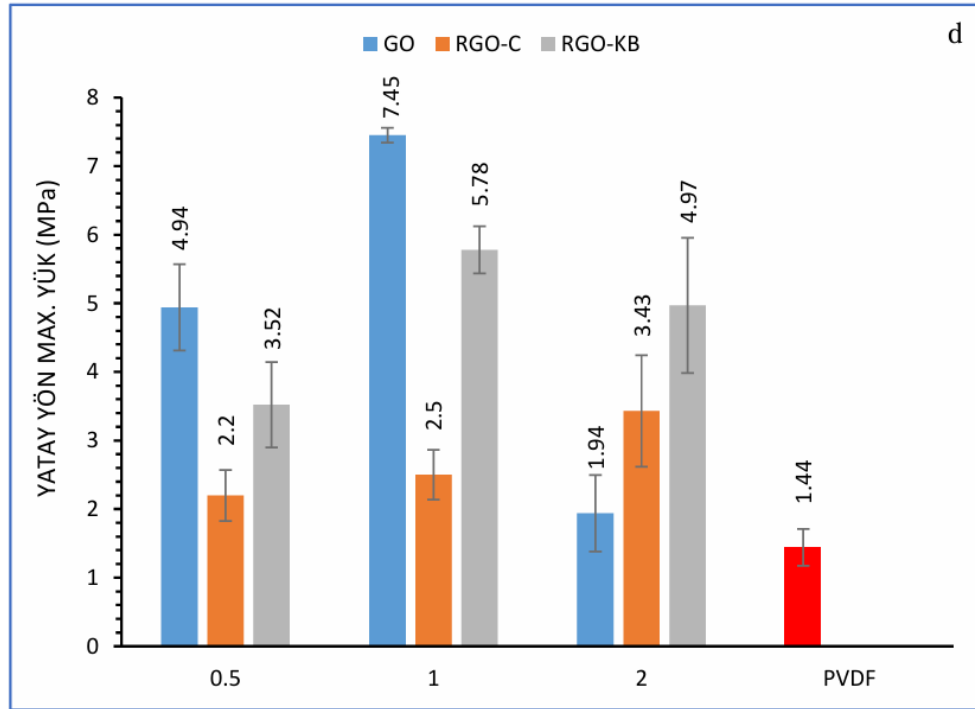
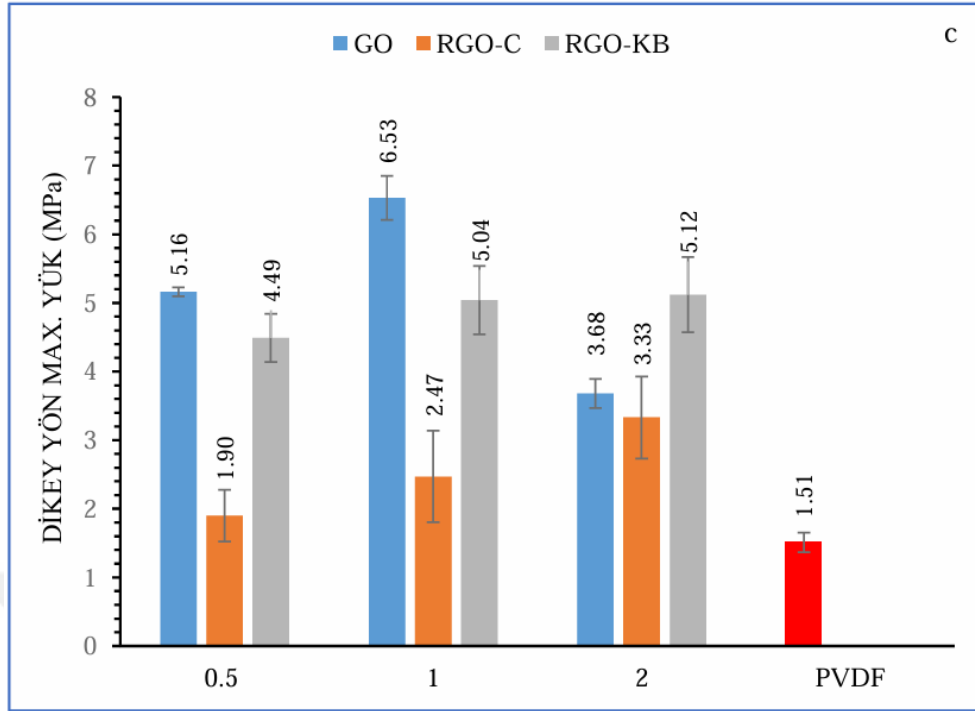
Numune	Nanolif Kalınlık Ortalaması (mm)
05C-RGO	0.2
05KB-RGO	0.198
1C-RGO	0.230
1KB-RGO	0.224
2C-RGO	0.2
2KB-RGO	0.183
NWRGO PVDF	0.21

1. üretim tekniği ile elde edilen yapıların ağırlık ortalamaları 1.448g, 2. üretim tekniği ile elde edilen yapıların ağırlık ortalamaları da 1.665g olarak bulunmuştur. Dokunmamış kumaşlar üzerinde nanolif eldesinden sonra numunelerin ağırlıkları 1. üretim tekniği için ortalama 2.88g, 2. üretim tekniği için 3.15g olmuştur.

3.5. Mukavemet Ölçüm Sonuçları

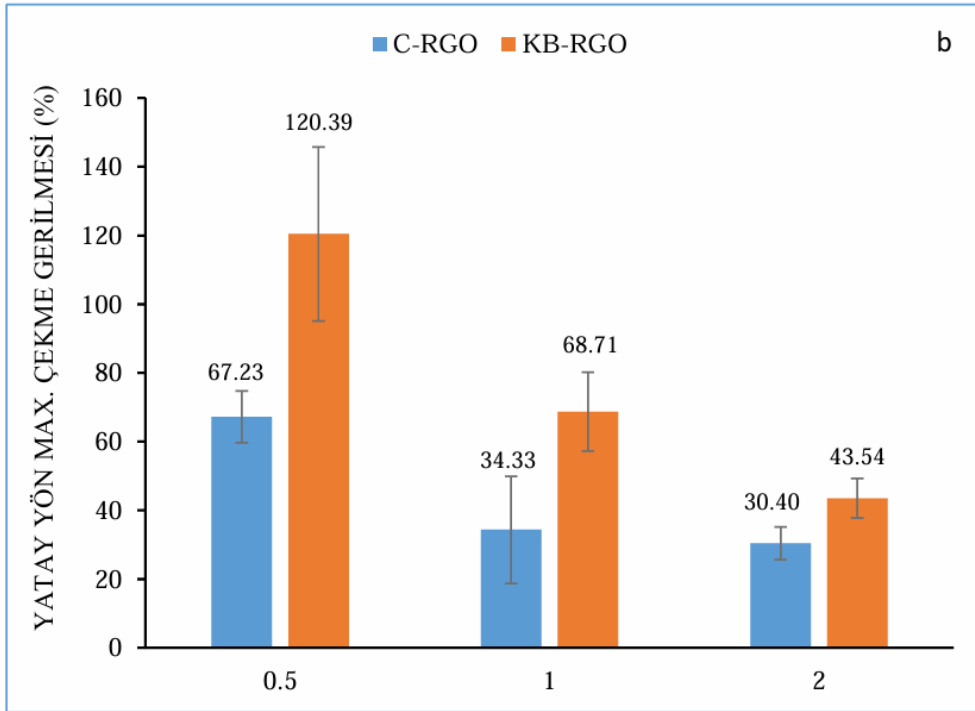
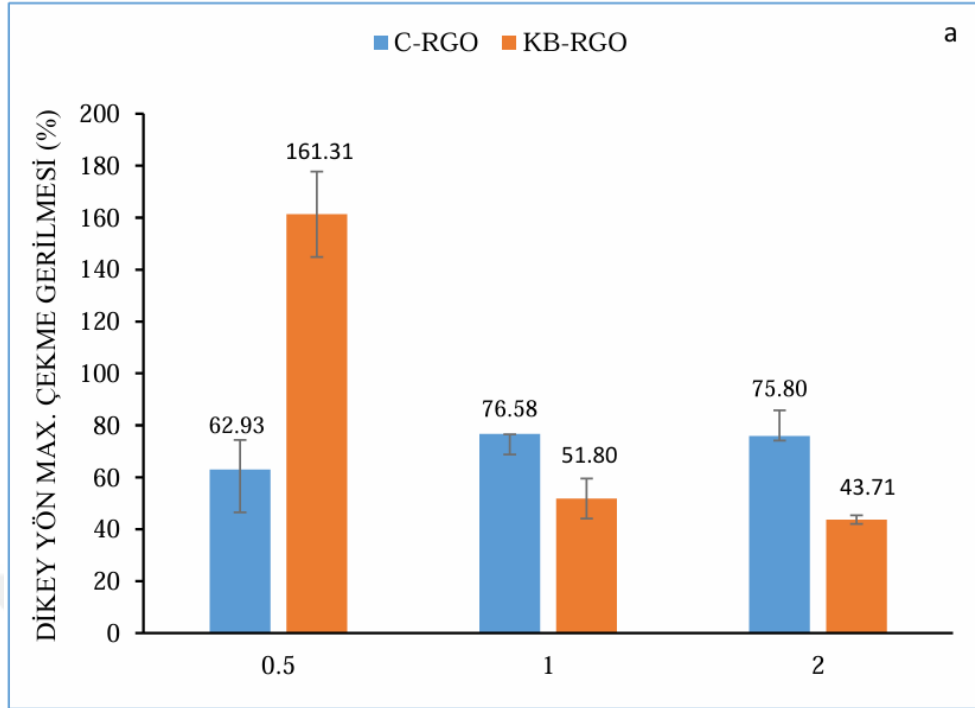
Saf PVDF'nin ve GO katkılı PVDF nanolif yüzeylerinin indirgenmesinden önceki ve sonraki mekanik performansı, çekme test cihazı kullanılarak analiz edildi ve sonuçlar Şekil 3.7'de sunuldu. Nanolif örneklerinin gerilme mukavemeti özellikleri, hem dikey yön (makine yönü) hem de yatay (çapraz) yön olmak üzere uzama ve çekme mukavemeti açısından değerlendirilmiştir. 1. üretim yöntemi için yapılan mukavemet sonuçlarında, saf PVDF nanoliflerinin uzama ve çekme mukavemeti, makine yönünde çapraz yöne göre daha yüksek elde edildi. Saf PVDF nanolifin makine ve çapraz yönlerde uzama ve çekme mukavemeti değerleri sırasıyla %107, 1.5MPa ve %92, 1.4MPa olarak elde edilmiştir. PVDF polimer çözeltisine ağırlıkça %0.5 oranında GO eklenmesiyle nanolifli yapının mekanik performansı belirgin bir şekilde arttı. GO katkı içeriği ağırlıkça %1'e yükseltildiğinde her iki yönde de en yüksek mekanik performans kaydedildi. Ağırlıkça %1 GO içeren nanolifin uzama ve gerilme mukavemeti, saf PVDF nanolif ile karşılaştırıldığında makine yönünde sırasıyla yaklaşık %107 ve %333 ve çapraz yönde %139 ve %436 arttı. Sonuçlar GO katkılı PVDF nanoliflerin mekanik özelliklerinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, ağırlıkça %2GO katkı içeriğine ulaşıldığında, nanolifin mekanik performansı, saf PVDF nanolife kıyasla her iki yöndeki çekme mukavemeti dışında azaldı. Bu nedenle, belirli miktarda GO katkı maddesi eklenmesinde nanoliflerin gerilebilirliği azalmadan, mukavemetinin arttığı sonucuna varılabilir.

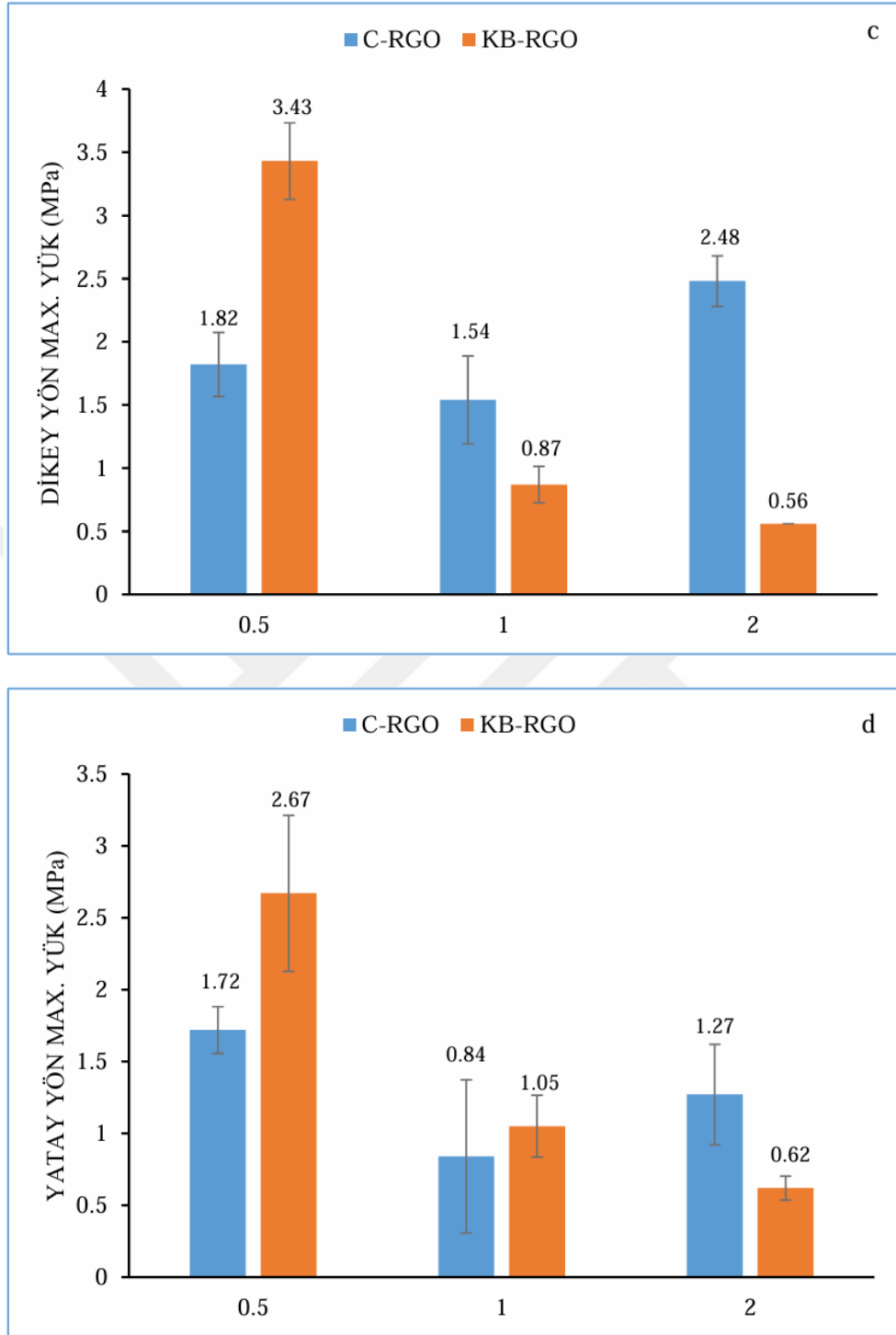




Şekil 3.7. Katkı İçeriğinin Bir Fonksiyonu Olarak PVDF Nanoliflerin Mekanik Özellikleri. Numunelerin Makine Yönünde (a ve c) ve Çapraz Yönde (b ve d) Uzama (%) ve Çekme Mukavemeti Değerleri.

GO katkılı PVDF nanoliflerinin, C Vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu olmak üzere iki farklı doğal bazlı indirgeme maddesi kullanılarak indirgenmesinden sonra, RGO katkılı PVDF nanoliflerinin mekanik performansı, GO katkılı PVDF nanoliflerine kıyasla azalmıştır. GO katkılı PVDF nano liflerinin C Vitamini sulu çözeltisiyle indirgenmesi, saf PVDF ve GO katkılı PVDF nano lifleriyle karşılaştırıldığında her iki yönde daha düşük uzama değerlerine yol açmıştır. C Vitamini ile indirgenmiş nanolif (RGO-C) örneklerinin uzama ve gerilme mukavemeti, GO katkı miktarının artmasıyla artmaktadır. En yüksek sonuçlar, her iki yönde C Vitamini ile indirgenmiş ağırlıkça %2GO katkılı PVDF nanolif numuneleriyle elde edildi. C Vitamini ile indirgenmiş nanolif numunelerin çekme mukavemeti, makine yönünde ve çapraz yönde sırasıyla 3.3MPa ve 3.4MPa olarak elde edildi; bu, saf PVDF nanoliflerden her iki yönde yaklaşık sırasıyla %120 ve %143 daha yüksek olduğunu göstermektedir. GO katkılı PVDF nanoliflerinin kuşburnu ekstraktı tozunun sulu çözeltisi ile indirgenmesi, C Vitamini ile indirgenmiş (RGO-C) numunelere kıyasla daha yüksek uzama ve gerilme mukavemeti değerleri ile sonuçlandı. Kuşburnu ekstraktı ile indirgenmiş (RGO-KB) nanoliflerin gerilme mukavemeti, GO katkı miktarının artması ile artmaktadır. En yüksek çekme mukavemeti, makine yönünde kuşburnu ekstraktı ile indirgenmiş ağırlıkça %2GO katkılı PVDF nanolif numunesinde 5.1MPa olarak elde edilmiştir. Öte yandan en yüksek çekme mukavemeti, kuşburnu ekstraktı ile çapraz yönde indirgenmiş ağırlıkça %1GO katkılı PVDF nanolif numunesinde 5.8MPa olarak elde edilmiştir. 2. üretim yöntemi için yapılan dikey ve yatay yönlerdeki uzama ve çekme mukavemet değerleri Şekil 3.8’de görülmektedir.





Şekil 3.8. Katkı İçeriğinin Bir Fonksiyonu Olarak PVDF Nanoliflerin Mekanik Özellikleri. Numunelerin Makine Yönünde (a ve c) ve Çapraz Yönde (b ve d) Uzama (%) ve Çekme Mukavemeti Değerleri.

RGO katkılı PVDF nanoliflerinin, C Vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu olmak üzere iki farklı doğal bazlı indirgeme maddesi kullanılarak indirgenmesinden sonra, RGO katkılı PVDF nanoliflerinin mekanik performansı, GO katkılı PVDF nanoliflerine kıyasla azalmıştır. C vitamini ile indirgenmiş, ağırlıkça %0.5RGO katkılı PVDF nanoliflerin (05C-RGO) dikey çekme gerilmeleri bir miktar azalırken, hem dikey hem de yatay yönde çekme mukavemetlerinde bir miktar artış gözlenmiştir. Kuşburnu toz ekstraktı ile indirgenmiş ve ağırlıkça % 0.5RGO katkılı PVDF nanoliflerin (05KB-RGO) ise dikey çekme gerilmeleri artarken, hem dikey hem de yatay yönde çekme mukavemetlerinde bir miktar azalma gözlenmiştir. Kuşburnu ile indirgenmiş %0.5 RGO katkısının yatay yöndeki çekme gerilmesindeki artış ise dikkat çekicidir. Kuşburnu toz ekstraktı ile indirgenmiş, ağırlıkça %1RGO katkılı PVDF nanoliflerin (1KB-RGO) hem yatay hem de dikey yöndeki çekme gerilmelerindeki ve çekme mukavemetlerindeki azalma dikkat çekici boyuttadır. Ancak C vitamini ile indirgenmiş %1RGO katkılı PVDF nanoliflerin (1C-RGO), yatay yöndeki çekme gerilmelerindeki ve çekme mukavemetlerindeki azalma dikkat çekici boyutta iken, dikey çekme gerilmesinde bir miktar artış görülmektedir. C vitamini ile indirgenmiş ağırlıkça %2RGO katkılı PVDF nanoliflerin (2C-RGO), yatay yöndeki çekme gerilmesi ve yatay çekme mukavemetinde oldukça fazla düşüş görülmektedir. Buna karşılık dikey çekme gerilmesi de bir miktar azalırken, dikey çekme mukavemeti bir miktar artmıştır. 2C-RGO kodlu numune dikey yönde 05C-RGO numunesi ile benzer özellik göstermiştir. Kuşburnu toz ekstraktı ile indirgenmiş ağırlıkça %2RGO katkılı PVDF nanolifin (2KB-RGO) ise, hem dikey hem de yatay yönlerdeki çekme gerilmeleri ve çekme mukavemetlerindeki azalma dikkat çekici boyuttadır. Rakle yöntemi için hazırlanan nanoliflerin değerlendirmelerinde de emdirme yöntemi için hazırlanan saf PVDF nanoliflerin ve indirgenmemiş numunelerin ölçüm sonuçları referans alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3.8 incelendiğinde, en yüksek çekme gerilme yüzdesinin dikey yönde (makine yönü) %161.31 ile 05KB-RGO numunesinde, yatay yönde (çapraz yön) de %120.39 ile 05KB-RGO numunesinde olduğu görülmektedir. En yüksek çekme mukavemeti makine yönünde, kuşburnu ekstraktı ile indirgenmiş ağırlıkça %0.5RGO katkılı PVDF nanolif (05KB-RGO) numunesinde 3.43MPa olarak elde edilmiştir. Öte yandan en yüksek çekme mukavemeti çapraz yönde, kuşburnu ekstraktı ile indirgenmiş ağırlıkça %0.5RGO katkılı PVDF nanolif numunesinde 2.673MPa olarak elde edilmiştir. Bu veriler ışığında, indirgeme

işleminin önce yapılması nanoliflerin gerilebilirliğini ve mukavemetini genel olarak düşürdüğü söylenebilir. Sadece kuşburnu ile indirgenmiş RGO katkılı numunede hem dikey hem de yatay yönde çekme gerilmesinde artış olmuştur.

Her iki üretim yönteminde de uzama ve çekme mukavemetleri için ortalama mukavemet değerleri, standart sapmaları ve %CV değerleri hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri hata çubuğu olarak Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'deki grafiklere eklenmiştir.

3.6. Elektriksel Direnç Ölçüm Sonuçları

Emdirme yöntemi ile GO uygulanmış poliester esaslı dokunmamış kumaşın ve GO kaplanmış dokunmamış kumaşların C Vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu kullanılarak indirgeme sonrasında elektriksel yüzey direnci ölçüldü. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.3'te verilmiştir. Poliester dokunmamış kumaşın elektriksel yüzey direnci, elektriksel yalıtım özelliğini gösteren $1.94E+06k\Omega$, olarak elde edilmiştir. Poliester dokunmamış kumaşın GO kaplaması elektriksel yüzey direnç değerini değiştirmedir. GO nano tabakaları, oksijenli fonksiyonel grupların varlığı nedeniyle elektriksel olarak yalıtıcı bir karakter sunar. Öte yandan, indirgenmiş numuneler nispeten daha düşük elektriksel direnç göstermektedir. GO kaplı poliester dokunmamış kumaşın kuşburnu ekstraktı tozu ile indirgenmesi elektriksel yüzey direncini $7.06E+03k\Omega$ 'ye düşürmüştür. Ayrıca en düşük değer $5.57E+02k\Omega$ ile C vitamini ile indirgenmiş GO kaplı dokunmamış kumaşta elde edilmiştir. GO'nun C vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu ile indirgenmesinin, elektriksel olarak yalıtkan GO'yu elektriksel olarak iletken RGO'ya dönüştürdüğü anlaşılmaktadır.

PVDF, GO, RGO-KB ve RGO-C nanoliflerinin elektriksel direnci $1.70E+06k\Omega$ olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, katkı maddesi içeriğinin ve indirgeyici maddenin değişmesiyle herhangi bir değişiklik göstermemektedir.

Tablo 3.3. Dokunmamış Yüzey Elektriksel Direnç Ölçümleri (Emdirme Yöntemi)

NUMUNE	NW YÜZEY ELEKTRİKSEL DİRENÇ (KΩ)
NW	1.94E+06
NW-D-GO	1.70E+06
NW-RGO-KB	7.06E+03
NW-RGO-C	5.57E+02

Tablo 3.4. Nanoliflerin Elektriksel Direnç Ölçüm Sonuçları

NUMUNE	NL YÜZEY ELEKTRİKSEL DİRENÇ (KΩ)
05C-RGO	1.9×10^6
05KB-RGO	2.2×10^6
1C-RGO	1.73×10^6
1KB-RGO	1.69×10^6
2C-RGO	2.1×10^6
2KB-RGO	2.6×10^6
NW-RGO-PVDF	1.72×10^6

Tablo 3.4'te katkısız PVDF ve RGO katkılı PVDF nanoliflerin elektiksel direnç ölçüm sonuçları görülmektedir. NWRGO-PVDF kodlu katkısız PVDF nanolif yüzeyin elektriksel direnci $1.72 \times 10^6 \text{ k}\Omega$ olarak elde edilmiştir. Değere bakılarak bu yüzeyin iletken özellik göstermediği söylenebilir. Değerler incelendiğinde RGO katkı yüzdesinin nanolifin iletkenliğinde kayda değer bir değişime sebep olmadığı görülmektedir.

Tablo 3.5. Dokunmamış Yüzey Elektriksel Direnç Ölçümleri (Rakle Yöntemi)

NUMUNE	NW YÜZEY ELEKTRİKSEL DİRENÇ (KΩ)
NW-05C-RGO	139.2
NW-05KB-RGO	3.3
NW-1C-RGO	1.78
NW-1KB-RGO	147.19
NW-2C-RGO	20.3
NW-2KB-RGO	26.6
NW-R-GO	4.90×10^4

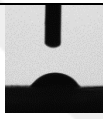
2. üretim tekniği için rakle ile kaplanmış dokunmamış kumaşların elektriksel direnç ölçüm sonuçları Tablo 3.5’te verilmiştir. Tablo 3.5 incelendiğinde, GO kaplanmış fakat indirgenmemiş dokunmamış PES kumaşın elektriksel direnç değerinin $4.90 \times 10^4 \text{ k}\Omega$ olduğu görülmüştür. Bu değer oldukça yüksek bir elektriksel dirence sahiptir ve numune iletken değildir. NW-1C-RGO numunesinin elektriksel direnci $1.78 \text{ k}\Omega$ ’dur. Bu değere bakılarak numunenin en iletken olduğu söylenebilir. Rakle ile kaplanmış ve indirgenmiş numunelerin hepsi iletkenlik kazanmıştır. En iletken özellik NW-1C-RGO ve NW-05KB-RGO kodlu numunelerde gözlenirken, indirgeme maddesinden C vitaminin kumaşta daha fazla iletkenlik sağladığı düşünülebilir.

3.7. Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları

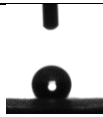
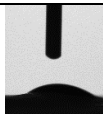
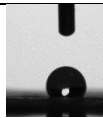
Su temas açısı ölçümleri tez çalışmasında belirlenen her iki teknik için tüm numunelere ayrı ayrı yapılmıştır. Nanolifli yüzeylerin temas açıları, sırasıyla ağırlıkça %0.5 GO, %1 GO ve %2 GO katkılı olmak üzere Tablo 3.6, Tablo 3.7 ve Tablo 3.8’de karşılık gelen damlacık görüntüleri ile birlikte verildi. GO Katkısız PVDF nanolifin su temas açısı, ölçüm sonucunda 121.1° olarak bulunmuştur. Saf PVDF nanoliflerinin su temas açısının 90° ’den yüksek olması nedeniyle hidrofobik olduğu anlaşılmaktadır. Nanolifli yapıya az

miktarda GO eklenmesiyle su temas açısında bir miktar artış görülmektedir. PVDF polimer matrisindeki GO konsantrasyonundaki artışın nano liflerin su temas açısı üzerinde hiçbir etkisi yoktur. En yüksek su temas açısı ağırlıkça %0.5 GO katkılı PVDF nanolifte 129.8° olarak elde edilmiştir. GO içeriğinin artmasıyla nanoliflerin su temas açısı değerleri düşme eğilimi gösterse de elde edilen değerler hala hidrofobikliği göstermektedir. GO katkılı PVDF nanoliflerinin C Vitamini (RGO-C) ile indirgenmesi hidrofobikliği korumuştur. Aksine, RGO-KB numunelerinin suyla temas açısı dikkat çekici bir şekilde azalarak hidrofilikliği gösteren 90°'nin altındaki değerlere ulaşmıştır.

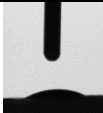
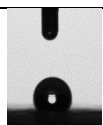
Tablo 3.6. Elektro çekim Sonrası İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri - Ağırlıkça %0.5 GO katkılı PVDF nanolif

Numune	Temas açısı (NL) (°)	Damlacık Görüntüsü
05GO	129.8	
05RGO-KB	61.2	
05RGO-C	124.2	

Tablo 3.7. Elektro çekim Sonrası İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri - Ağırlıkça %1 GO katkılı PVDF nanolif

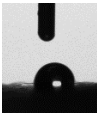
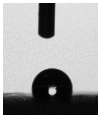
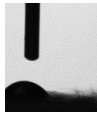
Numune	Temas açısı (NL) (°)	Damlacık Görüntüsü
1GO	128.8	
1RGO-KB	28.2	
1RGO-C	124.5	

Tablo 3.8. Elektro Çekim Sonrası İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri - Ağırlıkça %2 GO katkılı PVDF Nanolif

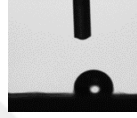
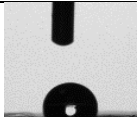
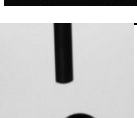
Numune	Temas açısı (NL) (°)	Damlacık Görüntüsü
2GO	103.71	
2RGO-KB	26.82	
2RGO-C	101.41	

GO ve RGO kaplamalı dokunmamış kumaş numunelerinin su temas açısı sonuçları ve karşılık gelen damlacık görüntüleri Tablo3.9’da verilmiştir. Tüm dokunmamış kumaşlar aynı şekilde uygulandığında (emdirme yöntemi ile), tüm GO kaplamalı dokunmamış kumaşlar için referans ölçüm olarak bir ölçüm alınmıştır. Poliester dokunmamış kumaşın su temas açısı 108.6° olarak ölçülmüştür. Dokunmamış yüzeylerin su temas açısı değerleri incelendiğinde GO kaplamalı dokunmamış kumaşın su temas açısının 90° olması nedeniyle hidrofobik kabul edilebileceği görülmektedir. Ancak GO kaplı dokunmamış kumaşın su temas açısında katkısız dokunmamış kumaşla karşılaştırıldığında hafif bir azalma elde edildiği görülmektedir. C vitamini ile yapılan indirgeme sonrasında su temas açısı 94° değerine çıkmıştır. Bununla birlikte kuşburnu ekstraktı tozu kullanılarak indirgenmiş numunenin su temas açısı önemli ölçüde azalmış ve numunenin yüzeyi hidrofilik hale gelmiştir. Kuşburnu toz ekstraktı ile indirgemek hem nanolifli yüzeyler de hem de dokunmamış kumaş yüzeylerin de hidrofillik sağlamıştır.

Tablo 3.9. GO ve RGO Kaplamalı Dokunmamış Kumaş Su Temas Açısı Sonuçları (°) ve Damlacık Görüntüleri (emdirme yöntemi)

SU TEMAS AÇISI (°) VE DAMLACIK GÖRÜNTÜLERİ			
NW	NW-D-GO	NW-RGO-C	NW-RGO-KB
108.6 	90.6 	94.1 	48.1 

Tablo 3.10. GO ve RGO Kaplamalı Dokunmamış Kumaş Su Temas Açısı Sonuçları (°) ve Damlacık Görüntüleri (rakle yöntemi)

Numune	Temas açısı (NW) (°)	Damlacık Görüntüsü
NW	108.6	
NW-R-GO	53.63	
NW-C-RGO	88.73	
NW-KB-RGO	68.47	

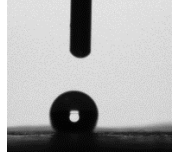
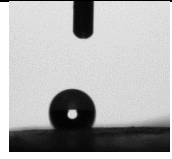
GO ve RGO kaplamalı dokunmamış kumaş numunelerinin su temas açısı sonuçları ve karşılık gelen damlacık görüntüleri Tablo 3.10’da verilmiştir. Tüm dokunmamış kumaşlar aynı şekilde kaplandığından (rakle yöntemi ile), tüm GO kaplamalı dokunmamış kumaşlar için referans ölçüm olarak bir ölçüm alınmıştır. Poliester dokunmamış kumaşın su temas açısı 108.6° olarak ölçülmüştür. Dokunmamış yüzeylerin su temas açısı değerleri incelendiğinde GO kaplamalı dokunmamış kumaşın su temas açısının 90°’nin altında olması nedeniyle hidrofil kabul edilebileceği görülmektedir. Ancak GO kaplı dokunmamış kumaşın su temas açısında katkısız dokunmamış kumaşla

karşılaştırıldığında emdirme yöntemindeki gibi hafif bir azalma değil yarı yarıya bir azalma olduğu görülmektedir. C vitamini ile yapılan indirgeme sonrasında su temas açısı 88.73° değerine çıkmıştır. Bununla birlikte kuşburnu ekstraktı tozu kullanılarak indirgenmiş numunenin su temas açısı C vitamini ile indirgemeye göre azalmış ve numunenin yüzeyi hidrofilik hale gelmiştir. Kuşburnu toz ekstraktı ile indirgemek hem emdirme yöntemi uygulanmış dokunmamış yüzeylerde hem de rakle ile kaplanmış dokunmamış kumaş yüzeylerinde hidrofillik sağlamıştır. Rakle yöntemi, emdirme yönteminden farklı olarak, dokunmamış kumaşa hidrofillik sağlamıştır.

Emdirme yönteminde ise kumaşın hidrofobluğunu koruduğu Tablo 3.6'da görülmektedir.

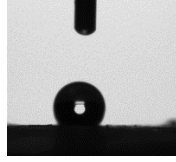
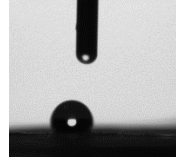
2. üretim tekniği rakle yöntemi için hazırlanan RGO katkılı nanolifli yüzeylerin temas açıları, sırasıyla ağırlıkça %0.5RGO, %1RGO ve %2RGO katkılı olmak üzere Tablo 3.11, Tablo 3.12 ve Tablo 3.13'de karşılık gelen damlacık görüntüleri ile birlikte verilmiştir.

Tablo 3.11. Elektro Çekim Öncesi İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri (Ağırlıkça %0.5 GO katkılı PVDF nanolif).

Numune	Temas açısı (NL) ($^{\circ}$)	Damlacık Görüntüsü
05C-RGO	121.98	
05KB-RGO	118.82	

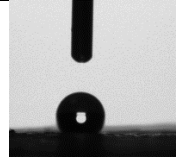
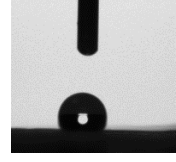
GO Katkısız PVDF nanolifin su temas açısı, ölçüm sonucunda 121.1° olarak bulunmuştur. C vitamini ile indirgenmiş ağırlıkça % 0.5 RGO katkısının, PVDF nanolifli yüzeyin su temas açısında bir değişiklik yapmazken, kuşburnu toz ekstraktı ile indirgenmiş ağırlıkça %0.5 RGO katkısı, PVDF nanolifli yüzeyin su temas açısında ufak bir düşüşe sebep olmuştur. Buna rağmen RGO katkılı PVDF nanolifli yüzeylerin indirgeme maddesi fark etmeksizin hidrofobik yapıda olduğu Tablo3.11'de görülmektedir.

Tablo 3.12. Elektro çekim Öncesi İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri (Ağırlıkça %1 GO katkılı PVDF nanolif).

Numune	Temas açısı (NL) (°)	Damlacık Görüntüsü
1C-RGO	122.06	
1KB-RGO	91.08	

Tablo3.12’de ağırlıkça %1 RGO katkısının PVDF nanolifli yüzeyin su temas açısına etkileri görülmektedir. C vitamini ile indirgenmiş %0.5RGO katkısında olduğu gibi %1 RGO katkısının da PVDF nanolifli yüzeyin su temas açısında bir değişiklik yapmamıştır. Ancak, kuşburnu ile indirgenmiş ağırlıkça %1RGO katkısı nanolifli yüzeyin hidrofobluğunu, %0.5RGO katkısından daha fazla düşürmüştür.

Tablo 3.13. Elektro çekim Öncesi İndirgenmiş Nanoliflerin Su Temas Açısı Ölçüm Sonuçları ve Damlacık Görüntüleri (Ağırlıkça %2 GO katkılı PVDF nanolif).

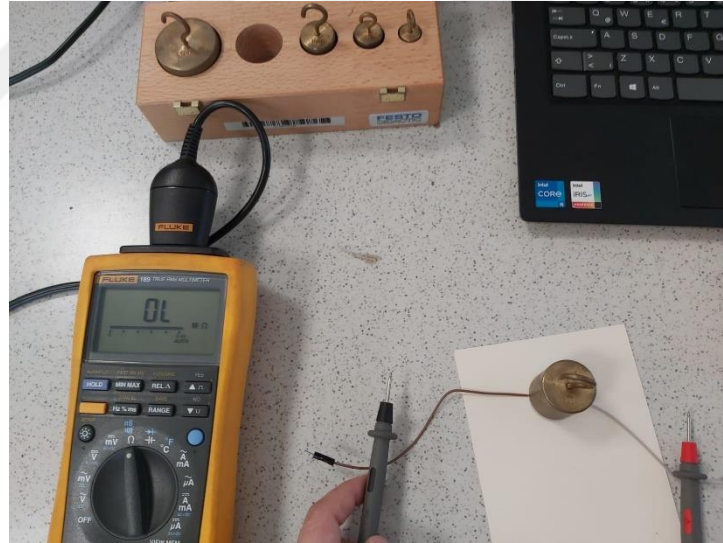
Numune	Temas açısı (NL) (°)	Damlacık Görüntüsü
2C-RGO	121.01	
2KB-RGO	110.95	

Tablo 3.13’te C vitamini ve kuşburnu toz ekstraktı ile indirgenmiş, ağırlıkça %2RGO katkılı PVDF nanolifin su temas açılarının ölçüm sonuçları ve damlacık görüntüleri verilmiştir. %2RGO katkısı, katkısız PVDF nanolifin su temas açısını çok fazla değiştirmemiştir. Nanolifli yapı %2RGO katkısında da hidrofobluğunu korumuştur.

Kuşburnu toz ekstarktı ile indirmek emdirme yöntemindeki kadar dikkat çekici boyutta olmasa da bir miktar düşüşe sebep olmuştur.

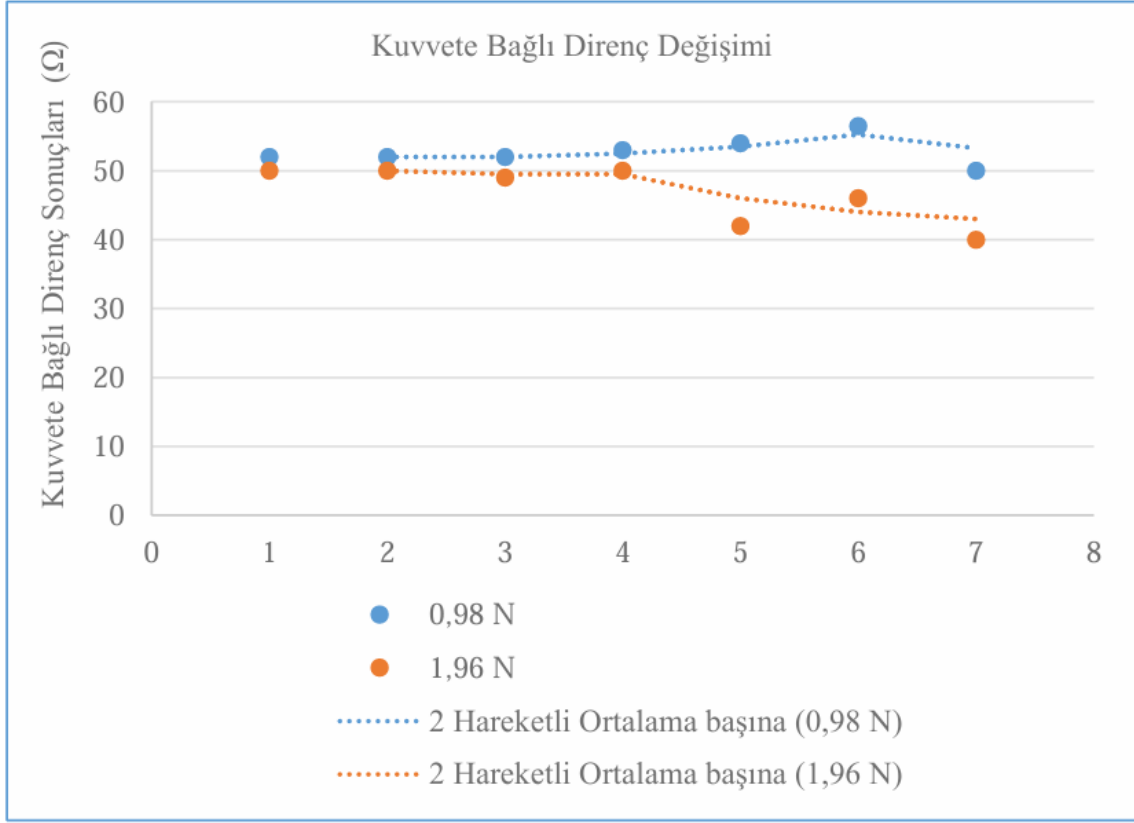
3.8. Sensör Ölçüm Sonuçları

Üretilen numunelerin piezo elektrik özelliklerinin analizi için gerilim ve direnç değişimleri ölçülmüştür. Basınç sensörü olarak kullanılması amaçlanan üretim numunelerinden 1 Türk Lirası büyüklüğünde yaklaşık yüzey alanı 15cm² olan (ortalama çapı 2.2cm.) numuneler kesilerek hazırlanan parçalardan Fluke marka Multimetre ile direnç değişimlerinin alınması amaçlanmıştır. Hazırlanan her numuneye 100g (0.98 Newton) ve 200 g (1.96Newton) ağırlığında kütle ağırlıklar konularak kuvvet uygulanmış ve ölçümler alınmıştır. Test için hazırlanan kumaş parçalarının altına ve üstüne düz şerit bakır iletken teller konularak multimetrenin prop uçları ile temas ettirilip, direnç değerleri dijital olarak okunarak kaydedilmiş, ölçüm işlemi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Kuvvet Uygulanmış Numunelerin Multimetre ile Direnç Ölçümleri

Ölçümler, hem emdirme hem de rakle yöntemi ile üretilmiş numuneler için tekrarlanmıştır. Emdirme yöntemi ile elde edilmiş numunelerin kuvvete bağlı direnç değişimi grafik olarak Şekil 3.10’da gösterilmektedir. En büyük direnç değişimi 2GO-KB ve 2GO-C kodlu numunelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.10. Birinci Üretim Tekniği ile Üretilmiş Numunelerin Kuvvete Bağlı Direnç Değişimi

Şekil 3.10'da verilen grafiğin x eksenini numaralandırmasına karşılık gelen numune kodları Tablo 3.14'te verilmiştir.

Tablo 3.14. Şekil 3.10 x Eksenini Kumaş Kodları Numaralandırması

1	2	3	4	5	6	7
05GO-KB	05GO-C	1GO-KB	1GO-C	2GO-KB	2GO-C	PVDF

Şekil 3.10 incelendiğinde en yüksek direnç değerinin yaklaşık 1N kuvvet uygulanmış 2GO-C kodlu numunede elde edildiği görülmektedir. Uygulanan kuvvet 1N'dan 2N'a çıkarıldığında dirençte azalma olduğu görülmektedir. En büyük direnç değişimi 2GO-KB ve 2GO-C numunesinde görülmektedir. Ohm Yasasına göre, direnç (R) ile akım (I) ters orantılıdır. Ohm Yasasının matematiksel eşitliği, eşitlik 3'te verilmiştir.

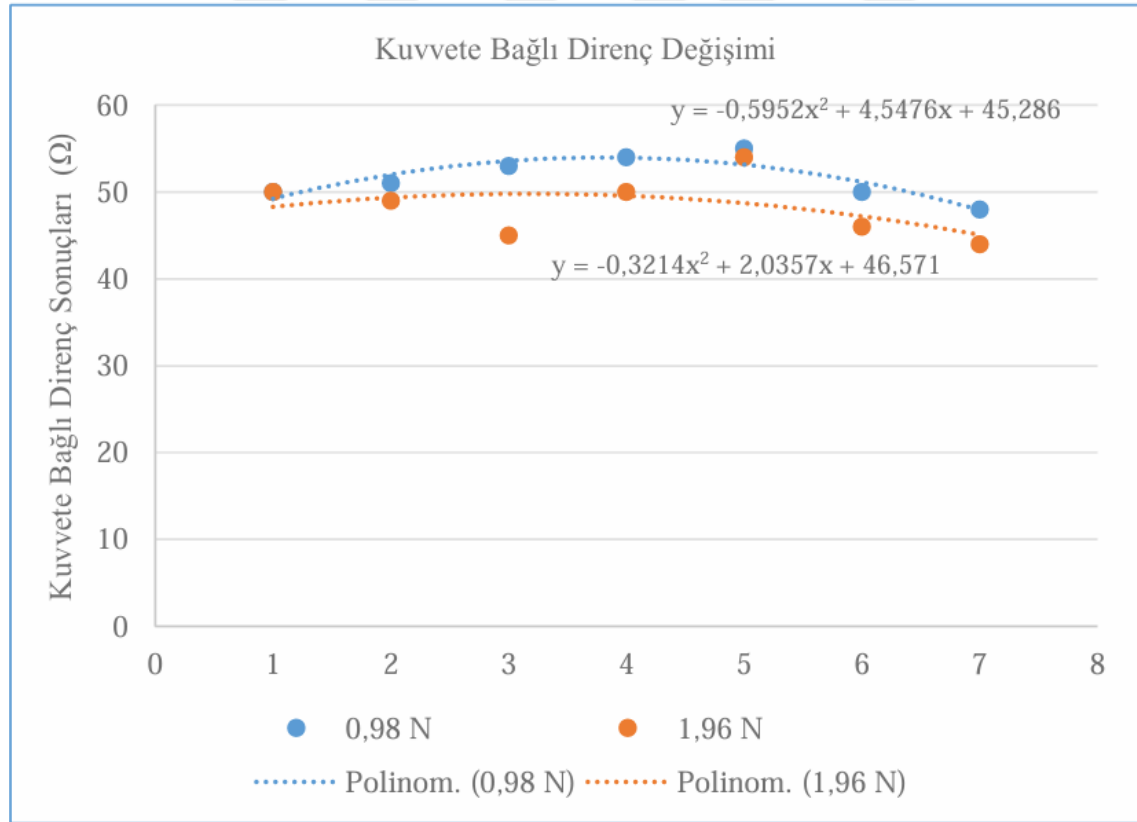
$$V = I \cdot R \quad (3)$$

Dolayısıyla direnç azaldığında akım artmaktadır. Bir başka ifade ile; uygulanan kuvvet, basıncı ve akımı arttırmaktadır. Akım sabit tutulduğunda da yüksek direnç, yüksek voltaj sonucunu çıkaracaktır. Elde edilen veriler ışığında üretilen numunelerin basınç sensörü olarak kullanılacak veriyi sağladığı görülmektedir.

Her iki kuvvet uygulamasında da en düşük direnç değeri, Şekil 3.10 incelendiğinde GO katkısız PVDF nanolif ile kaplanmış dokunmamış kumaştan elde edilmiştir. Buradan GO katkısının direnç değerini de bir miktar arttırdığı sonucu çıkmaktadır. Nanolifli yüzeyde GO katkısı olmasa bile ölçüm alınan nanolifli yüzeyin altında GO ile emdirme yöntemi uygulanmış dokunmamış bir kumaş bulunmaktadır. Kumaşlar elektro çekim sonrası indirgenmiştir.

Grafik düzenlenirken eğri uydurma çizgisi, excelde iki hareketli ortalama başına olacak şekilde grafiğe eklenmiştir.

İkinci üretim tekniği ile üretilmiş numunelerin kuvvete bağlı direnç değişimi grafik olarak Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. İkinci Üretim Tekniği ile Üretilmiş Numunelerin Kuvvete Bağlı Direnç Değişimi

Şekil 3.11’de verilen grafiğin x eksenini numaralandırmasına karşılık gelen numune kodları Tablo 3.15’te verilmiştir.

Tablo 3.15. Şekil 3.11 x Eksenini Kumaş Kodları Numaralandırması

1	2	3	4	5	6	7
05KB-RGO	05C-RGO	1KB-RGO	1C-RGO	2KB-RGO	2C-RGO	PVDF

Şekil 3.11 incelendiğinde en yüksek direnç değerinin yaklaşık 1N kuvvet uygulanmış 2KB-RGO kodlu numunede elde edildiği görülmektedir. Uygulanan kuvvet 1N’dan 2N’a çıkarıldığında dirençte azalma olduğu bu uygulama yöntemi için de geçerli görülmektedir. Elde edilen veriler ışığında üretilen numunelerin basınç sensörü olarak kullanılacak veriyi sağladığı görülmektedir. Her iki kuvvet uygulamasında da en düşük direnç değeri, Şekil 3.11 incelendiğinde GO katkısız PVDF nanolif ile kaplanmış dokunmamış kumaştan elde edilmiştir. Buradan GO katkısının direnç değerini de bir miktar arttırdığı sonucu çıkmaktadır. En büyük direnç değişimi 1KB-RGO kodlu kumaşta olmuştur. Nanolifli yüzeyde GO katkısı olmasa bile ölçüm alınan nanolifli yüzeyin altında GO ile rakle kaplanmış dokunmamış bir kumaş bulunmaktadır. Kumaşlar elektro çekim öncesinde indirgenmiştir. Grafik düzenlenirken eğri uydurma çizgisi, excelde polinom olacak şekilde biçimlendirilmiş ve grafik üzerinde denklemi de görülmektedir. Piezoelektrik tarafından üretilen güç değerlerini bulabilmek için akım (I), gerilim (V) ve direnç (R) değerlerinden en az ikisi bilinmelidir. Piezoelektrik özellik gösteren bir polimer bir malzemeye DC voltaj uygulanırsa malzeme, uygulanan voltajın miktarı ile birlikte inceler, uzar veya genişler. Tam tersi durumda ise; bir başka ifade ile piezoelektrik özellik gösteren polimer bir malzemeye mekanik bir kuvvet uygulandığında ki bu sıkıştırma, esnetme ya da germe şeklinde olabilir. Uygulanacak kuvvetin büyüklüğü ile orantılı olacak şekilde voltaj üretimi gerçekleştirir. Polimerik malzemeler, mekanik kuvvet ve darbe karşısında yüksek direnç gösterirler. Polimerlerin voltaj katsayıları seramiklere karşı daha yüksektirler. Bu sebeple seramiklere kıyasla daha iyi sensör olma özelliği gösterirler [237].

Piezoelektrik özelliklerin incelenmesi İstanbul Nişantaşı Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Laboratuvarında, üretilmiş numunelerin gerilim değerleri basit sensör

düzenegi yapılarak, Digital Avometre ile ölçülmüştür. Numune kumaşlara farklı kuvvetler uygulanmış ve farklı gerilim değerleri okunmuştur. Düzenek için direnç değeri 50Ω seçilmiştir. 1.üretim tekniği için üretilmiş numunelerin okunan gerilim değerleri Tablo 3.16’da verilmiştir.

Tablo 3.16. Numunelerin Kuvvet Karşısında Okunan Gerilim Değerleri (1.üretim numuneleri)

Numune	Gerilim (mV)	Kuvvet (N)	Direnç (ohm)
O5GO-KB	1.15	2	50
05GO-C	1.17		
1GO-KB	1.25		
1GO-C	1.28		
2GO-KB	1.33		
2GO-C	1.36		
PVDF	0.78	1	
O5GO-KB	1.10		
05GO-C	1.15		
1GO-KB	1.23		
1GO-C	1.25		
2GO-KB	1.30		
2GO-C	1.33		
PVDF	0.70		

Tablo 3.16 incelendiğinde en yüksek gerilim değerinin sırası ile 2GO-C ve 2GO-KB numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Artan kuvvet ile birlikte artan basınç, artan voltaj etkisi yaratmakta ve bize piezo etkisini göstermektedir. Aynı zamanda grafen oksit katkısının da gerilimi arttırdığı gözlenmektedir. Piezo özellik gösteren numune tarafından üretilen güç değerleri ise; güç formülü ile hesaplanabilir. Güç formülünün matematiksel eşitliği, eşitlik 4’te verilmiştir.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

Eşitlikte P gücü ifade eder ve birimi Watt’tır. Gerilim ve direnç değerleri eşitlikte yerine konulunca, Tablo 3.17’deki ve Tablo 3.19’daki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3.17. Elde Edilen Gerilime Karşı Güç Sonuçları (1.üretim numuneleri)

Numune	Gerilim (mV)	Güç (μ W)
O5GO-KB	1.15	0.0265
05GO-C	1.17	0.0274
1GO-KB	1.25	0.0313
1GO-C	1.28	0.0328
2GO-KB	1.33	0.0354
2GO-C	1.36	0.0370
PVDF	0.78	0.0122
O5GO-KB	1.10	0.0242
05GO-C	1.15	0.0265
1GO-KB	1.23	0.0303
1GO-C	1.25	0.0313
2GO-KB	1.30	0.0338
2GO-C	1.33	0.0354
PVDF	0.70	0.0098

Tablo 3.18. Numunelerin Kuvvet Karşısında Okunan Gerilim Değerleri (2.üretim numuneleri)

Numune	Gerilim (mV)	Kuvvet (N)	Direnç (ohm)
O5KB-RGO	1.25	2	50
05C-RGO	1.28		
1KB-RGO	1.33		
1C-RGO	1.36		
2KB-RGO	1.38		
2C-RGO	1.25		
PVDF	0.75		
O5KB-RGO	1.20	1	
05C-RGO	1.22		
1KB-RGO	1.30		
1C-RGO	1.35		
2KB-RGO	1.37		
2C-RGO	1.22		
PVDF	0.70		

Tablo 3.18 incelendiğinde en yüksek gerilim değerinin sırası ile 2KB-RGO, 1C-RGO ve 1KB-RGO numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Grafen oksit katkısının da gerilimi arttırdığı gözlenmektedir. Rakle yöntemi ile üretilmiş numunelerden, emdirme yöntemi ile üretilmiş numunelerden biraz daha yüksek voltaj değerleri ve doğrudan daha yüksek güç değerleri elde edilmiştir.

Tablo 3.19. Elde Edilen Gerilime Karşı Güç Sonuçları (2.üretim numuneleri)

Numune	Gerilim (mV)	Güç (μ W)
O5KB-RGO	1.25	0.0313
05C-RGO	1.28	0.0328
1KB-RGO	1.33	0.0354
1C-RGO	1.36	0.0370
2KB-RGO	1.38	0.0381
2C-RGO	1.25	0.0313
PVDF	0.75	0.0113
O5KB-RGO	1.20	0.0288
05C-RGO	1.22	0.0298
1KB-RGO	1.30	0.0338
1C-RGO	1.35	0.0365
2KB-RGO	1.37	0.0375
2C-RGO	1.22	0.0298
PVDF	0.70	0.0098

Numunelere uygulanan kuvvet sayesinde bir gerilim değeri elde edilmiştir. Enerji kaynağına ihtiyaç duymadan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir başka ifade ile piezoelektrik özellik gösteren, iletken, tekstil tabanlı, dokunmamış kumaş ve nanolifli yapıdan oluşan kompozit bir yapı geliştirilmiştir. Geliştirilen kumaşın, basınç sensörü olarak kullanılabileceği ve geliştirilebileceği düşünülmektedir.

BÖLÜM IV

4. SONUÇLAR

Çalışmanın birinci üretim tekniğinde emdirme yöntemi ile GO uygulanmış filament esaslı dokunmamış kumaş, ikinci üretim tekniğinde ise rakle kaplama yöntemi ile RGO kaplanmış filament esaslı dokunmamış %100 PES kumaş, elektro çekim GO katkılı PVDF, RGO katkılı PVDF ve katkısız PVDF nanoliflerini üzerinde üretmek için toplayıcı olarak kullanıldı. Bu yöntemde, GO kaplama konsantrasyonu sabit kaldı ve PVDF polimer çözeltisine eklenen miktarlar değiştirildi. Ayrıca GO katkılı PVDF nanolifleri, C Vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu ile kimyasal indirgeme yoluyla elektro çekim sonrasında GO rakle kaplama dokunmamış kumaşlar ise elektro çekim işlemi öncesinde indirgendi. Farklı miktarlarda GO içeren elektro çekim PVDF nanolifleri FTIR, XRD ve SEM ile karakterize edildi. Numunelerin mekanik özellikleri, elektriksel yüzey direnci, su temas açısı ve direnç değişimleri ölçülünerek değerlendirildi.

- FTIR ve XRD sonuçları GO eklenmesiyle β fazında bir artış olduğunu ortaya koydu. GO katkılı PVDF nanoliflerin indirgenmesinden sonra kristalin β fazı, saf PVDF nanoliflerden daha yüksek elde edildi.
- SEM görüntülerinden elde edilen morfolojik çalışma, hem GO nano tabakalarının poliester elyaflar arasında emdirmeli kaplamasını hem de tekdüze yapılara sahip PVDF nanoliflerin oluşumunu doğruladı.
- Saf PVDF nanoliflerinin çapının $230 \pm 26\text{nm}$ olarak elde edildiği görülmektedir. Aynı zamanda ağırlıkça %1GO katkılı PVDF nanolifleri $251 \pm 21\text{nm}$ olarak elde edildi. Ancak C vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu ile yapılan indirgeme işleminden sonra nanoliflerin çapında dikkate değer bir azalma görülmüştür.
- 1. üretim tekniğinde nanolifli yapıların kalınlık ortalamaları 0.1889mm , aynı zamanda elde edilen yapıların ağırlık ortalamaları 1.448g olarak bulunmuştur. Dokunmamış kumaşlar üzerinde nanolif eldesinden sonra numunelerin ağırlıkları 1. üretim tekniği için ortalama 2.88g olmuştur.
- 2. üretim tekniğinde de nanolifli yapıların kalınlık ortalamaları 0.1982mm , aynı zamanda elde edilen yapıların ağırlık ortalamaları da 1.665g olarak bulunmuştur.

Dokunmamış kumaşlar üzerinde nanolif eldesinden sonra numunelerin ağırlıkları 2. üretim tekniği için ortalama 3.15g bulunmuştur.

- Elektro çekim nanoliflerin çekme mukavemeti açısından mekanik performansı, her iki yönde de en yüksek ağırlıkça %1GO katkılı numunede elde edildi. Çekme mukavemeti ve uzama sonuçları, saf PVDF nanoliflerine kıyasla farklı miktarlarda GO eklenmesi ve kimyasal indirgeme işleminin uygulanmasıyla mekanik özelliklerin arttığını ortaya çıkardı.
- Ağırlıkça %1GO içeren nanolifin uzama ve gerilme mukavemeti, saf PVDF nanolif ile karşılaştırıldığında makine yönünde sırasıyla yaklaşık %107 ve %333 ve çapraz yönde %139 ve %436 arttı.
- C Vitamini ile indirgenmiş nanolif numunelerin çekme mukavemeti, makine yönünde ve çapraz yönde sırasıyla 3.3MPa ve 3.4MPa olarak elde edildi; bu, saf PVDF nanoliflerden her iki yönde yaklaşık sırasıyla %120 ve %143 daha yüksek olduğunu göstermektedir.
- En yüksek çekme mukavemeti, makine yönünde kuşburnu ekstraktı ile indirgenmiş ağırlıkça %2GO katkılı PVDF nanolif numunesinde 5.1MPa olarak elde edilmiştir. Çapraz yönde ise en yüksek çekme mukavemeti, kuşburnu ekstraktı ile indirgenmiş ağırlıkça %1GO katkılı PVDF nanolif numunesinde 5.8MPa olarak elde edilmiştir.
- İndirgenmiş GO kaplı dokunmamış kumaşın yüzey elektriksel direnci, NW-RGO-K ve NW-RGO-C numuneleri için sırasıyla $7.06E+03$ k Ω ve $5.57E+02$ k Ω indirgenmiş GO kaplı dokunmamış kumaşta elde edildi. GO'nun C vitamini ve kuşburnu ekstraktı tozu ile indirgenmesinin, elektriksel olarak yalıtkan GO'yu elektriksel olarak iletken RGO'ya dönüştürdüğü anlaşılmaktadır.
- NWRGO-PVDF kodlu katkısız PVDF nanolif yüzeyin elektriksel direnci 1.72×10^6 k Ω olarak elde edilmiştir. Değere bakılarak yüzeyin iletken özellik göstermediği söylenebilir.
- GO kaplanmış fakat indirgenmemiş dokunmamış PES kumaşın elektriksel direnç değerinin 4.90×10^4 k Ω olduğu görülmüştür. Değer bize kumaşın iletken olmadığını göstermektedir.

- NW-1C-RGO numunesinin elektriksel direnci $1.78k\Omega$ ' dur. Değer bize numunenin iletken olduğunu göstermektedir. Rakle ile kaplanmış ve indirgenmiş numunelerin hepsi iletkenlik kazanmıştır.
- En iletken özellik NW-1C-RGO ve NW-05KB-RGO kodlu numunelerde gözlenirken, indirgeme maddesinden C vitaminin kumaşta daha fazla iletkenlik sağladığı düşünülebilir.
- Poliester dokunmamış kumaşın GO kaplamasından sonra hidrofobikliğinde hafif bir azalma gözlemlendi. Saf PVDF nanolifin hidrofobik yapısı hem C Vitamini hem de kuşburnu ekstraktı tozu ile indirgendikten sonra azalır. Ancak kuşburnu ekstraktı tozuyla indirgeme sonrasında hem nanolifler hem de dokunmamış kumaş hidrofilik bir duruma dönüştüğü gözlenmiştir.
- En yüksek su temas açısı ağırlıkça %0.5 GO katkılı PVDF nanolifte 129.8° olarak 05GO numunesinde elde edilmiştir. GO içeriğinin artmasıyla nanoliflerin su temas açısı değerleri düşme eğilimi gösterse de elde edilen değerler hala hidrofobikliği göstermektedir.
- Kuşburnu ekstraktı tozu kullanılarak indirgenmiş numunenin su temas açısı önemli ölçüde azalmış ve numunenin yüzeyi hidrofilik hale gelmiştir.
- Rakle yöntemi için hazırlanmış 1C-RGO numunesinde su temas açısı en yüksek ölçülmüş olup, 122.06° ' dir.
- En yüksek direnç değerinin emdirme yöntemi ile üretilmiş ve yaklaşık 1N kuvvet uygulanmış 2GO-C ve 2GO-KB kodlu numunede elde edildiği, aynı zamanda kuvvete bağlı en fazla direnç değişiminin de bu numunelerde olduğu sonucuna varılmıştır. Uygulanan kuvvet 1N'dan 2N'a çıkarıldığında dirençte azalma olduğu görülmüştür. Direnç azaldığında akım artmaktadır. Uygulanan kuvvet, basıncı ve akımı arttırmaktadır. Akım sabit tutulduğunda da yüksek direnç, yüksek voltaj sonucunu çıkaracaktır.
- Rakle kaplama yöntemi ile üretilmiş numunelerde en yüksek direnç değeri 2KB-RGO kodlu numunede olmasına rağmen, en fazla direnç değişimi 1KB-RGO kodlu numune de elde edilmiştir.
- Basit sensör düzeneği ile Avometre kullanılarak yapılan ölçümlerde en yüksek gerilim değerinin sırası ile emdirme yöntemi uygulanmış numunelerden 2GO-C ve 2GO-KB numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Artan basınç artan voltaj

etkisi yaratmakta ve bize piezo etkisini göstermektedir. Aynı zamanda grafen oksit katkısının da gerilimi arttırdığı gözlenmiştir.

- Rakle ile kaplanmış numunelerden en yüksek gerilim değerinin sırası ile 2KB-RGO, 1C-RGO ve 1KB-RGO numunelerinde elde edildiği görülmektedir.
- Rakle yöntemi ile üretilmiş numunelerden, emdirme yöntemi ile üretilmiş numunelerden biraz daha yüksek voltaj değerleri ve doğrudan daha yüksek güç değerleri elde edilmiştir.
- Numunelere uygulanan kuvvet sayesinde bir gerilim değeri elde edilmiştir. Enerji kaynağına ihtiyaç duymadan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir başka ifade ile piezoelektrik özellik gösteren, iletken tekstil tabanlı bir kompozit yapı geliştirilmiştir.

Sensörler, akıllı tekstil alanının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Tekstil tabanlı sensörlerin geliştirilmesi esneklik, kolay adapte edilebilme başta olmak üzere pek çok avantaj sağlamaktadır. Başarılı bir sensör kumaş tasarımı ve gelişiminin; polimer bilimi, fizik, kimya, elektronik mühendisliği gibi multidisipliner çalışma sonucu ortaya çıkacağı bir gerçektir.

Gelecekte yapılması gereken çalışmalar arasında, numunelerin giriş ve çıkış voltaj değerlerinin değişimlerinin ölçülmesi, zamana göre değişimlerinin de analizi numunenin basınç sensörü olarak kullanılabileceği ve farklı kullanım alanlarına yönelik de literatür kaynağı sağlaması açısından yararlı görülmektedir.

Isıl değişimlere karşı voltaj ve direnç değişimlerinin ölçülmesi gelecekte yapılması önerilen çalışmalar arasında yer alabilir. Rakle kaplama, emdirmeye göre daha homojen kaplama sağladığından, rakle pasaj sayısı artırılarak çalışmalar yapılabilir.

Üretilen ürünler tekstil malzemesi olduğu için kuvvetin malzemeye tesir etme zamanına ihtiyaç duyacağından yola çıkarak, kuvvetlerin belli sürelerde malzeme üzerinde bekletilerek zamana bağlı oluşan direnç ve voltaj değişimleri de ileriki çalışmalarda yapılması hedeflenen çalışmalar arasındadır.

KAYNAKÇA

- [1] Skoda, M., Dudek, I., Jarosz, A., & Szukiewicz, D. (2014). Graphene: one material, many possibilities application difficulties in biological systems. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 190-190.
- [2] Trivedi, S., Lobo, K., & Matte, H. R. (2019). Synthesis, properties, and applications of graphene. In *Fundamentals and sensing applications of 2D materials* (pp. 25-90). Woodhead Publishing.
- [3] Gómez-Navarro, C., Meyer, J. C., Sundaram, R. S., Chuvilin, A., Kurasch, S., Burghard, M., ... & Kaiser, U. (2010). Atomic structure of reduced graphene oxide. *Nano letters*, 10(4), 1144-1148.
- [4] Pacile, D., Meyer, J. C., Rodríguez, A. F., Papagno, M., Gómez-Navarro, C., Sundaram, R. S., ... & Kaiser, U. (2011). Electronic properties and atomic structure of graphene oxide membranes. *Carbon*, 49(3), 966-972.
- [5] Zhan, D., Yan, J., Lai, L., Ni, Z., Liu, L., & Shen, Z. (2012). Engineering the electronic structure of graphene. *Advanced Materials*, 24(30), 4055-4069.
- [6] Zhen, Z., & Zhu, H. (2018). Structure and properties of graphene. In *Graphene* (pp. 1-12). Academic Press.
- [7] Zeng, W., & Wu, J. (2021). Open-shell graphene fragments. *Chem*, 7(2), 358-386.
- [8] Rani, P., Jhajharia, S. K., & Selvaraj, K. (2017). A redox-mediated 3D graphene based nanoscoop design for ultracapacitor applications. *New Journal of Chemistry*, 41(16), 8390-8398.
- [9] Şaşmaz, M. (2015). Grafen Katkılı Nanokompozit Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, Türkiye.
- [10] Saito, R.; Resselelaus, G. (2007). *Nanofibers and Nanotechnology in Textiles*, Edition.; Brown, P.J.; Stevens, K.; CRC Pres New York Washington, Cambridge
- [11] Sinnott, S.B.; Andrews, R. (2001). *Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications*, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 145–249.
- [12] Örs, A., (2009). Karbon Nanotüplerin Üretilmesi ve Gaz Algılama Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye

- [13] Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., Firsov, A.A., (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*
- [14] Biró, L.P., Nemes-Incze, P. ve Lambin, P., (2012). Graphene: Nanoscale Processing and Recent Applications, *Nanoscale*
- [15] Yıldırım, B., (2016). Polimer Esaslı Grafen Katkılı Yeni Nesil İletken Nanokompozit Malzemelerin Üretimi, Yapısal Özelliklerinin ve İletkenlik Karakteristiklerinin İncelenmesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye
- [16] Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., L. B. Alemany, W. Lu, Tour, J. M., (2010). Improved Synthesis of Graphene Oxide, *ACS Nano*, 4 (8) : 4806-4814.
- [17] Chua, C. K. ve Pumera, M., (2014) Chemical reduction of graphene oxide: A synthetic chemistry viewpoint. *Chemical Society Reviews*, 43(1), 291-312.
- [18] Knieke, C., Berger, A., Voigt, M., Taylor, R. N. K., Röhl, J. ve Peukert, W., (2010) Scalable production of graphene sheets by mechanical delamination. *Carbon*, 48(11), 3196-3204.
- [19] Ünsal, Ö. F., (2018). İletken Polimer ve Grafen Oksitle Fonksiyonelleştirilmiş Nanolif Tabanlı Piezoelektrik Nanogeneratörler, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- [20] Das, T. K., Prusty, S. (2013). Graphene-Based Polymer Composites and Their Applications, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52 (4) : 319-331.
- [21] Butz, B., Dolle, C., Halbig, C. E., Spiecker, E. & Eigler, S. (2016). Citation For: Highly Intact and Pure Oxo-Functionalized Graphene: Synthesis and Electron-Beam-Induced Reduction, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 55, 15771.
- [22] Bonnacorso, F., Lombardo, A., Hasan, T., Sun, T., Colombo, L. & Ferrari, A. C. (2012). Production and Processing of Graphene and 2d Crystals, *Materials Today*, 15(12), 564-589.
- [23] Pumera, M., (2013). Electrochemistry of Graphene, Graphene Oxide and Other Graphenoids, *Electrochemistry Communications*, 36, 14-18.
- [24] Katsnelson, M. I. (2007). Graphene: Carbon in two dimensions. *Materials today*, 10(1-2), 20-27.

- [25] Kumar, K. A., Subalakshmi, K., Sekar, S., Sivaprakash, P., Kim, I., Kumar, S. A., ... & Arumugam, S. (2024). Hexagonal cage like structured reduced graphene Oxide-NiCo₂S₄ nanocomposite for high performance hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1384-1392.
- [26] Ahmad, M. S., & Nishina, Y. (2020). Graphene-based carbocatalysts for carbon-carbon bond formation. *Nanoscale*, 12(23), 12210-12227.
- [27] Sarkar, S., Niyogi, S., Bekyarova, E., & Haddon, R. C. (2011). Organometallic chemistry of extended periodic π -electron systems: hexahapto-chromium complexes of graphene and single-walled carbon nanotubes. *Chemical Science*, 2(7), 1326-1333.
- [28] Sreeprasad, T. S., & Berry, V. (2013). How do the electrical properties of graphene change with its functionalization?. *small*, 9(3), 341-350.
- [29] Lin, C. Y., Wu, J. Y., Chiu, Y. H., Chang, C. P., & Lin, M. F. (2014). Stacking-dependent magnetoelectronic properties in multilayer graphene. *Physical Review B*, 90(20), 205434.
- [30] Niilisk, A., Kozlova, J., Alles, H., Aarik, J., & Sammelselg, V. (2016). Raman characterization of stacking in multi-layer graphene grown on Ni. *Carbon*, 98, 658-665.
- [31] Bianco, A., (2013). Graphene: Safe or Toxic? The Two Faces of The Medal, *Angewandte Chemie International Edition*
- [32] Hughes, J. L., Jeon, T., (2012). A Review of The Terahertz Conductivity of Bulk and Nano-Materials, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*
- [33] Karasu, Y. E. (2023). Thz Fotoiletken Antenlerin Yönlülüğünün Arttırılması, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye.
- [34] Şahin, Z. (2023). Yağlama yağında katkı maddesi olarak farklı morfolojilere sahip karbon malzemelerin kullanımı ve tribolojik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Türkiye.
- [35] Çınar, N. (2023). Grafen oksit temelli sıvı kromatografisi (HPLC) sabit fazlarının geliştirilmesi ve ilaç moleküllerinin analizlerinde kullanımı, Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi, Karabük Üniversitesi, Türkiye.
- [36] Özada, Ç., Ünal, M., & Yazıcı, M. (2024). Süperkapasitör: Temelleri ve malzemeleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(2), 1315-1332.

- [37] Alemdar, N. (2023). Glukoz Sensörü Olarak Kullanılmak Üzere İndirgenmiş Grafen Oksit Katkılı Polimerik Film Eldesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 35(4), 515-522.
- [38] Özgül, H. (2023). İndirgenmiş grafen oksit ilavesi ile kloropren kauçuğun mekanik ve yaşlanma özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Bursa Uldağ Üniversitesi, Türkiye.
- [39] Fernández-Merino, M. J., Guardia, L., Paredes, J. I., Villar-Rodil, S., Solís-Fernández, P., Martínez-Alonso, A., & Tascón, J. M. D. (2010). Vitamin C is an ideal substitute for hydrazine in the reduction of graphene oxide suspensions. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(14), 6426-6432.
- [40] Xiao, S. P., & Huang, H. X. (2022). Vitamin C aqueous solution assisted in-situ reduction of graphene oxide in flexible thermoplastic polyurethane. *Composites Science and Technology*, 226, 109533.
- [41] Kurt, B. Z., Durmus, Z., & Sevgi, E. (2019). In situ reduction of graphene oxide by different plant extracts as a green catalyst for selective hydrogenation of nitroarenes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(48), 26322-26337.
- [42] Montoro-Leal, P., García-Mesa, J. C., Morales-Benítez, I., Guerrero, M. L., & Alonso, E. V. (2023). Progress of research on the sustainable preparation of graphene and its derivatives. In *Graphene Extraction from Waste* (pp. 239-304). Woodhead Publishing.
- [43] Bharech, S., & Kumar, R. (2015). A review on the properties and applications of graphene. *J. Mater. Sci. Mech. Eng*, 2(2025), 70-73.
- [44] Li, X., Tao, L., Chen, Z., Fang, H., Li, X., Wang, X., ... & Zhu, H. (2017). Graphene and related two-dimensional materials: Structure-property relationships for electronics and optoelectronics. *Applied Physics Reviews*, 4(2).
- [45] Mueller, T., Xia, F., & Avouris, P. (2010). Graphene photodetectors for high-speed optical communications. *Nature photonics*, 4(5), 297-301.
- [46] Youngblood, N., Anugrah, Y., Ma, R., Koester, S. J., & Li, M. (2014). Multifunctional graphene optical modulator and photodetector integrated on silicon waveguides. *Nano letters*, 14(5), 2741-2746.
- [47] Jang, H., Park, Y. J., Chen, X., Das, T., Kim, M. S., & Ahn, J. H. (2016). Graphene-based flexible and stretchable electronics. *Advanced Materials*, 28(22), 4184-4202.

- [48] Li, D., Lai, W. Y., Zhang, Y. Z., & Huang, W. (2018). Printable transparent conductive films for flexible electronics. *Advanced materials*, 30(10), 1704738.
- [49] Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T., & Ferrari, A. C. (2010). Graphene photonics and optoelectronics. *Nature photonics*, 4(9), 611-622.
- [50] Ma, Y., & Zhi, L. (2019). Graphene-based transparent conductive films: material systems, preparation and applications. *Small Methods*, 3(1), 1800199.
- [51] Zhang, Y. I., Zhang, L., & Zhou, C. (2013). Review of chemical vapor deposition of graphene and related applications. *Accounts of chemical research*, 46(10), 2329-2339.
- [52] Shi, G., Zhao, Z., Pai, J. H., Lee, I., Zhang, L., Stevenson, C., ... & Ma, J. (2016). Highly sensitive, wearable, durable strain sensors and stretchable conductors using graphene/silicon rubber composites. *Advanced Functional Materials*, 26(42), 7614-7625.
- [53] Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *science*, 321(5887), 385-388.
- [54] Liu, X. (2019). *Nanomechanics of Graphene and Design of Graphene Composites*. Springer.
- [55] Phiri, J., Gane, P. ve Maloney, T. C., (2017) General overview of graphene: Production, properties and application in polymer composites. *Materials Science and Engineering: B*, 215, 9-28.
- [56] Gültekin Demirel, N., (2021). Grafen oksit ile kaplanan tekstil yüzeylerinin çevre dostu indirgenmesi, fonksiyonel özelliklerin geliştirilmesi ve incelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [57] Golkarian, A. R., & Jabbarzadeh, M. (2013). The density effect of van der Waals forces on the elastic modules in graphite layers. *Computational Materials Science*, 74, 138-142.
- [58] Hernandez, Y., Nicolosi, V., Lotya, M., Blighe, F. M., Sun, Z., De, S., ... & Coleman, J. N. (2008). High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite. *Nature nanotechnology*, 3(9), 563-568.
- [59] Narayan, R., & Kim, S. O. (2015). Surfactant mediated liquid phase exfoliation of graphene. *Nano Convergence*, 2, 1-19.

- [60] Maier, P., Xavier, N. F., Truscott, C. L., Hansen, T., Fouquet, P., Sacchi, M., & Tamtögl, A. (2022). How does tuning the van der Waals bonding strength affect adsorbate structure?. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(48), 29371-29380.
- [61] Ren, S., Rong, P. ve Yu, Q., (2018) Preparations, properties and applications of graphene in functional devices: A concise review. *Ceramics International*, 44(11), 11940-11955.
- [62] Sur U.K., (2012). Graphene: a rising star on the horizon of material science, *International Journal of Electrochemistry* Volume 2012, Article ID 237689, 12 pages.
- [63] Liu, Z., Liu, B., Ding, J., & Liu, J. (2014). Fluorescent sensors using DNA-functionalized graphene oxide. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 406, 6885-6902.
- [64] Dörtoğul, C., (2018). Grafen Oksitin Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye
- [65] Sinnott, S.B.; Andrews, R. (2001). “Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications”, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 145–249.
- [66] Aristov, V. Y., Urbanik, G., Kummer, K., Vyalikh, D. V., Molodtsova, O. V., Preobrajenski, A. B., ... & Knupfer, M. (2010). Graphene synthesis on cubic SiC/Si wafers. Perspectives for mass production of graphene-based electronic devices. *Nano letters*, 10(3), 992-995.
- [67] Yazdi, G. R., Iakimov, T., & Yakimova, R. (2016). Epitaxial graphene on SiC: a review of growth and characterization. *Crystals*, 6(5), 53.
- [68] Munoz, R., & Gómez-Aleixandre, C. (2013). Review of CVD synthesis of graphene. *Chemical Vapor Deposition*, 19(10-11-12), 297-322.
- [69] Chen, Z., Ren, W., Liu, B., Gao, L., Pei, S., Wu, Z. S., ... & Cheng, H. M. (2010). Bulk growth of mono-to few-layer graphene on nickel particles by chemical vapor deposition from methane. *Carbon*, 48(12), 3543-3550.
- [70] Wei, D., Wu, B., Guo, Y., Yu, G., & Liu, Y. (2013). Controllable chemical vapor deposition growth of few layer graphene for electronic devices. *Accounts of chemical research*, 46(1), 106-115.
- [71] Pei, S., & Cheng, H. M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210-3228.
- [72] İçkecan, D., (2017). Grafen Sentezi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.

- [73] Davard, F. ve Dupuis, D., (2002) Blade coating of fabrics: Rheology and fluid penetration. *Coloration Technology*, 118(2), 69-74.
- [74] Søndergaard, R., Hösel, M., Angmo, D., Larsen-Olsen, T. T. ve Krebs, F. C., (2012) Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. *Materials Today*, 15(1-2), 36-49.
- [75] Heo, J. S., Hossain, M. F. ve Kim, I., (2020) Challenges in design and fabrication of flexible/stretchable carbon- and textile-based wearable sensors for health monitoring: A critical review. *Sensors (Basel)*, 20(14).
- [76] Molina, J., (2016) Graphene-based fabrics and their applications: A review. *RSC Advances*, 6(72), 68261-68291.
- [77] Chu, Y., Qian, C., Chahal, P. ve Cao, C., (2019) Printed diodes: Materials processing, fabrication, and applications. *Advanced Science*, 6(6), 1801653.
- [78] Chua, C. K., & Pumera, M. (2013). Reduction of graphene oxide with substituted borohydrides. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(5), 1892-1898.
- [79] Gao, X., Jang, J., & Nagase, S. (2010). Hydrazine and thermal reduction of graphene oxide: reaction mechanisms, product structures, and reaction design. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(2), 832-842.
- [80] Kuila, T., Bose, S., Khanra, P., Mishra, A. K., Kim, N. H. ve Lee, J. H., (2012) A green approach for the reduction of graphene oxide by wild carrot root. *Carbon*, 50(3), 914-921.
- [81] Thi Vu, T. H., Thi Tran, T. T., Thi Le, H. N., Thi Nguyen, P. H., Bui, N. Q. ve Essayem, N., (2015) A new green approach for the reduction of graphene oxide nanosheets using caffeine. *Bulletin of Materials Science*, 38(3), 667–671.
- [82] Hou, D., Liu, Q., Cheng, H., Li, K., Wang, D. ve Zhang, H., (2016) Chrysanthemum extract assisted green reduction of graphene oxide. *Materials Chemistry and Physics*, 183, 76-82.
- [83] Xu, C., Shi, X., Ji, A., Shi, L., Zhou, C. ve Cui, Y., (2015) Fabrication and characteristics of reduced graphene oxide produced with different green reductants. *PLoS One*, 10(12), e0144842.
- [84] Upadhyay, R. K., Soin, N., Bhattacharya, G., Saha, S., Barman, A. ve Roy, S. S., (2015) Grape extract assisted green synthesis of reduced graphene oxide for water treatment application. *Materials Letters*, 160, 355-358.

- [85] Bo, Z., Shuai, X., Mao, S., Yang, H., Qian, J., Chen, J., Yan, J. ve Cen, K., (2014) Green preparation of reduced graphene oxide for sensing and energy storage applications. *Scientific Reports*, 4, 4684.
- [86] Chu, H.-J., Lee, C.-Y. ve Tai, N.-H., (2016) Green preparation using black soybeans extract for graphene-based porous electrodes and their applications in supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 322, 31-39.
- [87] Suresh, D., Nethravathi, P. C., Udayabhanu, Nagabhushana, H. ve Sharma, S. C., (2015) Spinach assisted green reduction of graphene oxide and its antioxidant and dye absorption properties. *Ceramics International*, 41(3), 4810-4813.
- [88] Khanra, P., Kuila, T., Kim, N. H., Bae, S. H., Yu, D.-s. ve Lee, J. H., (2012) Simultaneous bio-functionalization and reduction of graphene oxide by baker's yeast. *Chemical Engineering Journal*, 183, 526-533.
- [89] Gurunathan, S., Han, J. W., Kim, E. S., Park, J. H. ve Kim, J. H., (2015) Reduction of graphene oxide by resveratrol: A novel and simple biological method for the synthesis of an effective anticancer nanotherapeutic molecule. *International Journal of Nanomedicine*, 10, 2951-2969.
- [90] Chu, H.-J., Lee, C.-Y. ve Tai, N.-H., (2014) Green reduction of graphene oxide by hibiscus sabdariffa l. To fabricate flexible graphene electrode. *Carbon*, 80, 725-733.
- [91] Haghighi, B. ve Tabrizi, M. A., (2013). Green-synthesis of reduced graphene oxide nanosheets using rose water and a survey on their characteristics and applications. *RSC Advances*, 3(32).
- [92] Yarangalla, S., Rajendran, R., Jose, J., AlMaadeed, M. A., Kalarikkal, N. ve Thomas, S., (2016) Preparation and characterization of green graphene using grape seed extract for bioapplications. *Materials Science and Engineering C*, 65, 345-353.
- [93] Gültekin, B. C. (2021). İndirgenmiş Grafen Oksit ile Kaplanan Pamuk Kumaşın Elektriksel İletkenlik ve Haslık Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(1), 39-46.
- [94] Robinson, J. T., Perkins, F. K., Snow, E. S., Wei, Z., & Sheehan, P. E. (2008). Reduced graphene oxide molecular sensors. *Nano letters*, 8(10), 3137-3140.
- [95] Jang, H. S., Moon, M. S., & Kim, B. H. (2021). Electronic Textiles Fabricated with Graphene Oxide-Coated Commercial Textiles. *Coatings*, 11(5), 489.

- [96] Borini, S., White, R., Wei, D., Astley, M., Haque, S., Spigone, E., ... & Ryhänen, T. (2013). Ultrafast graphene oxide humidity sensors. *ACS nano*, 7(12), 11166-11173.
- [97] Gao, L., Lian, C., Zhou, Y., Yan, L., Li, Q., Zhang, C., ... & Chen, K. (2014). Graphene oxide–DNA based sensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 60, 22-29.
- [98] Yun, Y. J., Hong, W. G., Kim, H. J., Jun, Y., & Lee, H. K. (2017). E-textile gas sensors composed of molybdenum disulfide and reduced graphene oxide for high response and reliability. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 248, 829-835.
- [99] Xu, L., Zhai, H., Chen, X., Liu, Y., Wang, M., Liu, Z., ... & Terry, T. Y. (2021). Coolmax/graphene-oxide functionalized textile humidity sensor with ultrafast response for human activities monitoring. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128639.
- [100] Li, X., & Zhi, L. (2018). Graphene hybridization for energy storage applications. *Chemical Society Reviews*, 47(9), 3189-3216.
- [101] Choi, S., Kim, C., Suh, J. M., & Jang, H. W. (2019). Reduced graphene oxide-based materials for electrochemical energy conversion reactions. *Carbon Energy*, 1(1), 85-108.
- [102] Folorunso, O., Olukanmi, P. O., & Shongwe, T. (2023). Progress towards sustainable energy storage: A concise review. *Engineering Reports*, 5(11), e12731.
- [103] Ali Tahir, A., Ullah, H., Sudhagar, P., Asri Mat Teridi, M., Devadoss, A., & Sundaram, S. (2016). The application of graphene and its derivatives to energy conversion, storage, and environmental and biosensing devices. *The Chemical Record*, 16(3), 1591-1634.
- [104] Necolau, M. I., & Pandele, A. M. (2020). Recent advances in graphene oxide-based anticorrosive coatings: An overview. *Coatings*, 10(12), 1149.
- [105] Jena, G., & Philip, J. (2022). A review on recent advances in graphene oxide-based composite coatings for anticorrosion applications. *Progress in Organic Coatings*, 173, 107208.
- [106] Kumar, S. S. A., Bashir, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2021). New perspectives on Graphene/Graphene oxide based polymer nanocomposites for corrosion applications: The relevance of the Graphene/Polymer barrier coatings. *Progress in Organic Coatings*, 154, 106215.

- [107] Ghauri, F. A., Raza, M. A., Baig, M. S., & Ibrahim, S. (2017). Corrosion study of the graphene oxide and reduced graphene oxide-based epoxy coatings. *Materials Research Express*, 4(12), 125601.
- [108] Li, J., Zheng, H., Liu, L., Meng, F., Cui, Y., & Wang, F. (2021). Modification of graphene and graphene oxide and their applications in anticorrosive coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 18, 311-331.
- [109] Godoy, A. P., Amurim, L. G., Mendes, A., Goncalves, E. S., Ferreira, A., de Andrade, C. S., ... & Andrade, R. J. (2021). Enhancing the electromagnetic interference shielding of flexible films with reduced graphene oxide-based coatings. *Progress in Organic Coatings*, 158, 106341.
- [110] Zhao, H., Ding, R., Zhao, X., Li, Y., Qu, L., Pei, H., ... & Zhang, W. (2017). Graphene-based nanomaterials for drug and/or gene delivery, bioimaging, and tissue engineering. *Drug Discovery Today*, 22(9), 1302-1317.
- [111] Goenka, S., Sant, V., & Sant, S. (2014). Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Controlled Release*, 173, 75-88.
- [112] Kaur, H., Garg, R., Singh, S., Jana, A., Bathula, C., Kim, H. S., ... & Mittal, M. (2022). Progress and challenges of graphene and its congeners for biomedical applications: Drug delivery, gene delivery, biosensing, bioimaging, and tissue engineering. *Journal of Molecular Liquids*, 120703.
- [113] Nurunnabi, M., Parvez, K., Nafiujjaman, M., Revuri, V., Khan, H. A., Feng, X., & Lee, Y. K. (2015). Bioapplication of graphene oxide derivatives: drug/gene delivery, imaging, polymeric modification, toxicology, therapeutics and challenges. *RSC advances*, 5(52), 42141-42161.
- [114] Maleki, M., Zarezadeh, R., Nouri, M., Sadigh, A. R., Pouremamali, F., Asemi, Z., ... & Yousefi, B. (2020). Graphene oxide: a promising material for regenerative medicine and tissue engineering. *Biomolecular Concepts*, 11(1), 182-200.
- [115] Ma, X., Tao, H., Yang, K., Feng, L., Cheng, L., Shi, X., ... & Liu, Z. (2012). A functionalized graphene oxide-iron oxide nanocomposite for magnetically targeted drug delivery, photothermal therapy, and magnetic resonance imaging. *Nano Research*, 5, 199-212.
- [116] M. Arseven, (2011). Polikristalin Bakır Folyo Üzerinde Grafen Sentezi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

- [117] Dong, Z., Jiang, C., Cheng, H., Zhao, Y., Shi, G., Jiang, L., Qu, L. (2012). “Facile Fabrication of Light, Flexible and multifunctional graphene fibers”, *Advanced Materials*, Vol:24 (14)
- [118] Shin, M. K., Lee, B., Kim, S. H., Lee, J. A., Spinks, G. M., Gambhir, S., Wallace, G. G., Kozlov, M. E., Baughman R. H., Kim, S. J. (2012). Synergistic Toughening of Composite Fibres By Self-Alignment of Reduced Graphene Oxide and Carbon Nanotubes, *Nature Communications*, 3: 650.
- [119] Tiyek, İ., Dönmez, U., Yıldırım, B., Karataş, Ş., Alma, M. H., Yazıcı, M., Ersoy, M. S., (2016a). “Kimyasal Yöntem ile İndirgenmiş Grafen Oksit Sentezi ve Karakterizasyonu”. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi* 20. 2: 349-357.
- [120] Joshi, M., & Bhattacharyya, A. (2011). Nanotechnology—a new route to high-performance functional textiles. *Textile progress*, 43(3), 155-233.
- [121] Syduzzaman, M., Hassan, A., Anik, H. R., Akter, M., & Islam, M. R. (2023). Nanotechnology for High-Performance Textiles: A Promising Frontier for Innovation. *ChemNanoMat*, 9(9), e202300205.
- [122] Zhong, W. (2016). Nanofibres for medical textiles. In *Advances in smart medical textiles* (pp. 57-70). Woodhead Publishing.
- [123] Zuo, X., Zhang, X., Qu, L., & Miao, J. (2023). Smart fibers and textiles for personal thermal management in emerging wearable applications. *Advanced Materials Technologies*, 8(6), 2201137.
- [124] Pakdel, E., Fang, J., Fang, J., Sun, L., Wang, X., & Wang, X. (2018). Nanocoatings for smart textiles. *Smart textiles: wearable nanotechnology*, 247-300.
- [125] Hassabo, A. G., Elmorsy, H., Gamal, N., Sediek, A., Saad, F., Hegazy, B. M., & Othman, H. (2023). Applications of Nanotechnology in the Creation of Smart Sportswear for Enhanced Sports Performance: Efficiency and Comfort. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, 20(1), 11-28.
- [126] Joshi, M., Bhattacharyya, A., & Ali, S. W. (2008). Characterization techniques for nanotechnology applications in textiles.
- [127] Rivero, P. J., & Goicoechea, J. (2016). Sol-gel technology for antimicrobial textiles. In *Antimicrobial Textiles* (pp. 47-72). Woodhead Publishing.
- [128] Camlibel, N. O., & Arik, B. (2017). Sol–gel applications in textile finishing processes. *Recent applications in Sol-Gel synthesis*, 253-281.

- [129] Şimşek, B., & Karaman, M. (2020). Initiated chemical vapor deposition of poly (hexafluorobutyl acrylate) thin films for superhydrophobic surface modification of nanostructured textile surfaces. *Journal of Coatings Technology and Research*, 17(2), 381-391.
- [130] Shahidi, S., Moazzenchi, B., & Ghoranneviss, M. (2015). A review-application of physical vapor deposition (PVD) and related methods in the textile industry. *The European Physical Journal Applied Physics*, 71(3), 31302.
- [131] Subbiah, D. K., Balasubramanian, S., Kulandaisamy, A. J., Jayanth Babu, K., Das, A., & Rayappan, J. B. B. (2020). Surface Modification of Textiles with Nanomaterials for Flexible Electronics Applications. *Advances in Functional Finishing of Textiles*, 1-42.
- [132] Attia, N. F., Moussa, M., Sheta, A. M., Taha, R., & Gamal, H. (2017). Effect of different nanoparticles based coating on the performance of textile properties. *Progress in Organic Coatings*, 104, 72-80.
- [133] Hsieh, C. T., Wu, F. L., & Yang, S. Y. (2008). Superhydrophobicity from composite nano/microstructures: Carbon fabrics coated with silica nanoparticles. *Surface and coatings technology*, 202(24), 6103-6108.
- [134] Klimov, D. I., Zezina, E. A., Lipik, V. C., Abramchuk, S. S., Yaroslavov, A. A., Feldman, V. I., ... & Zezin, A. A. (2019). Radiation-induced preparation of metal nanostructures in coatings of interpolyelectrolyte complexes. *Radiation Physics and Chemistry*, 162, 23-30.
- [135] Tănase, M. A., Soare, A. C., Oancea, P., Răducan, A., Mihăescu, C. I., Alexandrescu, E., ... & Cinteza, L. O. (2021). Facile in situ synthesis of ZnO flower-like hierarchical nanostructures by the microwave irradiation method for multifunctional textile coatings. *Nanomaterials*, 11(10), 2574.
- [136] Manna, J., Begum, G., Kumar, K. P., Misra, S., & Rana, R. K. (2013). Enabling antibacterial coating via bioinspired mineralization of nanostructured ZnO on fabrics under mild conditions. *ACS applied materials & interfaces*, 5(10), 4457-4463.
- [137] Tang, X., & Yan, X. (2017). Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 81, 378-404.

- [138] Liu, X., Gu, Y., Mi, T., Wang, X., & Zhang, X. (2021). Dip-coating approach to fabricate durable PDMS/STA/SiO₂ superhydrophobic polyester fabrics. *Coatings*, 11(3), 326.
- [139] Shim, E., (2010). Coating and laminating processes and techniques for textiles, *Smart textile coatings and laminates*, W. C. Smith, Editor. ABD, Elsevier, 11- 45.
- [140] Fung, W. (2002). Coated and laminated textiles (Vol. 23). Woodhead Publishing.
- [141] Joshi, M., & Butola, B. S. (2013). Application technologies for coating, lamination and finishing of technical textiles. In *Advances in the dyeing and finishing of technical textiles* (pp. 355-411). Woodhead Publishing.
- [142] Yang, H., & Jiang, P. (2010). Large-scale colloidal self-assembly by doctor blade coating. *Langmuir*, 26(16), 13173-13182.
- [143] Tran, T. S., Dutta, N. K. ve Choudhury, N. R., (2018) Graphene inks for printed flexible electronics: Graphene dispersions, ink formulations, printing techniques and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 261, 41-61.
- [144] Düzyer, Ş., (2009). Nanoliflerin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- [145] Rao, C. N. R., Cheetham, A. K., (2001). “Science and Technology of Nanomaterials: Current Status and Future Prospects”, *Journal of Materials Chemistry*, 11, 2887- 2894.
- [146] Zeytuncu, B., vd., (2014). Synthesis of Nanofiber Membrane by Electrospinning Technique, 143rd TMS Annual Meeting & Exhibition, California, United States of America, pp.1165-1171
- [147] Akalın, M., Mısıktık, İ., (2010). *Teknik Tekstiller*, Birsen Yayınevi.
- [148] Çallıoğlu, F., C., (2011). Silindirli Elektro Lif Çekim Yöntemi ile Poliüretan Nano Lif Üretimi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- [149] Pang, L., Ming, J., Pan, F., & Ning, X. (2019). Fabrication of silk fibroin fluorescent nanofibers via electrospinning. *Polymers*, 11(6), 986.
- [150] Serra-Parareda, F., Tarrés, Q., Pèlach, M. À., Mutjé, P., Balea, A., Monte, M. C., ... & Delgado-Aguilar, M. (2021). Monitoring fibrillation in the mechanical production of lignocellulosic micro/nanofibers from bleached spruce thermomechanical pulp. *International Journal of Biological Macromolecules*, 178, 354-362.

- [151] Kılıç, 2008, Eriyikten Elektroüretim Yöntemiyle Polipropilen Nanolif Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [152] Zhang, X., & Lu, Y. (2014). Centrifugal spinning: an alternative approach to fabricate nanofibers at high speed and low cost. *Polymer Reviews*, 54(4), 677-701.
- [153] Zaarour, B., Zhu, L., Huang, C., & Jin, X. (2020). A mini review on the generation of crimped ultrathin fibers via electrospinning: Materials, strategies, and applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 31(7), 1449-1462.
- [154] Zhou, F. L., & Gong, R. H. (2008). Manufacturing technologies of polymeric nanofibres and nanofibre yarns. *Polymer International*, 57(6), 837-845.
- [155] Polat, Y., Pampal, E. S., Stojanovska, E., Simsek, R., Hassanin, A., Kilic, A., ... & Yilmaz, S. (2016). Solution blowing of thermoplastic polyurethane nanofibers: A facile method to produce flexible porous materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(9).
- [156] Almetwally, A. A., El-Sakhawy, M., Elshakankery, M. H., & Kasem, M. H. (2017). Technology of nano-fibers: Production techniques and properties-Critical review. *J. Text. Assoc*, 78(1), 5-14.
- [157] Abbasipour, M., & Khajavi, R. (2013). Nanofiber bundles and yarns production by electrospinning: a review. *Advances in Polymer Technology*, 32(3).
- [158] Khenoussi, N., Schacher, L., & Adolphe, D. C. (2012). Nanofiber production: study and development of electrospinning device. *Experimental Techniques*, 36(2), 32-39.
- [159] Kurečić, M., & Smole, M. S. (2013). Electrospinning: Nanofibre Production Method. *Tekstilec*, 56(1).
- [160] Afshari, M. (Ed.). (2016). *Electrospun nanofibers*. Woodhead Publishing.
- [161] Dağcı Tekin, M. (2020). Biyolojik tabanlı nanofiberlerin elektrospin yöntemi ile üretilmesi, karakterizasyonu ve bazı eser metallerin zenginleştirilmesinde kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye.
- [162] Pietrzakowski, M. (2008). Piezoelectric control of composite plate vibration: Effect of electric potential distribution. *Computers & Structures*, 86(9), 948-954.
- [163] Mason, W. P. (1981). Piezoelectricity, its history and applications. *The journal of the Acoustical Society of America*, 70(6), 1561-1566.

- [164] Yukseloglu, S. M., & Arsla, A. F. (2018). Piezoelectric Polymers In Textile Industry. *Annals of the University of Oradea. Fascicle of Textiles, Leatherwork*, 19(1).
- [165] Katzir, S. (2012). Who knew piezoelectricity? Rutherford and Langevin on submarine detection and the invention of sonar. *Notes and Records of the Royal Society*, 66(2), 141-157.
- [166] Elahi, H., Munir, K., Eugeni, M., Abrar, M., Khan, A., Arshad, A., & Gaudenzi, P. (2020). A review on applications of piezoelectric materials in aerospace industry. *Integrated Ferroelectrics*, 211(1), 25-44.
- [167] Xu, T. B. (2016). Energy harvesting using piezoelectric materials in aerospace structures. In *Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures* (pp. 175-212). Woodhead Publishing.
- [168] Cherston, J., Veyssset, D., Sun, Y., Wilbert, J. H. S., Yano, H., Nelson, K. A., ... & Paradiso, J. A. (2020). Large-area electronic skins in space: vision and preflight characterization for first aerospace piezoelectric e-textile. In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2020* (Vol. 11379, pp. 239-252). SPIE.
- [169] González, J. L., Rubio, A., & Moll, F. (2002). Human powered piezoelectric batteries to supply power to wearable electronic devices. *International journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, 10(1), 34-40.
- [170] Wu, Y., Ma, Y., Zheng, H., & Ramakrishna, S. (2021). Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review. *Materials & Design*, 211, 110164.
- [171] Dawson, L. H. (1927). Piezoelectricity of crystal quartz. *Physical Review*, 29(4), 532.
- [172] Bunde, R. L., Jarvi, E. J., & Rosentreter, J. J. (1998). Piezoelectric quartz crystal biosensors. *Talanta*, 46(6), 1223-1236.
- [173] Russo, S., Behari, K., Chengji, S., Pianca, M., Barchiesi, E., & Moggi, G. (1993). Synthesis and microstructural characterization of low-molar-mass poly (vinylidene fluoride). *Polymer*, 34(22), 4777-4781.
- [174] Alaaeddin, M. H., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., & AL-Oqla, F. M. (2018, November). Properties and common industrial applications of polyvinyl fluoride (PVF) and polyvinylidene fluoride (PVDF). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 409, p. 012021). IOP Publishing.

- [175] Ueberschlag, P. (2001). PVDF piezoelectric polymer. *Sensor review*, 21(2), 118-126.
- [176] Abdolmaleki, H., Haugen, A. B., Buhl, K. B., Daasbjerg, K., & Agarwala, S. (2023). Interfacial Engineering of PVDF-TrFE toward Higher Piezoelectric, Ferroelectric, and Dielectric Performance for Sensing and Energy Harvesting Applications. *Advanced Science*, 10(6), 2205942.
- [177] <https://pagev.org/pvdf> (Erişim Tarihi: 25.06.2024).
- [178] Sefadi, J. S., Mochane, M. J., Gumede, T. P., Malebo, N. J., & Mokhena, T. C. (2021). Graphene-Metal Oxide Nanoparticles on Piezoelectric and Pyroelectric Effect of Polyvinylidene Fluoride (PVDF). *Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology*, 1123-1146.
- [178] Sukumaran, S., Chatbouri, S., Rouxel, D., Tisserand, E., Thiebaud, F., & Ben Zineb, T. (2021). Recent advances in flexible PVDF based piezoelectric polymer devices for energy harvesting applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 32(7), 746-780.
- [180] Krishnaswamy, J. A., Buroni, F. C., García-Macías, E., Melnik, R., Rodriguez-Tembleque, L., & Saez, A. (2020). Design of nano-modified PVDF matrices for lead-free piezocomposites: Graphene vs carbon nanotube nano-additions. *Mechanics of Materials*, 142, 103275.
- [181] Mirow, P. (2003). High Resolution Piezo Film Sensor Systems for Automotive Applications. In *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2003* (pp. 249-259). Springer Berlin Heidelberg.
- [182] Bera, B., & Sarkar, M. D. (2017). Piezoelectricity in PVDF and PVDF based piezoelectric nanogenerator: a concept. *IOSR J. Appl. Phys*, 9(3), 95-99.
- [183] Uchino, K. (2018). Piezoelectric energy harvesting systems—Essentials to successful developments. *Energy Technology*, 6(5), 829-848.
- [184] Xin, Y., Sun, H., Tian, H., Guo, C., Li, X., Wang, S., & Wang, C. (2016). The use of polyvinylidene fluoride (PVDF) films as sensors for vibration measurement: A brief review. *Ferroelectrics*, 502(1), 28-42.
- [185] Krucińska, I., Cybula, M., Rambašek, L., & Van Langenhove, L. (2010). Piezoelectric textiles: state of the art. *Materials Technology*, 25(2), 93-100.

- [186] Wang, Y. R., Zheng, J. M., Ren, G. Y., Zhang, P. H., & Xu, C. (2011). A flexible piezoelectric force sensor based on PVDF fabrics. *Smart Materials and Structures*, 20(4), 045009.
- [187] Nilsson, E., Lund, A., Jonasson, C., Johansson, C., & Hagström, B. (2013). Poling and characterization of piezoelectric polymer fibers for use in textile sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 201, 477-486.
- [188] Krajewski, A. S., Magniez, K., Helmer, R. J., & Schrank, V. (2013). Piezoelectric force response of novel 2D textile based PVDF sensors. *IEEE Sensors Journal*, 13(12), 4743-4748.
- [189] Mokhtari, F., Spinks, G. M., Fay, C., Cheng, Z., Raad, R., Xi, J., & Foroughi, J. (2020). Wearable electronic textiles from nanostructured piezoelectric fibers. *Advanced Materials Technologies*, 5(4), 1900900.
- [190] Wan, X., Cong, H., Jiang, G., Liang, X., Liu, L., & He, H. (2023). A review on PVDF nanofibers in textiles for flexible piezoelectric sensors. *ACS Applied Nano Materials*, 6(3), 1522-1540.
- [191] Bairagi, S., Kumar, C., Babu, A., Aliyana, A. K., Stylios, G., Pillai, S. C., & Mulvihill, D. M. (2023). Wearable Nanocomposite Textile-Based Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators: Progress and Perspectives. *Nano Energy*, 108962.
- [192] Rashid, A., Zubair, U., Ashraf, M., Javid, A., Abid, H. A., & Akram, S. (2023). Flexible piezoelectric coatings on textiles for energy harvesting and autonomous sensing applications: a review. *Journal of Coatings Technology and Research*, 20(1), 141-172.
- [193] Wen, W., & Fang, F. (2024). Flexible sensors in smart textiles and their applications. *Wearable Technology*, 2(2), 83-91.
- [194] Pfeiffer, L., Hofmann, P., & Haupt, M. (2023). Textile-based piezoelectric impact sensors for fibre-reinforced plastic composites. *tm-Technisches Messen*, (0).
- [195] Anwar, S., Hassanpour Amiri, M., Jiang, S., Abolhasani, M. M., Rocha, P. R., & Asadi, K. (2021). Piezoelectric nylon-11 fibers for electronic textiles, energy harvesting and sensing. *Advanced Functional Materials*, 31(4), 2004326.
- [196] Chakhchaoui, N., Farhan, R., Boutaldat, M., Rouway, M., Eddiai, A., Meddad, M., ... & Van Langenhove, L. (2020). Piezoelectric β -polymorph formation of new textiles by surface modification with coating process based on interfacial interaction on the

conformational variation of poly (vinylidene fluoride)(PVDF) chains. The European Physical Journal Applied Physics, 91(3), 31301.

[197] Shi, J., Liu, S., Zhang, L., Yang, B., Shu, L., Yang, Y., ... & Tao, X. (2020). Smart textile-integrated microelectronic systems for wearable applications. *Advanced materials*, 32(5), 1901958.

[198] Chen, J., Qiu, Q., Han, Y., & Lau, D. (2019). Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 14-25.

[199] Tan, Y., Yang, K., Wang, B., Li, H., Wang, L., & Wang, C. (2021). High-performance textile piezoelectric pressure sensor with novel structural hierarchy based on ZnO nanorods array for wearable application. *Nano Research*, 1-8.

[200] Su, Y., Chen, C., Pan, H., Yang, Y., Chen, G., Zhao, X., ... & Chen, J. (2021). Muscle fibers inspired high-performance piezoelectric textiles for wearable physiological monitoring. *Advanced Functional Materials*, 31(19), 2010962.

[201] Tajitsu, Y. (2020). Development of e-textile sewn together with embroidered fabric having motion-sensing function using piezoelectric braided cord for embroidery. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27(5), 1644-1649.

[202] Jang, W., Yun, J., Jeon, K., Byun, H., (2015), PVdF/graphene oxide hybrid membranes *via* electrospinning for water treatment applications, *RSC Advances*, Issue 58.

[203] Şimşek, R. (2015). Poliviniliden florid (pvdf) polimerinden nano lifli yüzeylerin elde edilmesi ve bu yüzeylerin enerji üretim özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

[204] Issa, A., AlMa'aded Al- Ali, M., Mrlik, M., Luyt, S., A., (2016), Electrospun PVDF graphene oxide composite fibre mats with tunable physical properties, *Journal of Polymer Research* 23(11)

[205] Abolhasani, M., M., Shirvanimoghaddam, K., Naebe, M., (2016), PVDF/graphene composite nanofibers with enhanced piezoelectric performance for development of robust nanogenerators, *Composites Science and Technology* 138.

[206] Abbasipour, M., Khajavi, R., Yousefi, A. A., Yazdanshenas, M. E., & Razaghian, F. (2017). The piezoelectric response of electrospun PVDF nanofibers with graphene

oxide, graphene, and halloysite nanofillers: a comparative study. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 15942-15952.

[207] Gebrekrstos, A., Madras, G., & Bose, S. (2018). Piezoelectric response in electrospun poly (vinylidene fluoride) fibers containing fluoro-doped graphene derivatives. *ACS omega*, 3(5), 5317-5326.

[208] Shi K., S., Karan, K., S., Paria, S., Maitra, A., (2018). A strategy to develop an efficient piezoelectric nanogenerator through ZTO assisted γ -phase nucleation of PVDF in ZTO/PVDF nanocomposite for harvesting bio-mechanical energy and energy storage application, *Materials Chemistry and Physics* 213

[209] Roy, K., Sultana, A., Grosh Kumar, S., Garain, S., (2019). A Self-powered Wearable Pressure Sensor and Pyroelectric Breathing Sensor Based on GO Interfaced PVDF Nanofibers, *ACS Applied Nano Materials* 2(4).

[210] Chamankar, N., Khajavi, R., Yousefi, A. A., Rashidi, A., & Golestanifard, F. (2020). A flexible piezoelectric pressure sensor based on PVDF nanocomposite fibers doped with PZT particles for energy harvesting applications. *Ceramics International*, 46(12), 19669-19681.

[211] Tiwari, S., Gaur, A., Kumar, C., & Maiti, P. (2020). Retracted Article: Electrospun hybrid nanofibers of poly (vinylidene fluoride) and functionalized graphene oxide as a piezoelectric energy harvester. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(5), 2469-2479.

[212] Ünsal, Ö. F., Altın, Y., & Çelik Bedeloğlu, A. (2020). Poly (vinylidene fluoride) nanofiber-based piezoelectric nanogenerators using reduced graphene oxide/polyaniline. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(13), 48517.

[213] Yang, S., Cui, X., Guo, R., Zhang, Z., Sang, S., & Zhang, H. (2020). Piezoelectric sensor based on graphene-doped PVDF nanofibers for sign language translation. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 11(1), 1655-1662.

[214] Zeyrek Ongun, M., Oguzlar, S., Doluel, E. C., Kartal, U., & Yurddaskal, M. (2020). Enhancement of piezoelectric energy-harvesting capacity of electrospun β -PVDF nanogenerators by adding GO and rGO. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 1960-1968.

[215] Zheng, Q., Li, Z., Yang, J., & Kim, J. K. (2014). Graphene oxide-based transparent conductive films. *Progress in Materials Science*, 64, 200-247.

- [216] Jin, L., Zheng, Y., Liu, Z., Li, J., (2020), Enhancement of β -Phase Crystal Content of Poly(vinylidene fluoride) Nanofiber Web by Graphene and Electrospinning Parameters, Chinese Journal of Polymer Science (English Edition) 38(11).
- [217] Hasanzadeh, M., Ghahhari, M. R., & Bidoki, S. M. (2021). Enhanced piezoelectric performance of PVDF-based electrospun nanofibers by utilizing in situ synthesized graphene-ZnO nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(12), 15789-15800.
- [218] Li, X., Ji, D., Yu, B., Ghosh, R., He, J., Qin, X., & Ramakrishna, S. (2021). Boosting piezoelectric and triboelectric effects of PVDF nanofiber through carbon-coated piezoelectric nanoparticles for highly sensitive wearable sensors. *Chemical Engineering Journal*, 426, 130345.
- [219] Ramasamy, M. S., Rahaman, A., & Kim, B. (2021). Effect of phenyl-isocyanate functionalized graphene oxide on the crystalline phases, mechanical and piezoelectric properties of electrospun PVDF nanofibers. *Ceramics International*, 47(8), 11010-11021.
- [220] Su, Y., Liu, Y., Chunxu, C., Weixiong, L., (2021), Piezoelectric Fiber Composites with Polydopamine Interfacial Layer for Self-powered Wearable Biomonitoring, *Nano Energy* 89:106321.
- [221] Adaval, A., Chinya, I., Bhatt, B. B., Kumar, S., Gupta, D., Samajdar, I., ... & Bhattacharyya, A. R. (2022). Poly (vinylidene fluoride)/graphene oxide nanocomposites for piezoelectric applications: Processing, structure, dielectric and ferroelectric properties. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 31, 100899.
- [222] Chen, G., Chen, G., Pan, L., & Chen, D. (2022). Electrospun flexible PVDF/GO piezoelectric pressure sensor for human joint monitoring. *Diamond and Related Materials*, 129, 109358.
- [223] Ahmed, A., Jia, Y., Deb, H., Arain, M. F., Memon, H., Pasha, K., ... & Shao, J. (2022). Ultra-sensitive all organic PVDF-TrFE E-spun nanofibers with enhanced β -phase for piezoelectric response. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(7), 3965-3981.
- [224] Paralı, L., Tatardar, F., Koç, M., Sarı, A., & Moradi, R. (2024). The piezoelectric response of electrospun PVDF/PZT incorporated with pristine graphene nanoplatelets

for mechanical energy harvesting. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(1), 1-15.

[225] Gültekin N, Usta İ, Yalçın B. (2020). Green Reduction of Graphene Oxide Coated Polyamide Fabric Using Carob Extract. *AATCC Journal of Research*, 7(6):33-40.

[226] Aslam, M., Kalyar, M. A. ve Raza, Z. A., (2016) Synthesis and structural characterization of separate graphene oxide and reduced graphene oxide nanosheets. *Materials Research Express*, 3(10), 105036.

[227] Na M., Rebecca C. E. P., Yanqiu Z., Huanting W., Xiwang Z., (2016). The Effect of Reduction Degree of GO Nanosheets on Microstructure and Performance of PVDF/GO Hybrid Membranes, *Journal of Membrane Science*, Volume 501, Pages 169-178.

[228] Rahman M. A., Lee B. C., Phan D.T. and Chung G. S., (2013). Fabrication and Characterization of Highly Efficient Flexible Energy Harvesters Using PVDF–Graphene Nanocomposites, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, Number 8.

[229] Shao F., Bian S. W., Zhu Q., Guo M. X., Liu S. and Peng Y. H., (2016). Fabrication of Polyaniline/Graphene/Polyester Textile Electrode Materials for Flexible Supercapacitors with High Capacitance and Cycling Stability, *Chemistry- An Asian Journal*, 11: 1906-12.

[230] Rathinamoorthy R. and Raja Balasaraswathi S., (2022). Effect of Surface Modification of Polyester Fabric on Microfiber Shedding from Household Laundry, *International Journal of Clothing Science and Technology*, ahead-of-print.

[231] Ouadil B., Cherkaoui O., Safi M. and Zahouily M., (2017). Surface Modification of Knit Polyester Fabric for Mechanical, Electrical and UV Protection Properties by Coating with Graphene Oxide, Graphene and Graphene/Silver Nanocomposites, *Applied Surface Science*, 414: 292-302.

[232] Emiru, T. F. and Ayele, D. W., (2019). Controlled Synthesis, Characterization and Reduction of Graphene Oxide: A Convenient Method for Large Scale Production, *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4, 74-79

[233] Roy K., Ghosh S. K., Sultana A., Garain S. Xie, M., Henkel, K. and et.al., (2019). A Self-Powered Wearable Pressure Sensor and Pyroelectric Breathing Sensor Based on GO Interfaced PVDF Nanofibers, *ACS Applied Nano Materials*, 2(4).

- [234] Fu R., Chen S., Lin Y., He Y. and Gu Y., (2016). Preparation and Piezoelectric Investigation of Electrospun Polyvinylidene Fluoride Fibrous Membrane, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(12):12337-12343.
- [235] Saygh A. A., Ponnammma D., El Ma'adeed M. A., Vijayan P., Karim A. and Hasan M. K., (2017). Flexible Pressure Sensor Based on PVDF Nanocomposites Containing Reduced Graphene Oxide-Titania Hybrid Nanolayers, *Polymers*, 9(2):33,
- [236] Ahmed A. I., Mariam Al A. S. Al-M., Miroslav M. and Adrian S. L., (2016). Electrospun PVDF Graphene Oxide Composite Fibre Mats with Tunable Physical Properties, *Journal of Polymer Research*, 23(11).
- [237] Bayramol Vatansever D., (2014). Piezoelektrik Akıllı Malzemeler ve Tekstilde Kullanımları, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8 (3) : 61-67.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Gül ÖZKAN

Eğitim Bilgileri

Yüksek Lisans, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Anabilim Dalı Tekstil Eğitimi (YL) (Tezli), İstanbul, Türkiye 2016.

Lisans, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Tekstil Teknoloji Öğretmenliği Bölümü, İstanbul, Türkiye 2007.

Ön Lisans, Trakya Üniversitesi, Lüleburgaz Meslek Yüksekokulu, Tekstil Programı, Kırklareli, Türkiye 2003.

Lise, Çemberlitaş Anadolu Lisesi, İstanbul, Türkiye 2001.

Yaptığı Tezler

Yüksek Lisans, Klasik Erkek Ceket Üretiminde Kullanılan Yardımcı Malzemelerin Ceketin Termal Konforuna Etkisinin Analiz Edilmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Anabilim Dalı Tekstil Eğitimi (YL) (Tezli), 2016.

İş Deneyimi

Öğretim Görevlisi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı Programı, Şubat 2011 - Devam Ediyor.

Proto Uzmanı, Atateks Örme Tekstil Sanayi Limited Şirketi, İstanbul, Türkiye, 2008.