



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



POLİMERLERİN
ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİYLE
GERİ DÖNÜŞÜMÜ
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Asım ÜSTÜN

Ekim-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Asım ÜSTÜN tarafından hazırlanan “Polimerlerin Elektroegirme Yöntemiyle Geri Dönüşümü ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat YILDIRIM

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Üye

Doç. Dr. Mehmet Okan ERDAL

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Asım ÜSTÜN

Tarih:

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİMERLERİN ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİYLE GERİ
DÖNÜŞÜMÜ ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Asım ÜSTÜN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

2025, 61 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Doç. Dr. Mehmet Okan ERDAL

Prof. Dr. Murat YILDIRIM

Bu tez çalışmasında, polimer atıklarından katma değerli ürünler elde etmek amacıyla geri dönüştürülmüş akrilik elyafın (orlon) elektroegirme yöntemiyle karbon elyaf öncüsü olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir kaynak olan geri dönüştürülmüş akrilik elyaftan üretilen nanoliflerin mekanik performansını, endüstri standardı olan saf poliakrilonitril (PAN) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bu kapsamda, saf PAN ve geri dönüştürülmüş akrilik elyaf, N,N-dimetilformamid (DMF) içerisinde çözülerek %10'luk polimer çözeltileri hazırlanmış ve sabit proses parametreleri (15 kV gerilim, 1 mL/saat akış hızı, 13-14 cm mesafe) altında elektroegirme yöntemiyle nanolif matları üretilmiştir. Üretilen nanoliflerin morfolojik, kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), X-Işını Difraksiyonu(XRD) ve çekme testi ile karakterize edilmiştir. Elde edilen bulgular, geri dönüştürülmüş akrilik elyaftan başarılı bir şekilde nanolif üretilebildiğini, ancak saf PAN'a kıyasla daha heterojen bir lif morfolojisi sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar, geri dönüştürülmüş akriliğin maliyet etkinliği sayesinde, havacılık gibi ultra yüksek performans gerektiren kompozit, filtrasyon ve enerji depolama gibi endüstriyel uygulamalar için potansiyel bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektroegirme, Poliakrilonitril (PAN), Mekanik Özellikler, Akrilik Elyaf, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

MS THESIS

RECYCLING OF POLYMERS VIA ELECTROSPINNING METHOD AND EXAMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES

Asım ÜSTÜN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN NANOSCIENCE AND NANOENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Year, 61 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Okan ERDAL

Prof. Dr. Murat YILDIRIM

In this thesis, the potential utilization of recycled acrylic fiber (Orlon) as a carbon fiber precursor through the electrospinning technique was comprehensively investigated with the aim of producing value-added materials from polymer waste. The primary objective of the study is to evaluate, in a comparative manner, the mechanical performance of nanofibers fabricated from recycled acrylic fiber—a low-cost and sustainable feedstock—against that of virgin polyacrylonitrile (PAN), the conventional industrial standard for carbon fiber precursors. To this end, 10 wt% polymer solutions were prepared by dissolving pure PAN and recycled acrylic fiber in *N,N*-dimethylformamide (DMF). Nanofiber mats were subsequently fabricated via electrospinning under constant process parameters (applied voltage: 15 kV, flow rate: 1 mL/h, tip-to-collector distance: 13–14 cm). The morphological, chemical, and mechanical characteristics of the obtained nanofibers were systematically characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Diffraction (XRD), and tensile testing. The results demonstrated that nanofibers can be successfully produced from recycled acrylic fiber, though exhibiting a relatively more heterogeneous morphology compared to those derived from pure PAN. Nonetheless, the findings indicate that due to its economic and environmental advantages, recycled acrylic fiber represents a promising alternative precursor material for applications in composites, filtration systems, and energy storage devices, where ultra-high performance (such as aerospace-grade) properties are imperative.

Keywords: Electrospinning, Polyacrylonitrile (PAN), Recycling, Carbon Fiber, Mechanical Properties, Acrylic Fiber, Sustainability.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmasında polimerlerin elektroğirme yöntemiyle geri dönüşümü ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yüksek Lisans eğitimim süresince bilgisi ve yardımları ile bana destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN'e, engin tecrübesi ile tüm laboratuvar imkanları ile bana yardımcı olan Doç. Dr. Mehmet Okan ERDAL'a ve test aşamasında destek veren Prof. Dr. Erdal KOCABAŞ'a, Doç. Dr. Hasan ULUS'a ve başta bana her anlamda yardımcı olan ablam ve hocam Dr. Öğr. Üyesi Zeliha ÜSTÜN ARGON olmak üzere tez süresi boyunca benden desteklerini esirgemeyen sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Asım ÜSTÜN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Polimerler ve Geri Dönüşümün Önemi	4
2.2. Elektroeğirme Teknolojisi	5
2.2.1. Elektroeğirmeyi etkileyen parametreler.....	6
2.3. Elektroeğirme ile Geri Dönüştürülmüş Polimerlerin Potansiyeli	11
2.4. Geri Dönüştürülmüş Polimerlerin Elektroeğirme ile Nanoelyaflara Dönüştürülmesi.....	11
2. 5. Geri Dönüştürülmüş Polimerlerin Kullanımı	12
2.6. PAN ve Akrilik Elyafın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	13
2.6.1 PAN	13
2.6.2. Akrilik Elyaf (Orlon)	13
2.7. Elektroeğirilmiş Polimerlerin Mekanik Özellikleri	14
2.8. Polimer Geri Dönüşüm Yöntemleri	15
2.8.1 Termal geri dönüşüm yöntemleri.....	15
2.8.1.1. Yakma (incinere etme) veya enerji geri kazanımı	15
2.8.1.2. Akışkan yatak	16
2.8.1.3. Piroliz.....	16
2.8.2. Kimyasal geri dönüşüm yöntemleri.....	17
2.8.2.1.Solvöliz	17
2.8.2.2. Yüksek konsantrasyonlu asit	17
2.8.2.3. Hidroliz	18
2.8.2.4. Mekanik geri dönüşüm	18
2.8.2.5. Boyut küçültme.....	18
2.8.2.6. Yüksek gerilimle parçalama	19
2.9. Elektroeğirilmiş Polimerlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal	22
3.2. Metot.....	22
3.2.1. Numunenin hazırlanması	22
3.2.2. Elektroeğirme Sistemi.....	23

3.2.3. Tek Taraflı Bindirmeli Yapışkanlı (Single Lap Joint) ve Mod-I Tabakalar Arası Tokluk Testi Numunelerinin Hazırlanması.....	24
3.2.4. Karakterizasyon Yöntemleri	26
3.2.4.1. SEM	26
3.2.4.2. FTIR.....	26
3.2.4.3. XRD	26
3.2.4.4. Çekme Deneyleri	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR.....	28
4.1.SEM Sonuçları.....	28
4.2.FTIR Sonuçları	31
4.3. XRD Sonuçları.....	33
4.4. Çekme Deneyi Sonuçları	34
4.5. Çekme Deneyi Numunelerinin Makroskobik İncelenmesi.....	37
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	40
5.1. Temel Bulgular ve Bilimsel Değerlendirmesi	40
5.2.Çalışmanın Literatüre Katkısı	41
5.3. Çalışmanın Ana Sonuçları	41
6. KAYNAKLAR	44

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektroëirme düzeneği	6
Şekil 3.1. Hazırlanan elektroëirme sistemi	23
Şekil 3.2. Zımparalanıp asetonla temizlenen karbon fiber kompozitler	24
Şekil 3.3. Epoksinin karbon fiber kompozitin bağlantı noktasına uygulanması	25
Şekil 3.4. Numunelerin kütleme işlemi için alüminyum ısıtıcılı masada bekletilmesi ..	25
Şekil 4.1. PAN nanofiber materyalin SEM görüntüsü	28
Şekil 4.2. Grafen katkılı PAN nanofiber materyal SEM görüntüsü	29
Şekil 4.3. Orlondan üretilen nanofiber materyal SEM görüntüsü	30
Şekil 4.4. Grafen katkılı orlondan üretilen nanofiber materyal SEM görüntüsü	31
Şekil 4.5. Hazırlanan numunelerin FTIR grafikleri	32
Şekil 4.6. Numunelerin XRD spektrumları	33
Şekil 4.7. Hazırlanan çekme deneyi numunelerinin yük-yer değiştirme grafiği	35
Şekil 4.8. Çift konsol kiriş (DCB) deneyinin yük-yer değiştirme grafiği	36
Şekil 4. 9. Çekme deneyi sonucu oluşan bağlantı hataları	38
Şekil 4. 10. DCB deneyinde oluşan bağlantı hataları	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

g	Gram
cm³	Santimetre küp
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
°C	Derece Celcius

Kısaltmalar

BuOH	n-bütanol
CNT	Karbon nanotüpler
DCB	Çift konsol kiriş testi
DCM	Diklorometan
DMC	Hamur kalıplama bileşiği
DMF	Dimetilformamid
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
GO	Grafen oksit
HVF	Yüksek gerilimle parçalama
KOH	Potasyum hidroksit
NaOH	Sodyum hidroksit
PAN	Poliakrilonitril
PE	Polietilen
PLA	Polilaktik asit
PLLA	Poli(L-laktik asit)
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PTFE	Politetrafloroetilen
PVA	Polivinil alkol
PVAc	Polivinil asetat
PVC	Polivinil klorür
PVP	Polivinil pirolidon

PU	Poliüretan
rGO	İndirgenmiş grafen oksit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SMC	Kompozit levha kalıplama
XRD	X-Işınları Difraktometresi



1.GİRİŞ

Polimerler, yüksek molekül ağırlıklı organik bileşiklerdir. Polimerlerin en küçük birimleri monomer olarak adlandırılmakta ve polimerler monomerlerin uzun zincirler halinde tekrarlanması ile oluşmaktadır. Doğal ve sentetik olarak sınıflandırılabilen polimerlerden kauçuk, selüloz gibi bileşenler yüzyıllardır farklı amaçlarla kullanılmaktadırlar. 20. Yüzyılın ortalarında keşfedilen sentetik polimerler ise üretim sektöründe ciddi anlamda farklılıklar oluşturmuştur. Tüketici tercihlerini de büyük ölçüde değiştiren polimerlerden en sık tercih edilenler polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC) ve politetrafloroetilen (PTFE)'dir. Bu materyaller otomotiv, tekstil, ambalaj, inşaat, tıp alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir (Andrady ve Neal, 2009).

Polimerler pek çok özelliği ile farklı sektörlerde oldukça fazla tercih edilen materyaller arasında yer almaktadır. Üretim proseslerinin uygulanabilirliği, maliyetlerin düşük olması ve son ürünün kullanımındaki kolaylıklar avantaj sağlarken, doğada zor parçalanmaları, kirlilik oluşturmaları, mikroplastik salınımı gibi dezavantajları ile çevrenin sürdürülebilirliği anlamında da pek çok soru işaretini de beraberinde getirmektedir (Jambeck vd., 2015). Tüm yönleri ile alındığında polimerlerin geri dönüşümü hem çevre hem de finansal açıdan büyük önem arz etmektedir (Hopewell vd., 2009).

Atık malzemelerin yeniden kullanılarak hammaddeye dönüştürülmesi prosesi geri dönüşüm olarak tanımlanır. Başta atık oranını düşürmesinin yanı sıra, enerji tasarrufu sağlaması ve yeni polimerlerin üretimi esnasında kullanılan fosil yakıt miktarının azaltılması nedeni ile polimerlerde geri dönüşüm tercih edilmektedir (Geyer vd., 2017). Polimer atıkları yeniden işlenirken atığın kirlilik durumu, finansal konular ve atığın tipi gibi faktörlere bağlı olarak kimyasal, mekanik ve enerji geri dönüşümü olarak adlandırılan üç farklı yöntem uygulanabilmektedir (Al-Salem vd., 2009). Bu yöntemlerden kimyasal geri dönüşüm, polimerlerin yapıtaşları olan monomere veya yakıt benzeri ürünlere dönüştürülmesini sağlar ve kirli atıklar için daha uygundur. Diğer bir yöntem olan mekanik geri dönüşüm, yeni ürünlerin üretilebilmesi için atıkların yıkanması, daha küçük parçalara ayrılması ve yeniden eritilmesi aşamalarını içerir. Malzeme özelliklerinde geri dönüşümsüz değişimler olabilir fakat polimer geri dönüşüm metotları içinde en çok tercih edilen yöntem budur. Son yöntem olan enerji geri dönüşümünde ise, polimer atıklar yakılarak enerji elde edilir. Burada yakma esnasında

ortama salınan gazlar çevresel anlamda sorunlara yol açabilir (Ragaert vd., 2017). Bahsedilen yöntemlerde, uygulanan teknolojilerin gelişmesi ile birlikte, polimerlerin özelliklerinde bir değişim olmadan yeniden değerlendirilebilmeleri mümkün olmaktadır. Özellikle biyobozunur polimer ürünler ve geri dönüşümleri konusunda yapılan çalışma sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu tür malzemeler, tek kullanımlık ürünlerde tercih edilmekte, PLA gibi polimerler çevre dostu bir alternatif sunmaktadır (Song vd., 2009).

Polimerlerin yeniden kullanılabilmesi amacı ile gerçekleştirilen bilimsel araştırmalar, kimya ve çevre mühendisliği ile malzeme bilimi merkezli olarak ilerlemektedir. Çalışmalar; geri dönüşümde verimliliğin artırılması, çevre dostu ve ekonomik süreçlerin oluşturulması noktalarına yoğunlaşmaktadır (Ragaert vd., 2017). Yeni nesil polimerlerin geliştirilmesi, geri dönüştürülebilirlik düzeyinin artırılması amacı ile nano-teknoloji ve biyoteknolojiden de destek alınmaktadır (Shen vd., 2009). Günümüzde çevresel kaygılar ve sürdürülebilir üretim yaklaşımları doğrultusunda, geri dönüşüme uygun malzemelerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin çeşitli endüstriyel alanlarda değerlendirilmesi büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda, sentetik polimerlerden elde edilen nanoelyaflar, sahip oldukları yüksek yüzey alanı/hacim oranı, düşük yoğunluk ve iyi mekanik özellikler sayesinde birçok alanda kullanım potansiyeli taşımaktadır (Bhardwaj ve Kundu, 2010). Bu anlamda nanoteknoloji uygulamaları büyük önem kazanmaktadır. Nanoteknoloji, 1–100 nanometre aralığındaki yapıların özelliklerini inceleyen ve uygulamaya dönüştüren çok disiplinli bir bilim dalıdır. Bu alandaki gelişmeler sayesinde, malzemelerin yüzey alanı, mekanik dayanımı, biyolojik etkileşimi ve fonksiyonel özellikleri yeni boyutlar kazanmıştır. Nano ölçekte lif üretimi için öne çıkan yöntemlerden biri olan elektroğirme (electrospinning), polimer çözeltilerine yüksek gerilim uygulanarak yüzey üzerinde nanoelyaf yapılar oluşturulmasını sağlayan yenilikçi bir tekniktir. Bu yöntemle elde edilen nanolifler; tıp, gıda ambalajı, tekstil, çevre mühendisliği ve biyomedikal uygulamalar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Elektroğirme yönteminde, polimer çözeltisi veya eriyiğine elektrik alan uygulanmasıyla elyafların yüzey üzerinde toplanmasını sağlanmaktadır. Besleyici ünitesi, kolektör ve yüksek gerilim kaynağından oluşmaktadır. Elektroğirme sürecinde lif morfolojisini belirleyen birçok parametre bulunmaktadır. Çözeltinin konsantrasyonu, polimerin moleküler ağırlığı, uygulanan gerilim, akış hızı, nozül-toplayıcı mesafesi, ortam sıcaklığı ve nem gibi faktörler lif kalitesini ve yapısını doğrudan etkiler. Ayrıca, çözücü seçimi, özellikle uçuculuk, viskozite, iletkenlik ve yüzey gerilimi gibi özellikleri,

lifin oluşumu sırasında katılaşma davranışını ve gözeneklilik gibi mikro-yapısal özellikleri belirler. Uygulanan gerilimle polimer çözeltisinin yüzey gerilimi aşarak jet akışı sağlanır, bu da düzgün, boncuksuz ve istenilen çapta lifler elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Gelişmiş nozül sistemleri (örneğin koaksiyel ve çok kanallı nozüller) sayesinde, çekirdek-kabuk, içi boş veya çok kanallı lif yapıları da üretilebilmektedir. Bu tür kompleks yapılar, özellikle ilaç salınımı, yara örtüsü geliştirme, aktif bileşen taşıyıcı sistemleri gibi biyomedikal alanlarda yüksek potansiyele sahiptir. Elektroegirme teknolojisi; parametrelerin dikkatli kontrolü ve doğru polimer/bileşen seçimiyle birlikte, modern malzeme tasarımında hem akademik hem de endüstriyel düzeyde etkili çözümler sunmaktadır.

Polimerlerin insan yaşamına kattığı kolaylıklar göz ardı edilemez. Fakat bu malzemelerin doğaya ve kaynaklara olan zararları minimize etmek için alternatif malzeme ve teknolojilerin bilimsel bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir (Hopewell vd., 2009). Bu tez çalışmasının amacı, geri dönüşüm odaklı olarak PAN esaslı nanoelyafların üretimini gerçekleştirmek ve bu elyafların karbonize edilerek elde edilen karbon elyafların mekanik özelliklerini incelemektir. Elyaf üretiminde kullanılacak olan PAN, yüksek kararlılığı ve karbonizasyon verimi nedeniyle karbon elyaf üretiminde tercih edilen önemli polimerlerden biridir. Bu çalışma ile, hem geri dönüştürülebilir sentetik polimerlerin değerlendirilmesi hem de karbon elyafların mekanik performansına yönelik bilimsel veri sunulması hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında havacılık, gıda, çevre gibi pek çok endüstride oldukça sık kullanılan malzemelerden biri olan PAN ile daha kolay temin edilebilen ve maliyeti daha düşük akrilik elyaf malzemedan elde edilen nanoliflerin mekanik özellikleri karşılaştırılmış, geri dönüşüm malzemelerin kullanım potansiyellerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Polimerler ve Geri Dönüşümün Önemi

Son yıllarda toplumda plastik ve polimer kullanımında önemli bir artış yaşanmıştır. Hunt vd., (2015), çağdaş toplumda plastik kullanımının teknolojik gelişmeler ve nüfus artışı nedeniyle yükseldiğini bildirmektedir. Son yıllarda plastik üretimi yaklaşık %500 oranında arttığı tespit edilmiştir. Karimi vd., (2024) ise, Petrol türevli plastiklerin büyük çoğunluğunun doğada parçalanamadığı ve bunun da artan petrol tüketimi ile çevre kirliliğine yol açtığı öne sürülmektedir. Ayrıca, plastiklerin bertarafında kullanılan yöntemlerin sürdürülebilir olmadığı ve çevreye olumsuz etkiler oluşturduğu belirtilmektedir.

Plastikler için dört geri dönüşüm türü tanımlanmıştır: Birincil (yeniden ekstrüzyon), ikincil (mekanik), üçüncül (kimyasal) ve dördüncül (enerji geri kazanımı) (Tsuchimoto ve Kajikawa, 2022). Birincil geri dönüşüm yönteminde, plastikler, ham plastiğe benzer performans özelliklerine sahip ürünlere dönüştürülmektedir; örneğin, tüketici sonrası PET şişelerden yeni PET şişelerin üretilmesi gibi. Karışık poliolefinlerden yapılmış fayanslar gibi ikincil geri dönüşümde elde edilen ürünlerin ham plastiklere göre daha düşük performans özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur (Klotz vd., 2023; Maraveas vd., 2024).

Plastik ürünlerin çok yönlü kullanımı, son yıllarda plastik üretim hacminde hızlı bir artışı tetiklemiş olup bu miktar artmaya devam etmektedir. 2014 yılında dünya genelinde yaklaşık 311 milyon ton plastik üretildiği ve bu üretimin küresel petrol üretiminin %6'sını tükettiği bildirilmektedir. Dünya plastik üretimi 2017 yılında 350 milyon tona ve 2019 yılında 368 milyon tona ulaşmıştır. Ancak plastikleri bu denli kullanışlı kılan aynı özellikler, eğer uygun şekilde yönetilmezlerse, artan plastik atık miktarını ciddi bir çevresel tehdit haline getireceği öngörülmektedir. Avrupa'da, 2006–2018 yılları arasında geri dönüşüme gönderilen plastik atık miktarı iki katına çıkmış olsa da 2018 yılında plastik tüketim sonrası atıkların %25'i (yani 7,2 milyon ton) hâlâ düzenli depolama sahalarında tutulmaktadır. Mevcut projeksiyonlara göre, 2015 yılında 4,9 milyar ton olan plastik atık miktarının 2050 yılına kadar 12 milyar tona ulaşarak çöp biriktirme alanlarında tutulacağı veya doğal çevreye karışacağı öngörülmektedir. Ayrıca, 2010–2025 yılları arasında 100 milyon ton plastik atığın deniz ortamına karışacağı ve burada yavaşça parçalanarak mikroplastiklere dönüşeceği tahmin edilmektedir. Bu

nedenle, plastik atıkların toplanması ve işlenmesi sorunu ile, ticari plastiklerin büyük çoğunluğunun yenilenemez kaynaklı olması, akademik ve endüstriyel çalışmaları son dönemde daha sürdürülebilir ve benzer performansa sahip alternatiflere yönlendirmiştir (Fredri ve Dorigato, 2021).

2.2. Elektroeğirme Teknolojisi

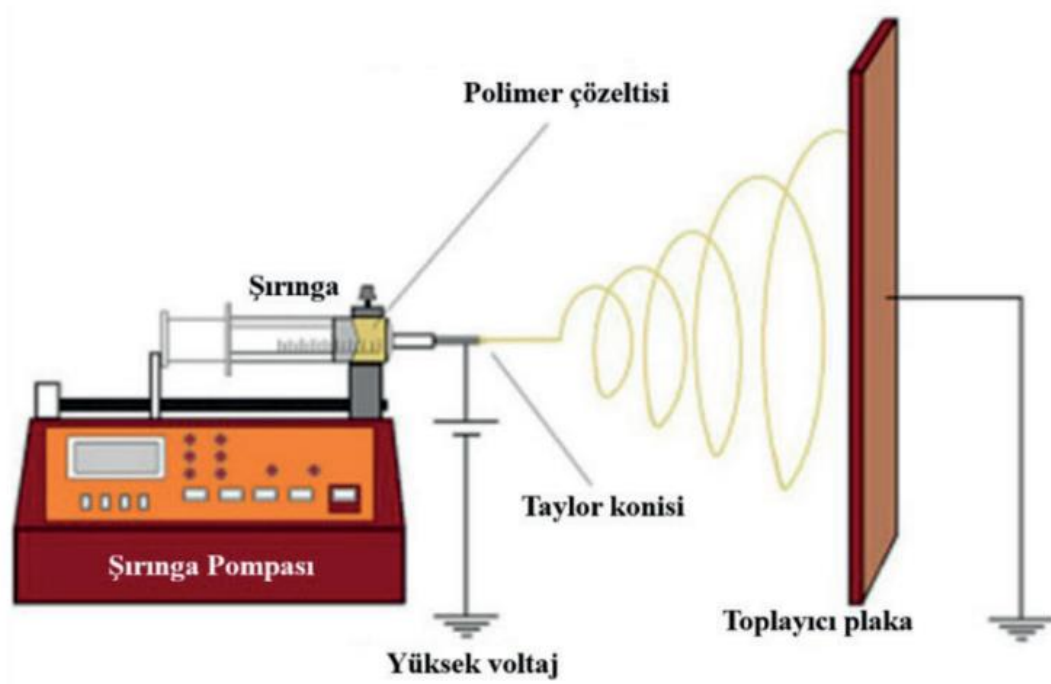
Nanoteknoloji 1-100 nanometre civarında malzeme yapısını ve özelliklerini izleyen bir bilim dalıdır. Tarihsel sürece bakıldığında 1981 yılında Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer tarafından geliştirilen taramalı tünelleme mikroskopuyla beraber 1-100 nm arasındaki yapıların incelenmeye başlandığı görülmektedir (Bayda v.d., 2019).

Nanoelyaflar, belirli bir boy/çap oranına sahip doğrusal malzemelerdir. Ayrıca sıradan liflerin içine katılan parçacıklar da nanoelyaf olarak kabul edilmektedir. Normal şartlarda nanoteknolojinin incelenme aralığı 1-100 nm olsa da 1000 nm altında incelenen elyaflar da nanoelyaf olarak değerlendirilmektedir. Nanoelyafların yapıları gereği savunma sanayi, tıp, yüksek mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanları bulunmaktadır.

Elektroeğirme yöntemi, polimer çözeltisi veya eriyiğine elektrik alan uygulanmasıyla elyafların yüzey üzerinde toplanmasını sağlayan bir yöntemdir. Genel olarak 3 temel kısımdan oluşmaktadır.

1. Besleyici ünitesi (Genelde şırınga pompası ve şırıngadan oluşmakta)
2. Toplayıcı
3. Yüksek gerilim kaynağı (Yüksek gerilim, düşük akımlı)

Şırınga ucuna bağlanan yüksek gerilimle şırınga ucunda taylor konisi oluşmakta ve oluşan elyaf toplayıcı üzerinde birikmektedir. Elektroeğirme esnasında yüksek elektriksel kuvvet, polimer çözeltisinin yüzey gerilimini yenerek polimer jetlerinin oluşmasını sağlamaktadır. Elektriksel kuvvet ve yüzey geriliminin etkisiyle, birden fazla jet oluşumu ve bunun yanı sıra çözücünün buharlaşmasıyla birlikte lif oluşumu gözlemlenmektedir.



Şekil 2.1. Elektroeğirme düzeneği (Çeliközlü, 2023)

2.2.1. Elektroeğirmeyi etkileyen parametreler

Elektroeğirme üretim sürecinde aşağıdaki parametreler süreci ve sonuç olarak elde edilen elyafların morfolojik özelliklerini etkilemektedir. Bunlar; damlacık toplaç arasındaki mesafe, çözeltinin konsantrasyonu, polimerin moleküler ağırlığı, uygulanan gerilim, akış hızı, sıcaklık, nem, nozül ve çözünürlük değerleridir.

Her bir parametre sırasıyla incelenmiş ve literatürde geçen etkileri aşağıdaki gibi rapor edilmiştir.

Elektroeğirmede nozül ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe elektrik alan şiddetini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla eğirme mesafesi; jetin çekilme miktarını, hareket güzergahını ve katılma sürecini etkiler. Bu faktörlere bağlı olarak elde edilen lifin morfolojisini ve yapısı belirlenir. PVA nanolif membranları elektroeğirme ile üretildiği ve nozül toplaç mesafesinin lif yapısına etkisinin araştırıldığı bir çalışmaya göre; mesafe kısa olduğunda elektrik alan şiddeti yüksek olmasına rağmen çözücü tamamen buharlaşmadığı için lifler arasında boncuklanma görülmüştür (Supaphol ve Chuangchote, 2008). Zhang vd., (2012) ipek serisin liflerini elektroeğirme ile üretmiş ve eğirme mesafesinin lif morfolojisine etkisi incelemiştir. Mesafelere göre hem boncuklu hem düz

lifler elde edilmiş ve bu yapı farkının, elektrik alan şiddeti ve elektrostatik kuvvetin değişiminden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Çözeltinin konsantrasyonu; viskoziteyi ve yüzey gerilimini etkilediği için lif oluşumunda önem arz etmektedir. Yüksek konsantrasyonlu çözeltiler şırıngada tıkanmalara sebep olurken, düşük konsantrasyonlu çözeltilerde de boncuk yapıları (beads) oluşmaktadır. Bu nedenle optimum konsantrasyonlu çözeltiyi bulmak gerekir (Wang ve Qin, 2024).

Polimerin moleküler ağırlığının, çözeltinin viskozitesi, yüzey gerilimi, iletkenliği ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, polimerin moleküler ağırlığı elektroğirme ile elde edilen liflerin yapısını doğrudan etkilemektedir (Wang ve Qin, 2024). Koski vd., (2004) polivinil alkol (PVA) polimerinin moleküler ağırlığına göre lif yapısındaki değişimi elektroğirme yöntemiyle incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre; 9000–13000 g/mol moleküler ağırlığında, ip üzerinde boncuk (bead-on-string) yapısı gözlemlenmiştir. Moleküler ağırlık 13000–23000 g/mol aralığına çıktığında, düzenli ve düzgün lif yapısı elde edilmiştir. 31000–50000 g/mol aralığında ise lifler daha yassı (flat) bir yapı kazanmıştır.

Elektroğirme sürecinde uygulanan gerilim (voltaj), jetin çekilmesini sağlayan elektrostatik kuvveti oluşturmaktadır. Lif yapısını düzenlemek amacıyla gerilimi ayarlamaya yönelik çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Ancak, lif yapısının gerilimle nasıl değiştiğine dair net bir sonuç bulunmamaktadır (Wang ve Qin, 2024). Banikazemi vd., (2020) şekil hafızalı poliüretan lifleri 12kV, 14,5kV ve 17kV olmak üzere üç farklı gerilimde, 1,5 mL /saat sabit besleme hızında ve 21 cm şırınga ucu-toplaç mesafesinde elektroğirme yapmışlardır. Lif çapı; gerilim 12 kV'dan 17 kV'a artırıldıkça ilk olarak azalmış fakat daha sonra artmıştır. Artan voltajla oluşan yüksek elektrostatik kuvvet, çözeltinin yüzey gerilimini daha kolay aşarak jetin daha fazla gerilmesine neden olmuş, bu da lif çapının küçülmesine yol açmıştır. Ancak, çok yüksek voltaj, jetin havadaki hareket süresini kısaltmış, polimer zincirlerinin düzgün sıralanmasına yeterli zaman kalmamıştır. Bu da lif çapında artışa neden olmuştur.

Elektroğirme sürecinde akış hızı, genellikle nozül ucunda birim zamanda dışarı verilen polimer çözeltisi miktarını ifade etmektedir. Akış hızı, lif oluşumunun sürekliliği ve morfolojisi üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Akış hızı düşük olursa nozül ucunda yeterli çözelti oluşmadığı için taylor konisi oluşmaz. Bu durumda jet oluşumunda kesintiler ve elektroğirme sürecinde bozulmalar görülür. Akış hızı çok yüksek olursa fazla miktarda çözeltinin nozüle birikmesi sonucu, jet düzgün

çekilemeyebilir ve hatta çözelti doğrudan toplayıcıya püskürtülebilmektedir. Bu da çözeltinin yeterince kurumadan lif hâline gelmesine ve yapışkan, kalın, boncuklu lif yapılarının oluşmasına yol açmaktadır (Wang ve Qin, 2024). Vashisth vd. (2014), gellan sakızı ve PVA karışımından nanolifler üretmiş ve akış hızının lif yapısına etkisi araştırmıştır. Deneye göre akış hızı arttıkça liflerin çapının kademeli olarak arttığı görülmüştür. Özellikle yüksek akış hızlarında, fazla çözelti nedeniyle bazı kısımlar doğrudan toplayıcıya püskürtülmüş, bu da düzensiz lif oluşumuna neden olmuştur. Acik vd., (2019), PVAc içeren hidrofobik mikrolifler üretmiş, sonuçta yüksek akış hızlarında, kalın, boncuklu lif yapıları ve komşu lifler arasında yapışma gözlemlemişlerdir. Bu durumun nedeni, jetin yeterince çekilemeden ve kurumadan toplayıcıya ulaşması olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak düşük akış hızı yetersiz jet oluşumuna dolayısıyla kesikli eğirmeye sebep olmaktadır. Çok yüksek akış hızı ise kalın ve boncuklu lifler yani düşük kaliteli liflerin oluşmasına neden olmaktadır. Optimum akış hızı, çözelti özellikleri (viskozite, iletkenlik vb.), voltaj ve mesafe gibi diğer parametrelerle uyum içinde ayarlanmalıdır.

Sıcaklık ve nem, elektroegirme sürecinde kritik öneme sahip çevresel faktörlerdir. Sıcaklık ile çözücünün buharlaşma hızı ve polimer çözeltisinin viskozitesi etkilenmektedir. Diğer faktör olan nem ise, polimer çözeltisinin faz ayrımı ile kürlenme sürecini etkilemektedir. Dolayısı ile sıcaklık ve nem parametreleri nanolif oluşumunun kalitesini doğrudan etkiler (Wang ve Qin, 2024). De Vrieze vd., (2009), sıcaklık ve nem faktörlerinin elektro eğirme uygulanmış PVP nanoliflerinin oluşumu sürecindeki etkilerini incelemişlerdir. Suda çözünebilir PVP polimeri ortam nemi %60 seviyesindeyken çevredeki su buharını soğurmakta ve sonuç olarak istenilen kalitede nanolifler elde edilememiştir. Bunun yanında, ortam nemi %20'den %45'e çıkarıldığında jetin uzama süresi artmış, lif daha yavaş kürlenmiş ve sonuç olarak lif çapı kademeli olarak azalmıştır. Ayrıca, 283 K ve 303 K sıcaklıklarında oluşan liflerin çapı, 293 K'dekilere göre daha küçüktür. Sonuç olarak, düşük sıcaklıklarda jetin yavaş katılaşmasının ve uzama süresinin uzamasının liflerin incelmeye yol açabileceğini öne sürülmüştür. Buna karşılık, daha yüksek sıcaklıklarda polimer çözeltisinin viskozitesi azalmakta ve jetin uzama etkisi artmakta; bu da daha ince liflerin üretilmesini sağlamaktadır.

Elektroegirme sürecinde, lif yapısının istenilen özelliklerde elde edilmesinde nozül önemli etkenlerden biridir ve özellikli lifler elde edebilmek için farklı nozüller geliştirilmiştir. Koaksiyel (eş eksenli) nozül kullanılarak hazırlanan dış kabuk-iç çekirdek

yapısına sahip lifler bu çalışmalara örnek olarak verilebilir. Koaksiyel elektroegirmenin prensibi, geleneksel elektroegirme ile aynıdır; yüksek gerilim kaynağı, nozül ve alıcıdan oluşur. Nozül yapısı, koaksiyel elektroegirmenin diğer metotlardan ayrılmasını sağlar (Wang ve Qin, 2024). Zhao vd. (2007), çalışmalarında biyomimetik çok kanallı mikrotüpler üretmek için yeni bir çoklu sıvı bileşik-jet elektroegirme teknolojisi denemişlerdir. Üçlü metal kapiler nozül, koaksiyal egirme nozulüne benzer şekilde oluşturulmuştur. İç sıvı kapları ve elektrotlardan oluşan bu tasarımda, iç sıvı olarak parafin, dış sıvı olarak PVP'nin etanol çözeltisi ve $Ti(OiPr)_4$ kullanılmıştır. Elektroegirme işleminden sonra elde edilen lif membranlar, organik maddenin uzaklaştırılması için kalsinasyon işlemine tabi tutuldu. Sonuç olarak, üç kanallı TiO_2 mikrotüpler elde edildi. Ayrıca, çoklu sıvı bileşik-jet elektroegirme tekniği sayesinde iki ila beş kanallı mikrotüpler başarıyla geliştirildi. Zhao ve ekibi, deneysel parametrelerin ayarlanmasıyla altı veya daha fazla iç kanala sahip tüplerin de üretilebileceğini öne sürdüler.

Elektro egirme, çözelti yüzey gerilimi ve elektrostatik kuvvet arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, elektroegirilmiş (elektro-egirilmiş) lif yapısı, elektrostatik kuvvetin optimize edilmesiyle etkili bir şekilde ayarlanabilir. Elektroegirilmiş jetin (fışkıran sıvının) yüzeyindeki yük yoğunluğu, elektrostatik kuvvetin gücünü yansıtmaktadır. Elektroegirilmiş jetin yüzeyindeki yük yoğunluğunun artması elektrik alan şiddetinin güçlendirilmesi veya çözeltinin iletkenliğinin artırılması sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Günümüzde, elektrostatik kuvveti kontrol altına alarak elektroegirilmiş lif yapısını ayarlayabilmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar, çözeltinin iletkenliğini artırmak amacıyla çözeltiye organik/inorganik tuzlar veya iletken organik/inorganik maddeler eklemeyi; ya da egirme voltajını artırarak veya harici bir elektrik alan uygulayarak elektrik alan şiddetini optimize etmeyi kapsamaktadır (Wang ve Qin, 2024).

Gu vd., (2018), PU elektroegirme çözeltilerine NaCl ekleyerek PU lifli yapıyı oluşturmuştur. PU çözeltilerinin iletkenliği NaCl konsantrasyonlarının artmasıyla doğru orantılı olarak kademeli olarak artmıştır. NaCl eklenmiş PU liflerinin çapı, saf (orijinal) PU liflerine kıyasla belirgin şekilde daha düşük bulunmuştur. Tüm bunların bir sonucu olarak, çözelti iletkenliğindeki artışın, egirme jetinin kamçı benzeri hareketini yoğunlaştırdığı ve jetin gerilme etkisini artırmakta olduğu iddia edilmiştir.

Çözücünün karakteristik özelliklerinden çözünürlük değerleri, kaynama noktası, yüzey gerilimi, iletkenlik gibi parametreler, polimer çözeltilerinin iletkenlik, viskozite gibi özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Buradan yola çıkarak çözücünün, elektro-

eğrilmiş lifin yapısını etkili bir şekilde kontrol edebildiği iddia edilebilir (Wang ve Qin, 2024). Casasola vd., (2014), elektroēirilmiş PLA liflerinin yapısı üzerine çeşitli çözücülerin etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, çözücü olarak aseton kullanılarak hazırlanan nanoliflerin yeterli miktarda üretildiğini ve ortalama 757 nm çapa sahip boncuklu ip dizilimi yapısı gösterdiğini ortaya koymuştur. 1,4-dioksan ve tetrahidrofuran çözücü olarak kullanıldığında, süreksiz nanolifler ve damlacıklar oluşmuştur. Diklorometan ve kloroform çözücü olarak kullanıldığında ise elektroēirilmiş örneklerde çok az sayıda nanolif ve çok sayıda damlacık gözlenmiştir. Dimetilasetamid ve DMF ile hazırlanan numunelerde ise yalnızca damlacık yapısı meydana gelmiştir. Çözücülerin farklı özellikleri, lif yapılarındaki bu farklılıkları ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, karışık çözücü sistemlerinde çözücülerin bileşimi ve oranı, elektroēirilmiş lif yapısını etkileyerek polimer çözeltisinin iletkenliği, viskozitesi, yüzey gerilimi gibi özelliklerini değiştirebilmekte ayrıca eğirme jetinde faz ayırmasına da neden olabilmektedir. Elektroēirme sürecinde, çözücü ile çözücü olmayan maddenin buharlaşma hızlarındaki fark nedeniyle, polimer çözeltisi içinde polimer açısından yoğun ve seyreltik fazların faz ayrımı meydana gelmekte, bileşimi oluşturan çözücü ve çözücü olmayan materyallerin buharlaşmaya devam etmesi ile gözenekli yapılar oluşmaktadır. Qi vd., (2009), çözücü olarak yüksek uçuculukta DCM ve çözünmeyen madde olarak düşük çözücülükteki BuOH kullanarak gözenekli PLLA lifler elde etmiştir. Gözenekli liflerin oluşum süreci, PLLA–diklorometan–n-bütanol üçlü faz diyagramı kullanılarak analiz edilmiştir. DCM'nin buharlaşma sıcaklığı BuOH'tan daha düşüktür bu nedenle çözeltisi bileşimi hızla faz sınırını geçerek iki fazlı bölgeye girmiş, DCM ve BuOH'un buharlaşmasındaki artışla birlikte polimer katı hale gelmiş ve lif yapısı gözenekli hale gelmiştir. Ayrıca, çözücü olmayan ve çözücü arasındaki oran azaldıkça, lif yüzeyinde daha pürüzsüz bir yapı elde edilmiştir. Çözücü olmayan/çözücü oranı ne kadar düşükse, başlangıç konsantrasyon noktasının çift tepe ayrışma (bimodal deinking) eğrisine olan uzaklığı o kadar fazla olur; bu da aynı koşullarda polimer çözeltisinin iki fazlı bölgeye girmesini zorlaştırmaktadır. Bu da faz ayrımı olasılığını azaltır ve sonuç olarak lif üzerindeki gözenekli yapı giderek kaybolmaktadır.

2.3. Elektroeğirme ile Geri Dönüştürülmüş Polimerlerin Potansiyeli

Plastik atıkların çöp sahalarında birikmesi, günümüzde karşılaşılan en ciddi çevresel sorunlardan biri hâline gelmiştir. Plastik atıkların yüksek katma değerli ürünler olarak, özellikle mikro/nanomalzeme formuna geri dönüştürülmesi, etkili ve uygulanabilir bir stratejidir. Bu bağlamda, elektro-eğirme, plastik atıkları fonksiyonel liflere, köpüklere ve diğer malzemelere dönüştürmek için tercih edilen bir yöntemdir (Li vd., 2022).

Gerçekleştirilen bir çalışmada, PLA ve mikrokristalin selüloz kullanılarak elektroeğirme yöntemiyle aerosol partikül maddeleri filtrasyonu ve uçucu organik bileşiklerin yüzeye tutunması için yüksek kalite faktörüne sahip aktif karbon filtreleri üretildi (Czerwinska vd., 2025). Diğer bir çalışmada doğada çözünmesi zor olan genişlemiş polistreni elektroeğirme yöntemiyle geri dönüşümü sağlanmıştır. Çıkan ürünler membran olarak kullanılmış olup; hava filtrasyon testlerinde 4,8cm/s yüzey hızı ve 50 Pa'nın altında basınç farkı ile %75 oranında parçaları tutma eğilimi göstermiştir. Su filtrasyon testlerinde ise metal oksit nanoparçacıkları (Fe_3O_4 , ZnO , TiO_2 ve CeO_2) kullanılmış; Fe_3O_4 için %84, ZnO için ise %76 oranında tutulma verimi elde edilmiştir (Lima vd., 2025).

2.4. Geri Dönüştürülmüş Polimerlerin Elektroeğirme ile Nanoelyaflara Dönüştürülmesi

Elektroeğirme, polimer çözeltisinin iğne (spinneret) ucundan yüksek voltaj kullanılarak ince lifler halinde çekilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu işlemler esnasında uygulanan voltaj, akış hızı, çözelti viskozitesi, yüzey gerilimi gibi proses parametrelerinin yanısıra iğne çapı, toplama mesafesi gibi çevresel şartlar elde edilecek lifin çapını, yapısını ve morfolojik kalitesini etkilemektedir (Buluş vd., 2017). Elektroeğirme uygulama teknikleri gözönünde bulundurulduğunda iğne başlı (needle), iğnesiz (needleless), multi jet, core shell yapılı ve gaz destekli gibi farklı uygulama sistemleri bulunduğu görülmektedir (Li vd., 2022).

2. 5. Geri Dönüştürülmüş Polimerlerin Kullanımı

Elektroegirme esnasında kullanılacak materyaller geri dönüştürülmüş polimerlerden de tercih edilebilmektedir. Bu amaçla en çok tercih edilen atık polimerler PET, PS, PA, TPU, lignin malzemeler arasından tercih edilmektedir. Bu tür polimerler elektroegirme işlemlerinde çözelti halinde kullanılabildikleri gibi eriyik halinde de tercih edilmekte ve proses sonunda mikro nanolif yapılar elde edilmektedir (Kozanoğlu, 2006). Geri dönüştürülmüş polimerler ile gerçekleştirilen çalışmalarda formülasyonlara eklenen katkı maddeleri ve nanofiberler liflerin fonksiyonel ve dayanımsal özelliklerini güçlendirmektedir (Dziike vd., 2022). Geri dönüşüm polimerlerin kullanıldığı proseslere dahil edilen çözücülerin çevre dostu ürünlerden tercih edilmesi, eriterek egirme gibi metotların geliştirilmesi ve son ürünün fonksiyonelliğinin artırılmasına yönelik gözenekli, çift fazlı(Janus), içi boş(hollow) ve çekirdek kabuk(core shell) dizaynı lif yapılarının geliştirilmesi bu uygulamaları tercih nedeni kılmaktadır (Buluş vd., 2017). Dönüştürülmüş polimerler ile çalışmanın farklı pek çok avantajından bahsedilse de ham madde olarak kullanılan atık hammaddenin içerdiği safsızlıklar, bunlardan kaynaklanan çözünürlük sorunları ve moleküler ağırlık kaybı gibi dezavantajları da göz ardı etmemek gereklidir (Li vd., 2022).

Geri dönüşüm malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen elektroegirme işlemlerinden elde edilen ürünlerin pek çok farklı alanda kullanımı tercih edilmektedir. Bunların başında partikül, mikroplastik ve boya maddelerini tutma konusunda yüksek verimlilik elde edildiği için filtreleme, su ve atık arıtma uygulamaları gelmektedir. Hava kalitesinin iyileştirilmesinin amaçlandığı çalışmalarda gaz filtreleme veya akışkan ayırma gibi adımlar uygulanmaktadır. Bu basamaklarda geri dönüşümlü polimer liflerinin yüzey alanının fazla olması ve yüksek poroziteye sahip olmaları nedeni ile oldukça yüksek verim elde edilmektedir. Kompozit veya biyomedikal uygulamalarda da katkı eklenerek oluşturulan polimer lifler özellikle antimikrobiyal yüzeylerde veya doku mühendisliğinde tercih edilebilmektedir (Kozanoğlu, 2006).

Atık polimerlerden elektroegirme ile katma değerli ürün elde etme konusunda gerçekleştirilen çalışmalar ekonomik ve ölçeklendirilebilir oluşu ve çevre dostu yaklaşımı ile oldukça hızlı gelişmektedir. Fonksiyonel katkıları kullanarak ürün çeşitliliğini artırma, elektroegirme ile diğer üretim tekniklerinin birlikte uygulanması, eriyik temelli çevreye zarar vermeyen çözücü sistemlerinin geliştirilmesi, çalışma parametrelerini optimize ederek lif kalite özelliklerinin iyileştirilmesi ve çalışmaların laboratuvar ortamlarından

ticari boyuta taşınabilmesi için büyük ölçekli proseslerin gerçekleştirilmesi atık polimerlerin katma değerli bir şekilde yeniden kullanılabilmesi için önerilebilecek yöntemler olabilir (Huang vd., 2003).

2.6. PAN ve Akrilik Elyafın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Bu çalışmanın temelini oluşturan iki malzemenin, yani saf PAN ve geri dönüştürülmüş akrilik elyafın özelliklerinin anlaşılması, elde edilecek sonuçların doğru yorumlanması için hayati önem taşımaktadır. Bu iki malzeme sıklıkla birbiriyle karıştırılsa da aralarında önemli kimyasal ve yapısal farklılıklar bulunmaktadır.

2.6.1 PAN

PAN, akrilonitril ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$) monomerinin polimerizasyonu ile elde edilen, lineer formülü ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$)n olan sentetik, yarı kristal bir polimerdir.(Wikipedia, 2015a) Moleküler yapısındaki güçlü polar nitril ($-\text{C}\equiv\text{N}$) grupları, polimer zincirleri arasında kuvvetli dipol-dipol etkileşimlerine neden olur. Bu etkileşimler, PAN'a yüksek bir erime noktası (yaklaşık 317°C), kimyasallara ve çözücülere karşı mükemmel direnç ve yüksek mekanik dayanım gibi özellikler kazandırır(Nurul v.d., 2014). Ancak bu güçlü etkileşimler aynı zamanda PAN'ın çözünürlüğünü sınırlar; sadece (DMF), DMSO gibi çok polar aprotik çözücülerde çözünebilir (İnce Yardimci vd., 2022). PAN'ın en önemli özelliği, kontrollü ısı işlem (stabilizasyon ve karbonizasyon) altında yüksek verimle (%50-55) karbona dönüşebilmesidir. Bu süreçte, lineer polimer zincirleri önce termal olarak kararlı bir "merdiven" yapısına, ardından da grafit benzeri bir karbon yapısına dönüşür. Bu nedenle, günümüzde üretilen yüksek performanslı karbon elyafların %90'ından fazlası PAN öncüsünden elde edilmektedir(Khayyam v.d., 2020).

2.6.2. Akrilik Elyaf (Orlon)

Ticari olarak "akrilik" olarak bilinen elyaflar, saf PAN homopolimeri değildir. ABD Federal Ticaret Komisyonu'nun tanımına göre, bir elyafın "akrilik" olarak sınıflandırılabilmesi için ağırlıkça en az %85 akrilonitril monomeri içermesi gerekmektedir. Geriye kalan %15'lik kısım, genellikle metil akrilat (MA) veya vinil asetat (VA) gibi bir veya daha fazla komonomerden oluşur. Bu komonomerler, polimer

zincirinin düzenliliğini bir miktar bozarak zincirler arası etkileşimi zayıflatır. Bu modifikasyonun birkaç pratik amacı vardır:

İşlenebilirliği Artırmak: Komonomerler, polimerin çözünürlüğünü artırır ve eriyik viskozitesini düşürerek lif eğirme işlemini kolaylaştırır.

Boya Alımını İyileştirmek: Saf PAN'ın kompakt yapısı boya moleküllerinin nüfuz etmesini zorlaştırırken, komonomerler daha amorf bölgeler yaratarak boya alımını ve dolayısıyla tekstil ürünlerinin renklendirilmesini kolaylaştırır.

Termal Davranışı Modifiye Etmek: Itakonik asit (IA) gibi asidik komonomerlerin küçük miktarlarda eklenmesi, stabilizasyon reaksiyonlarının başlama sıcaklığını düşürerek ve reaksiyonu daha kontrollü hale getirerek karbonizasyon sürecini kolaylaştırabilir (Huang, 2009).

Bu çalışmada kullanılan geri dönüştürülmüş akrilik elyafın, saf PAN'dan temel farkı bu komonomer içeriğidir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş bir malzeme olması nedeniyle, önceki kullanım ömrü ve geri dönüşüm işlemleri sırasında bir miktar moleküler ağırlık kaybına (zincir kırılması) ve potansiyel safsızlıkların varlığına maruz kalmış olabilir. Bu faktörlerin tümü, elektroegirme davranışı ve nihai elyaf ile takviye edilen numunelerin mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynayacaktır.

2.7. Elektroegirilmiş Polimerlerin Mekanik Özellikleri

Literatürdeki çalışmalar, tekil bir nanolifin mekanik özelliklerinin, aynı polimerin dökme (bulk) veya geleneksel mikron boyutlu lif formuna göre genellikle daha üstün olabildiğini göstermektedir. Bunun temel nedeni, elektroegirme sürecindeki yoğun elektrostatik çekme kuvvetlerinin, polimer zincirlerini lif eksenine boyunca yüksek oranda hizalaması ve bu sayede daha az kusurlu, daha kristalin bir yapı oluşturmasıdır (Baji vd., 2010).

Nanolif matının mekanik özellikleri, yüksek gözenekliliği ve lifler arasındaki zayıf Van der Waals bağları veya sürtünme kuvvetleri nedeniyle genellikle daha düşüktür (Yao vd., 2014). Bu nedenle, nanolif matlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir:

Proses Sonrası İşlemler: Üretilen nanolif matlarına uygulanan ikincil işlemler, lifler arası bağları güçlendirerek mekanik performansı artırabilir.

Tavlama (Annealing): Matın, polimerin cam geçiş sıcaklığının (T_g) biraz üzerinde bir sıcaklıkta ısıtılma işlemine tabi tutulması, liflerin kesişim noktalarında kısmi erime ve yeniden katılma (sinterleme) ile kalıcı bağlar oluşturur. Bu "kaynaklanmış" noktalar, yükün lifler arasında daha etkili bir şekilde aktarılmasını sağlar. Sanchaniya vd. (2023), PAN nanoliflerini tavlamanın, çekme dayanımını boyuna yönde %32, enine yönde ise %23 artırdığını göstermiştir.

Çapraz Bağlama (Cross-linking): Kimyasal ajanlar veya UV radyasyonu kullanılarak polimer zincirleri arasında kovalent bağlar oluşturulması, matın mekanik dayanımını ve çözücülere karşı direncini önemli ölçüde artırır (Görgün, 2019).

Katkı Maddelerinin Etkisi: Polimer çözeltisine, elektroğirme öncesinde nano-boyutlu takviye edici ajanlar eklenmesi, bir nanokompozit lif yapısı oluşturarak mekanik özellikleri geliştirmek için etkili bir yöntemdir. CNT, GO veya metalik nanoparçacıklar gibi yüksek dayanıma sahip malzemeler, polimer matrisi içinde yük taşıyıcı görevi görür, rGO ekleyerek çekme dayanımını yaklaşık 4,2 GPa'ya ve elastik modülü 121 GPa'ya çıkardığını ve katkısız liflere kıyasla %236'ya varan bir iyileşme sağladığını bildirmiştir (Görgün, 2019).

Bu stratejiler, elektroğirme ile üretilen nanolif matlarının, zayıf mekanik özellikler sorununu aşarak, yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılabilmesinin önünü açmaktadır.

2.8. Polimer Geri Dönüşüm Yöntemleri

2.8.1 Termal geri dönüşüm yöntemleri

2.8.1.1. Yakma (incinere etme) veya enerji geri kazanımı

Her malzemenin belirli bir ısı değeri bulunmaktadır; bu nedenle hurda malzemeler, potansiyel olarak yakılabilir ve ısı enerjisi geri kazanımı mümkün olabilmektedir. Ancak, SMC gibi yoğun şekilde inorganik bileşenler (örneğin cam elyafı ve dolgu maddeleri) içeren kompozitlerde bu durum sınırlıdır. Reçine, yanan tek organik madde olduğu için, enerjinin maksimumunda sadece %35'i (ağırlık bazında) bu yolla elde

edilebilmektedir. Kalsiyum karbonat gibi mineral dolgular, yüksek sıcaklıklarda bozunarak enerji emer ve bazı SMC formülasyonlarında alev geciktiriciler de bulunmaktadır. Tüm bu etkenler, yakma yoluyla elde edilebilecek enerji miktarını sınırlamaktadır. Fenolik, polyester, üre-formaldehit ve epoksi reçinelerin ölçülen ısı değerleri literatürde rapor edilmiştir. Ayrıca, yakma işlemi sonrasında önemli miktarda katı atık kalır ve bu atıkların ek olarak bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu kalan malzemeler, başka bir SMC veya DMC üretiminde dolgu maddesi olarak tekrar kullanılamaz. Çünkü işlem sırasında ortaya çıkan sıcaklık, kalsiyum karbonat dolgusunu kalsiyum okside dönüştürmekte bu da enerji üretimi sürecinde kalınlaştırma (thickening) mekanizmasını olumsuz etkilemektedir. Bir kompozitte yanmayan malzeme oranı arttıkça, yakma sonrasında elde edilen ısı değeri azalır (Utekar vd., 2021).

2.8.1.2. Akışkan yatak

Akışkan yatak yöntemi, termoset kompozitlerin geri dönüşümünde kullanılan termal bir tekniktir ve esas olarak takviye elyaflarının geri kazanılmasını hedeflemektedir. Bu yöntemde, küçük parçalara ayrılan kompozit malzeme, yaklaşık 450–500 °C sıcaklıkta silikalı bir kum yatağında hava ile akışkanlaştırılarak ısıtılmaktadır. Organik reçine buharlaşmakta ve yakılarak enerji geri kazanımı sağlanmaktadır; elyaf ve dolgu maddeleri ise reçineden ayrılarak yeniden kullanılabilir hâle gelmektedir. Geri kazanılan elyaflar, özellikle DMC bileşiklerinde takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda, bakir elyafların %50'sine kadar bu yöntemle ikame edilebildiği ve kompozitin mekanik özelliklerinde sınırlı düzeyde kayıp yaşandığı görülmüştür. Ancak bu yöntemin henüz ticari bir uygulaması bulunmamaktadır; yalnızca küçük ölçekli deneysel çalışmalarda test edilmiştir. Ekonomik olarak uygulanabilir olması için yılda en az 9000 ton kompozit malzemenin işlenmesi gerektiği belirtilmektedir. Süreç, teknik açıdan karmaşıktır ve elyafların polimer matristen ayrılması, gaz-katı ayrımı ve enerji geri kazanımı gibi birçok aşamayı içermektedir (Turner vd., 2011).

2.8.1.3. Piroliz

Piroliz yöntemi, oksijensiz ortamda ısıtma ile kompozit malzemelerin reçine matrisini parçalayıp daha basit gaz ve sıvı ürünlere dönüştürmeyi hedeflemektedir. Bu

süreç, gaz ve sıvı bileşenlerin geri kazanılmasını ve bunların yeni kompozitlerde kullanılmasını mümkün kılar. Ancak 300 °C'nin altında reçinenin tam ayrışması sağlanamazken, 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda inorganik maddelerde istenmeyen bozulmalar meydana gelmektedir. Elde edilen yağlı sıvının 35 MJ/kg'lık kalorifik değeri sayesinde yakıt olarak kullanılması mümkündür; fakat gaz ürünlerinin enerji değeri düşük olduğundan kullanım alanı sınırlıdır. Ayrıca cam elyaflar, katı kalıntılardan ayrıştırılarak yeni DMC bileşiklerinde takviye malzemesi olarak tekrar kullanılabilir (Torres, 2000).

2.8.2. Kimyasal geri dönüşüm yöntemleri

2.8.2.1. Solvoliz

Solvoliz, termoset polimer kompozitlerin geri dönüşümünde kullanılan kimyasal bir yöntemdir ve özellikle karbon fiberli kompozitlerde elyafları hasar görmeden geri kazanmak amacıyla tercih edilmektedir. Bu yöntemde, uygun çözücüler kullanılarak reçine parçalanır. En yaygın çözücüler su, alkol (örneğin metanol, glikoller), aseton ve bazen fenol veya aminlerdir. Katalizör olarak NaOH veya KOH gibi bazlar; reçinenin dirençli olduğu durumlarda ise asitler kullanılmaktadır. Özellikle SMC kompozitlerinde etanol, KOH ve aseton gibi çözücüler başarıyla uygulanmış ve polyester reçinelerin %90'ın üzerinde geri kazanımı sağlanmıştır. Solvoliz, yüksek reçine ayrışma verimiyle dikkat çekerken, elyafların yeniden kullanılabilirliğini koruyan sürdürülebilir bir kimyasal geri dönüşüm yöntemidir (Winter vd., 1995).

2.8.2.2. Yüksek konsantrasyonlu asit

Yüksek konsantrasyonlu nitrik asit kullanılarak, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin reçinesi başarıyla parçalanabilmekte ve neredeyse orijinal kalitesinde elyaf geri kazanımı sağlanabilmektedir. Meng'in çalışmasında, 90 °C'de ve 10–100 saat arasında gerçekleştirilen işlem sonucunda karbon fiberlerde yalnızca %1,1'lik çekme dayanımı kaybı gözlemlenmiştir. Cam elyafların geri kazanımında ise, termal geri dönüşüm sonrası γ -aminopropil triethoksi silan ile post-silanizasyon ve hidroflorik asit ile aşındırma uygulanarak, kaybedilen mekanik özelliklerin büyük bölümü başarıyla geri

kazanılmıştır. Bu yöntem, elyaf kalitesini koruyan etkili bir kapalı döngü geri dönüşüm yaklaşımıdır (Meng vd., 2004).

2.8.2.3. Hidroliz

Hidroliz yöntemi, su bazlı solvoliz ile termoset kompozitlerin reçine matrisini parçalayarak geri dönüştürmeyi amaçlar. Laboratuvar çalışmaları, bu yöntemle SMC'lerdeki polyester reçinenin üretimde kullanılan kimyasallara benzer sıvı ürünlere dönüştürülebildiğini göstermektedir. Geri kazanılan dolgu ve elyaflar, yeni DMC üretiminde %50 oranına kadar kullanılabilmekte ve mekanik özelliklerde kayıp yaşanmamaktadır. Ancak malzemenin toz hâline getirilmesi ve belirli parçalanma seviyelerine ulaşmak için sınırlı koşullarda işlem yapılması gerekmektedir. Bu yöntemde elde edilen karbon fiberlerin mukavemeti, piroliz veya kimyasal geri dönüşümle elde edilenlerle aynıken; akışkan yatak yönteminden elde edilen fiberler daha düşük mukavemete sahiptir. Yöntem, ayrıca ek bertaraf süreçleri gerektirmektedir (Patel vd., 1993).

2.8.2.4. Mekanik geri dönüşüm

Mekanik geri dönüşüm, atıkların fiziksel olarak küçültülerek yeni ürünlerde takviye olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem, SMC atıkları için günümüzde ticari olarak uygulanan tek geri dönüşüm tekniğidir. Geri dönüştürülen SMC malzemeleri, beton ve termoplastik kompozit sistemlerde kullanılmış ve özellikle kapalı döngü geri dönüşüm süreçleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Öğütme süreci düşük enerji tüketimiyle gerçekleştirilir; sac kompozit malzemeler için bu tüketim yalnızca 0,16 MJ/kg'dır. Mekanik parçalama işlemleri için kullanılan granülatör örneği olarak Wittmann granülatör cihazı gösterilmiştir. Bu yöntem, düşük enerji gereksinimi ve basit uygulama süreciyle öne çıkmaktadır (Bream ve Hornsby, 2001).

2.8.2.5. Boyut küçültme

Boyut küçültme işlemi, özellikle büyük ebatlı otomotiv sac kompozit parçalarının yeniden kullanıma kazandırılması için kritik bir adımdır. Bu parçalar genellikle ön kesme veya parçalama ile küçültülür, ardından silindirik, çekiçli veya bilyeli değirmenlerle

işlenebilir boyutlara getirilir. Yapılan araştırmalar, bu yöntemlerin ekonomik verimliliğini ve işlenebilirlik seviyelerini değerlendirmiştir. Boyut küçültme, geri dönüştürülen termoset kompozitlerde takviye elyaflarının orijinal uzunluğunu koruma avantajı da sunar. Ayrıca, geri dönüşümde kullanılan enerji miktarı, 400 MJ/kg'a karşılık öğütme işlemi için ortalama 0,14–0,31 MJ/kg, özellikle bakır karbon elyaf üretimi ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür (Perrin vd., 2005).

2.8.2.6. Yüksek gerilimle parçalama

HVF, katı malzemelerin, iki elektrot arasında kısa sürede tekrarlanan elektriksel darbe boşalımlarıyla parçalanmasını sağlayan bir yöntemdir. Elektriksel boşalım sırasında oluşan kıvılcım kanalı, 104 K üzeri sıcaklıkta ve 109–1010 Pa basınç aralığında şok dalgaları üretmektedir. Bu, malzemenin çekme dayanımını aşan iç gerilimler oluşturur ve nihayetinde parçalanmaya yol açmaktadır. HVF yöntemi, mekanik geri dönüşüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlara sahiptir:

1.HVF ile geri kazanılan elyafların yüzeyi daha temizdir ve üzerinde daha az reçine kalıntısı bulunur. Ayrıca daha yüksek oranda elyaf geri kazanımı sağlanır ve elyafların boy dağılımı daha uzun olur.

2.Uygulanan elektriksel darbe arttıkça, kalan reçine miktarı azalır.

3.Ancak, HVF yöntemi, mekanik geri dönüşüme kıyasla 2,6 kat daha fazla enerji tüketir (Bluhm vd., 2000).

2.9. Elektroeğirilmiş Polimerlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Nanofiber yapılar incelenirken temel mekanik parametreler olan moleküler düzen, esneklik, kopmada uzama (elongation at break), yüksek yüzey alanı/hacim oranı, maksimum çekme dayanımı, elastik modül (E), uzama, akma ve kopma deformasyonları göz önünde bulundurulur (Al-Abduljabbar ve Farooq, 2023).

Mekanik parametreler konusunda yapılan çalışmalar farklı başlıklarda incelenecek olursa lif yönelim etkisi (fiber alignment) bunlardan ilki olarak ele alınabilir. Nanofiber membranlarda gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar ele alındığında (Yao vd., 2014)d 6 (PA6) malzeme ile yapılan deneylerde rastgele lif ($E \approx 370$ MPa, UTS ≈ 38 MPa, $\epsilon_{\max} \approx 30$ %), paralel yönlendirilmiş ($E \approx 753$ MPa, UTS ≈ 55 MPa, $\epsilon_{\max} \approx 12$ %), perpendiküler yönlendirilmiş ($E \approx 24$ MPa; $\epsilon_{\max} > 40$ %) lif yönelim etkisi

çalışmalarına rastlanmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda dik liflerin esneme ve uzama kabiliyetlerinin daha iyi olduğu paralel liflerin ise dayanım ve sertlik açısından yüksek düzeyde sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak liflerin yönelimlerinin polimerlerin mekanik özelliklerini ciddi anlamda etkilediği söylenebilir (Dincer vd., 2016; Verschate vd., 2023).

Polimerlerin lif iç yapısı ve çekme davranışı ile ilgili gerçekleştirilen mikro düzeyde ölçümler iç çekirdek kısmının daha yoğun ve sert olduğunu, dış kabuğun ise daha gevşek yapılı ve çekirdeğe kıyasla daha esnek olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni ise elektroğirme esnasında polimer ağının merkezde yoğunlaşması ile açıklanabilir. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacı ile polimer nanoliflerine farklı katkılar eklenebilmektedir. Poliamid polimer nanoliflerine rGO eklenen bir çalışmada çekme dayanımının ~4,2 GPa, elastik modülün ~121 GPa olarak geliştirildiği raporlanmıştır. Katkısız nanoliflere kıyasla, katkılı yapılar yaklaşık %45–236 oranında daha yüksek performans göstermektedir (Görgün, 2019; Rashid vd., 2021).

Mekanik özellikleri geliştirmek için proses parametreleri yenilenebilir. Voltaj, çözeltinin viskozitesi, ortam nemi, uçuş mesafesi gibi parametreler; yüzey pürüzlülüğü, fiber çap gibi parametrelerin yanı sıra mekanik dayanımı da etkiler. Örnek olarak elektroğirme işlemi esnasında kullanılan voltaj artırılırsa daha düşük çaplı ve boncuksuz lif yapısı sağlanır. Sinterleme sonrasında dayanımda artış gözlemlenebilir (Dincer vd., 2016; Rashid vd., 2021)

Ayrıca proses sonrasında gerçekleştirilen reaksiyon, çapraz bağlama ve sinterleme işlemleri de mukavemet özelliklerini etkileyebilir. Sinterleme ve UV çapraz bağlama yöntemleri uygulanan polimerlerin lif bağları daha güçlü hale gelmekte, elastik modülü ve kopma dayanımını yükselmekte ve su stabilitesi artmaktadır. Elektroğirme yoluyla üretilen polimer nanofiber sistemlerinin mekanik özellikleri genel olarak değerlendirildiğinde, kullanım alanına bağlı olarak mekanik özellik açısından amaca uygun olarak geliştirilebilir bir yapıda oldukları görülmektedir. Özelleştirilebilir bu yapılar tekstil, filtreleme, kompozit güçlendirme, biyomedikal implantlar gibi farklı alanlarda tercih edilmektedir (Rashid vd., 2021).

PAN, akrilonitril ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$) monomerinin radikal polimerizasyonu yoluyla elde edilen yarı kristal bir termoplastik polimerdir. PAN, özellikle çözücülere ve kimyasallara karşı direnci, alev geciktirici özellikleri ve düşük gaz geçirgenliği ile bilinir (Kim vd., 2021). Ortalama moleküler ağırlığı yaklaşık 100.000 g/mol olan bu polimer,

yaklaşık 1900 monomer birimi içeren zincir yapısı sayesinde elyaf formuna kolayca dönüştürülebilir.

Akrilik elyaflar, PAN'ın başlıca kullanım alanlarından biridir. ABD’de bir elyafın "akrilik" olarak sınıflandırılabilmesi için, en az %85 oranında akrilonitril monomeri içermesi gerekmektedir. Tipik komonomerler arasında Vinil asetat ve metil akrilat yer almaktadır (Lv vd., 2009) DuPont firması, 1941 yılında ilk akrilik elyafları üretmiş ve bu elyafları “orlon” markasıyla ticarileştirmiştir. Orlon, yün benzeri yapısı ve yüksek ısı yalıtım kapasitesiyle tekstil sektöründe geniş çapta kullanılmıştır (Britannica, n.d.)

PAN esaslı liflerin karbon elyafa dönüştürülmesi işlemi, stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitleştirme gibi ısı işlemleri içerir. Bu süreç sonucunda, mekanik dayanımı yüksek ve iletken özelliklere sahip karbon elyaflar elde edilir. Bu elyaflar, özellikle havacılık, otomotiv, savunma sanayi ve spor ekipmanları gibi ileri teknoloji gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Owais, n.d.)

Bu tez kapsamında, PAN'dan elektroğirme yöntemiyle nano elyaflar üretilmiş ve bu elyaflar karbonize edilerek elde edilen karbon yapılarının mekanik dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçların hem malzeme bilimi hem de sürdürülebilir üretim açısından literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Kullanılan malzeme PAN olarak adlandırılan polimer malzemedir. PAN malzemeye alternatif olarak kullanılması planlanan diğer malzeme ise akrilonitrilin polimerizasyonu ile elde edilen akrilik elyaf (orlon) olup Konya piyasasından beyaz renkli olarak temin edilmiştir. Katkı maddesi olarak grafen kullanılmıştır.

3.2. Metot

3.2.1. Numunenin hazırlanması

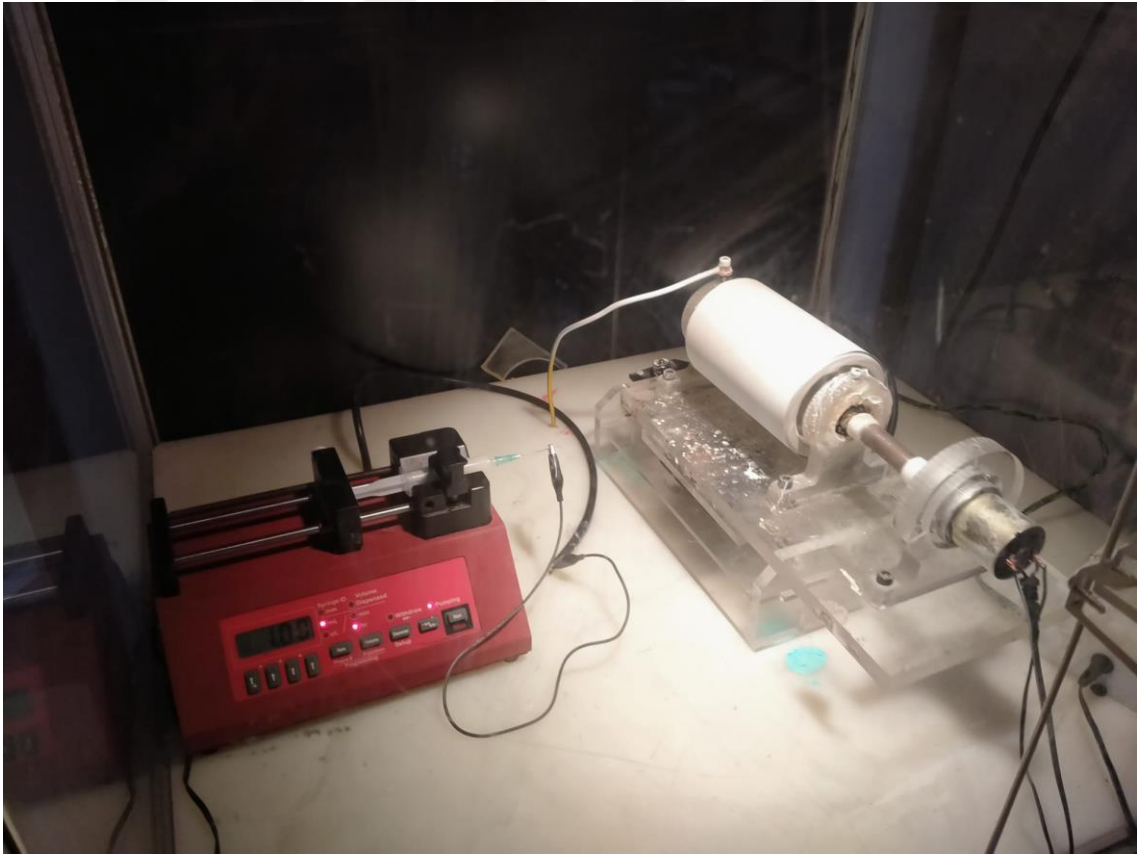
PAN ve akrilik elyaf numuneleri, DMF çözücüsü içinde %10'luk derişimlerde hazırlandı. Grafen katkılı numunelerde PAN ve akriliğin ağırlığının %5'i kadar grafen eklendi. Numuneler manyetik ısıtıcı ile 45 dk süre ile karıştırıldı. Elektroeğirme işlemine hazır hale gelen numuneler 10 ml'lik şırıngalara alınarak şırınga pompasına yerleştirildi. İstenilen miktarda son ürün elde edilene dek çözelti hazırlama işlemi tekrar edildi.

Alüminyum laminasyonlu pişirme kağıdı toplayıcı haznesinin çapı ölçülerek, haznenin çevresini kaplayacak şekilde hazırlandı. Alüminyum yüzeyin yönü toplayıcı haznesine gelecek şekilde, toplayıcı yüzeyi kaplandı ve 3M markalı bant ile hareket etmesi ve açılması engellenecek şekilde yapıştırıldı.

İğne ucunu hazırlanması: Gravür makinesi kullanılarak homojen bir akış sağlamak amacı ile şırınga iğne ucu düzleştirildi. Bu işlem sonrasında herhangi bir kalıntı olma ihtimalini ortadan kaldırmak amacı ile ikinci bir şırınga iğnesi kullanılarak kesilen şırınga iğnesinin iç kısmının temizlenmesi sağlandı. İçinde numune olan ve iğne ucu düz hale getirilen şırınga elektroeğirme için hazır hale getirilip şırınga pompasına yerleştirildi. Şırınga iğnesinin ucuna pozitif (+) gerilim kablosu, toplayıcıya da topraklama (nötr) bağlantısı yapıldı.

3.2.2. Elektroeğirme Sistemi

Elektroeğirme için Eraktek marka elektroeğirme sistemi kullanıldı. Pompaya yerleştirilen şırınganın debisi 1 mL/h olarak ayarlandı. Sistem parametreleri; toplayıcı ve şırınga arasındaki mesafe 13-14 cm, gerilim 15 kV, ortam sıcaklığı 21 °C, bağıl nem oranı %36, şırınga iç çapı 0,8 mm olarak belirlendi. Silindirik toplayıcının kaymaması için taban kaydırmaz tack-it (Faber Castell) malzeme ile masa zeminine sabitlendi (Cordoba vd., 2022). Sistem geriliminin ayarlanmasının ardından, sırası ile toplayıcı, şırınga pompası ve güç kaynağı çalışır hale getirildi ve elektroeğirme işlemi gerçekleştirildi (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Hazırlanan elektroeğirme sistemi

3.2.3. Tek Taraflı Bindirmeli Yapışkanlı (Single Lap Joint) ve Mod-I Tabakalar Arası Tokluk Testi Numunelerinin Hazırlanması

ASTM 2093 ve ASTM 5528 standartlarına göre hazırlanan nanoelyaflar 25x25mm ebatlarında kesildi. Çekme deneylerinde kullanılması için hazır karbon fiber kompozit kullanıldı. Öncelikle karbon fiber kompozitin bağlantı yüzeyinin temizlenmesi ve parçalar arasındaki yük transferini artırmak için 80 numara zımpara kullanıldı. Zımparalama sonrasında oluşan tozlar aseton ile temizlendi. (Şekil 3.2.) Yapıştırıcı olarak epoksi hazırlandı. Epoksi bağlantı yüzeylerine sürüldü. (Şekil 3.3.) Hazırlanan elyaflar bağlantı yüzeylerinin arasına yerleştirildi ve bağlayıcı klips kullanılarak baskı oluşturuldu. Numuneler 24 saat 20°C’de epoksinin kuruması için bekletildi ve 12 saat 80°’de kürleme yapıldı. (Şekil 3.4.)



Şekil 3.2. Zımparalanıp asetonla temizlenen karbon fiber kompozitler



Şekil 3.3. Epoksinin karbon fiber kompozitin bağlantı noktasına uygulanması



Şekil 3.4. Numunelerin kürleme işlemi için alüminyum ısıtıcı masada bekletilmesi

3.2.4. Karakterizasyon Yöntemleri

3.2.4.1. SEM

PAN ve ORLON polimerinden üretilen nanofiberler, yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu (ZEISS marka) kullanılarak karakterize edilmiştir.

3.2.4.2. FTIR

Kullanılan PAN liflerinin malzeme bileşimini doğrulamak için FTIR kullanıldı. IR spektrumları Nicolet™ iS50 FTIR Spectrometer kullanılarak elde edilmiştir.

FTIR, moleküllerin yapısındaki bağların tanımlanmasıyla temel bilimler, sağlık bilimleri ve mühendislik alanlarında sıkça başvurulmuş bir yöntemdir. Bu yöntemin temeli, molekül içi bağlar üzerine düşürülen kızılötesi ışınların, bağların titreşim ve dönme hareketleri ile soğurulmasına dayanır. Ancak bu olay sadece dipol momente sahip polar moleküllerde gözlenir.

FTIR, molekül içi bağların üzerine kızılötesi ışın düşürmesiyle maddenin iç yapısını öğrenmek için yapılır. Gönderilen kızılötesi ışın enerjisi bağları tahrip etmez. Fakat üzerine gönderilen kızılötesi ışın enerjisi bağların titreşim genliklerinin artmasını sağlar. Bu sayede titreşim spektrumları elde edilir. Elde edilen veriler IR atlası ile karşılaştırılarak malzemenin yapısal özellikleri hakkında bilgi sağlanır.(Ulus, 2019)

3.2.4.3. XRD

XRD malzemenin üzerine gönderilen X ışığı kaynağından üretilen alfa (α), beta (β) parçacıklarının malzeme üzerinde oluşturduğu yansıma açısının yorumlanarak, malzemenin kafes bilgisi hakkında bilgi vermeyi amaçlar.(Yünsel vd., 2019)

XRD uygulaması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde PANalytical EMPYREAN XRD marka cihaz kullanılarak yapılmıştır.

3.2.4.4. Çekme Deneyleri

Çekme ve Mod-I tabakalar arası kırılma testleri için numuneler titizlikle hazırlanmıştır. Çekme deneylerinde kullanılacak olan karbon fiber kompozit numunelerin kenarları, testin doğruluğunu sağlamak amacıyla bir eğe yardımıyla düzeltilmiştir. Testler için beş farklı grup oluşturulmuştur:

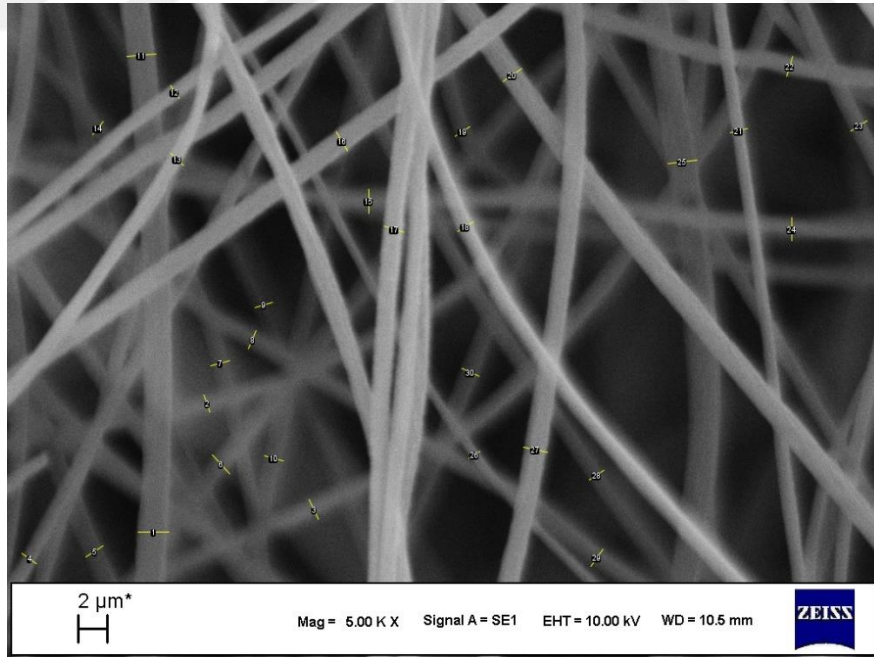
1. Saf Epoksi (Kontrol Grubu)
2. %10 PAN Çözeltili Nanoelyaf Takviyeli
3. %5 Grafen Katkılı %10 PAN Çözeltili Nanoelyaf Takviyeli
4. %10 Orlon Çözeltili Nanoelyaf Takviyeli
5. %5 Grafen Katkılı %10 Orlon Çözeltili Nanoelyaf Takviyeli

Bu grupların her birinden, tek yönlü çekme testleri için üçer adet, Mod-I tabakalar arası kırılma testleri için ise ikişer adet numune hazırlanmıştır. Mekanik testler, SHIMADZU marka çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve veriler TRAPEZIUM X yazılımı ile analiz edilmiştir. Tüm testler, 2 mm/dk'lık sabit bir çekme hızında yapılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR

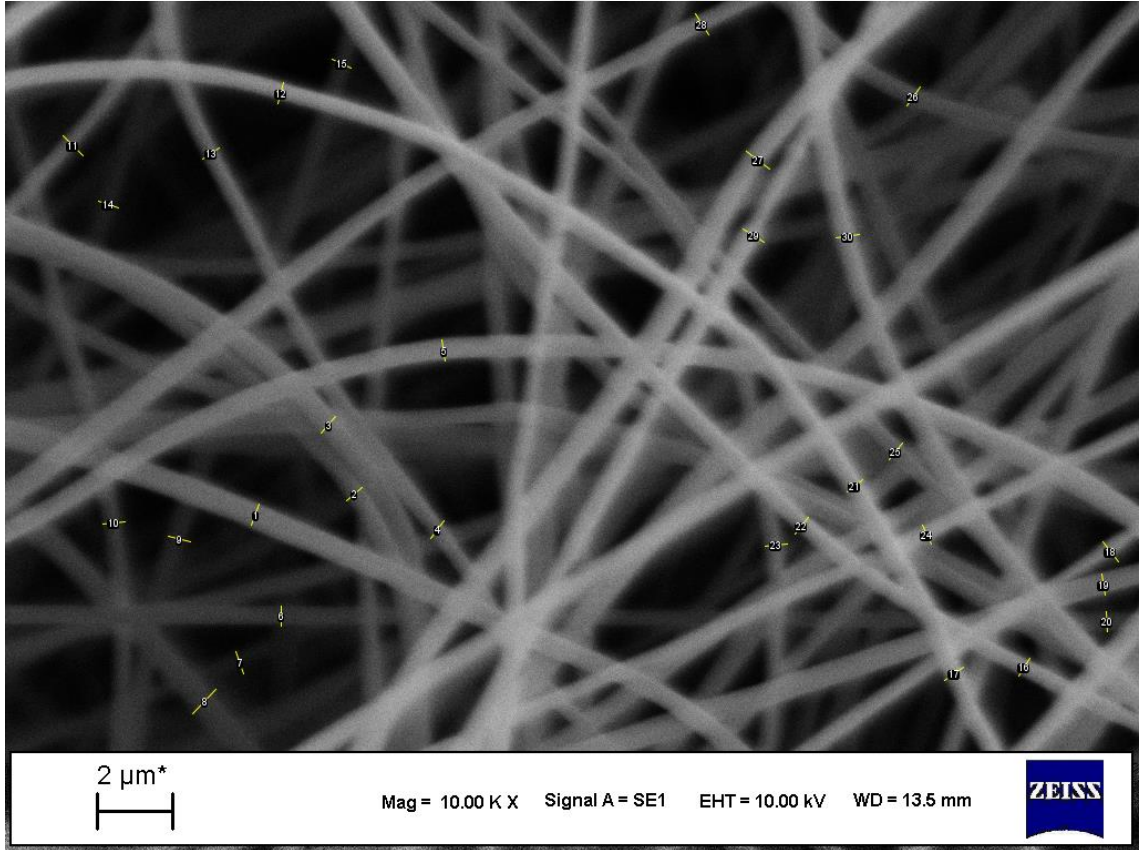
4.1.SEM Sonuçları

Hazırlanan numunelerin SEM sonuçları %10 PAN, %5 grafen katkılı %10'luk PAN, %10'luk orlon ve %5 grafen katkılı %10'luk orlonda incelenmiştir. Her bir numuneden 30 adet örnek alınmıştır. Bu örnekler üzerinden liflerin çapları ImageJ programı kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 4.1'de PAN liflerinin çapları gösterilmiştir. Numuneler içinde en büyük çaplı lif yaklaşık 2118 nm, en küçük çap değeri 898 nm, ortalama lif çapı 1417 nm'dir. Mehrpouya vd.'nin (2017) gerçekleştirdikleri çalışmada nanofiber çaplarını 247 nm olarak tespit etmiş, Diwan vd.'nin, (2023) gerçekleştirdiği çalışmada, %10, %12 ve %14 PAN kullanılarak farklı membranların geçirgenlik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada %10'luk PAN çözeltisinden yapılan fiberlerin ortalama çapının 195 nm bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, literatür değerlerinden daha yüksek bulunmuş olup bunun nedeninin analizin gerçekleştirildiği çevresel şartlara bağlı olabileceği öngörülebilir.



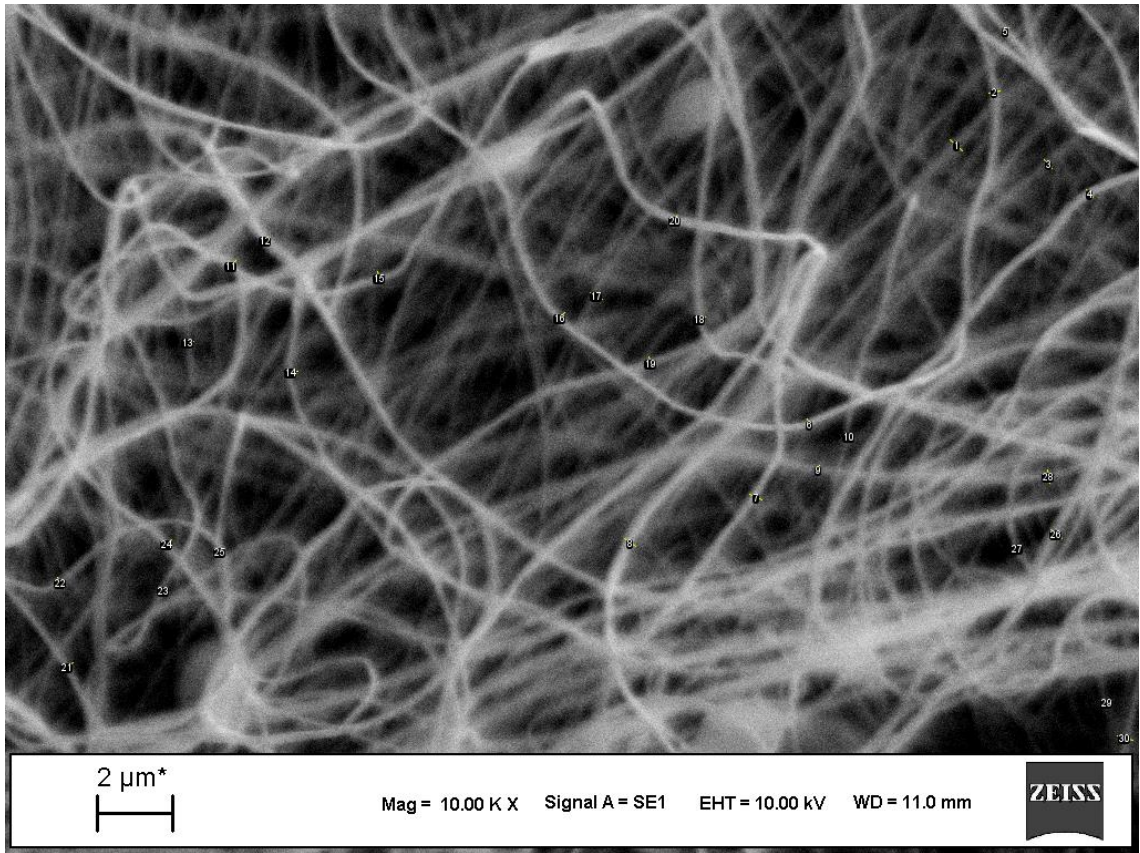
Şekil 4.1. %10 PAN çözeltisiyle hazırlanan nanofiber materyalin SEM görüntüsü

Çalışmada PAN liflerinden sonra grafen katkılı PAN nanofiber üretimi gerçekleştirilmiş olup, SEM analizlerinde grafen fiberin içine gömülü olduğu için görülememektedir (Şekil 4.2). PAN fiberiyle karşılaştırıldığında grafen katkılı PAN nanofiberde liflerin daha ince çaplı olduğu görülmektedir. SEM analizleri sonucunda min, max ve ortalama çap değerlerinin sırasıyla 527 nm, 899 nm ve 608 nm olduğu tespit edilmiştir. Deiyonize su kullanarak yapılan grafen katkılı nanoliflerin üretildiği bir çalışmada farklı derişimlerde ortalama çap değerleri 400-500 nm arasında bulunmuştur (Song vd., 2019). PAN temel alınarak çeşitli katkılarla hazırlanan nanofiberlerin incelendiği diğer bir çalışmada ise GO katkılı nanofiberlerde ortalama çap 500 nm olarak bulunmuştur (Aslam vd., 2022). Elde edilen sonuçlar, farklı çalışmalar ile karşılaştırıldığında verilerin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. %5 Grafen katkılı %10 PAN çözeltili nanofiber materyalin SEM görüntüsü

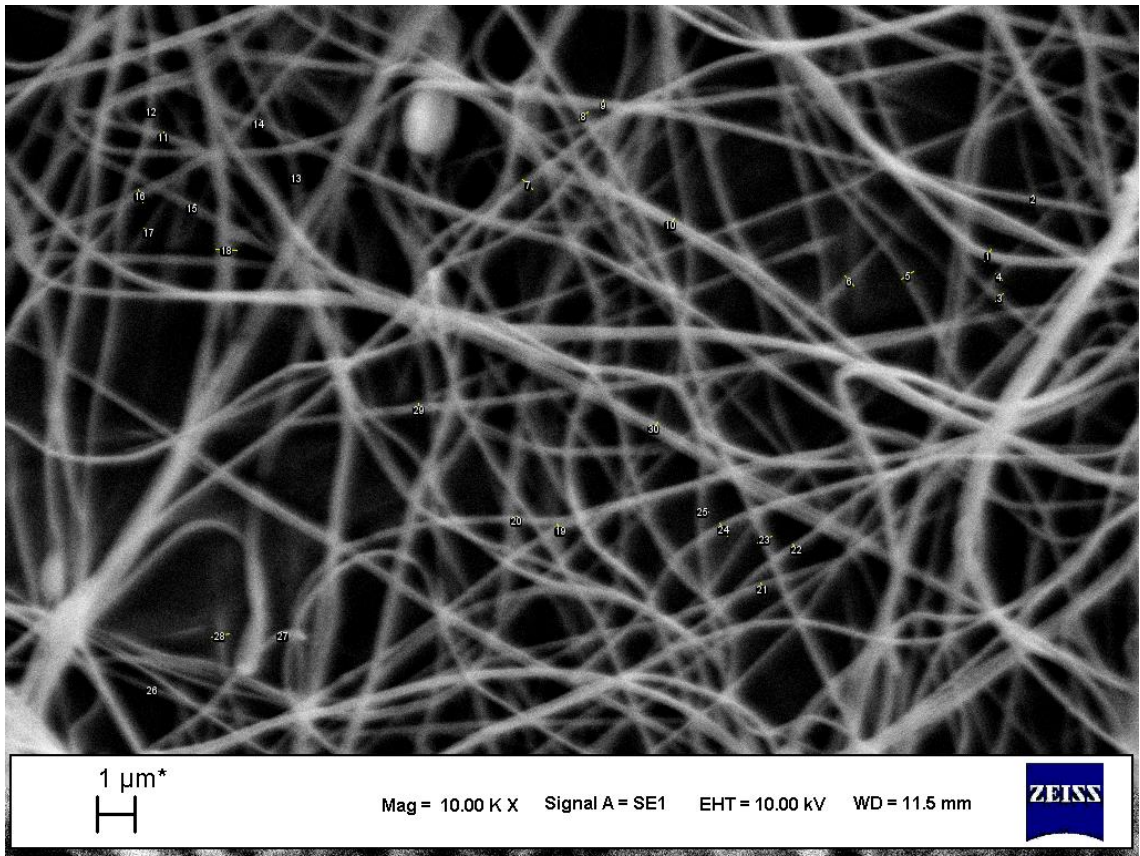
Üçüncü olarak üretilen orlon fiberin SEM görüntüsü değerlendirildiğinde (Şekil 4.3) oluşan fiberlerin PAN ve grafen katkılı PAN elyaflara kıyasla daha düşük çaplı olduğu gözlemlenmiştir. Orlon fiberler 207 nm ve 444 nm aralığında ölçülmüş olup ortalama lif çapı 317 nm'dir. Geri dönüşüm için yapılan bir çalışmada, akrilik kumaşlar DMF içinde çözündürülerek iğnesiz elektro eğirme yöntemi kullanarak nanolif üretimi gerçekleştirilmiş olup, üretilen nanofiberlerin çapları 110 nm ile 280 nm arasında değişmektedir(Milam-Guerrero et al., 2023) . Elde ettiğimiz sonuçlar literatüre yakın değerlerde olup genel olarak değerlendirildiğinde diğer çalışmalar ile uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.3. %10 Orlon çözeltisiyle üretilen nanofiber materyalin SEM görüntüsü

Son olarak %5 grafen katkılı orlondan üretilen nanofiberlerde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4). Üretilen fiberlerin çapları 207 nm ile 569 nm arasında değişmekte, ortalama lif çapı 328 nm'dir. Song vd. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada

orlon farklı yüzdelerde grafen ekleyerek ölçümler gerçekleştirmişler ve grafen içeriği arttıkça ortalama lif çapının arttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada %0.5 ve % 1.5 oranında katkı içeren orlon örneklerinin çapları sırası ile yaklaşık 579.9 nm ve 733.1 nm olarak ölçülmüştür. Almafie v.d., (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise orlon materyale grafen oksit eklenerek SEM ölçümleri gerçekleştirilmiş ve lif çapı ortalama 797 nm civarında bulunmuştur. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada bulunan değerler literatür değerlerinden daha düşük çaplı liflerin üretilmesi ile sonuçlanmış ve avantajlı bir ürün ortaya konulmuştur.

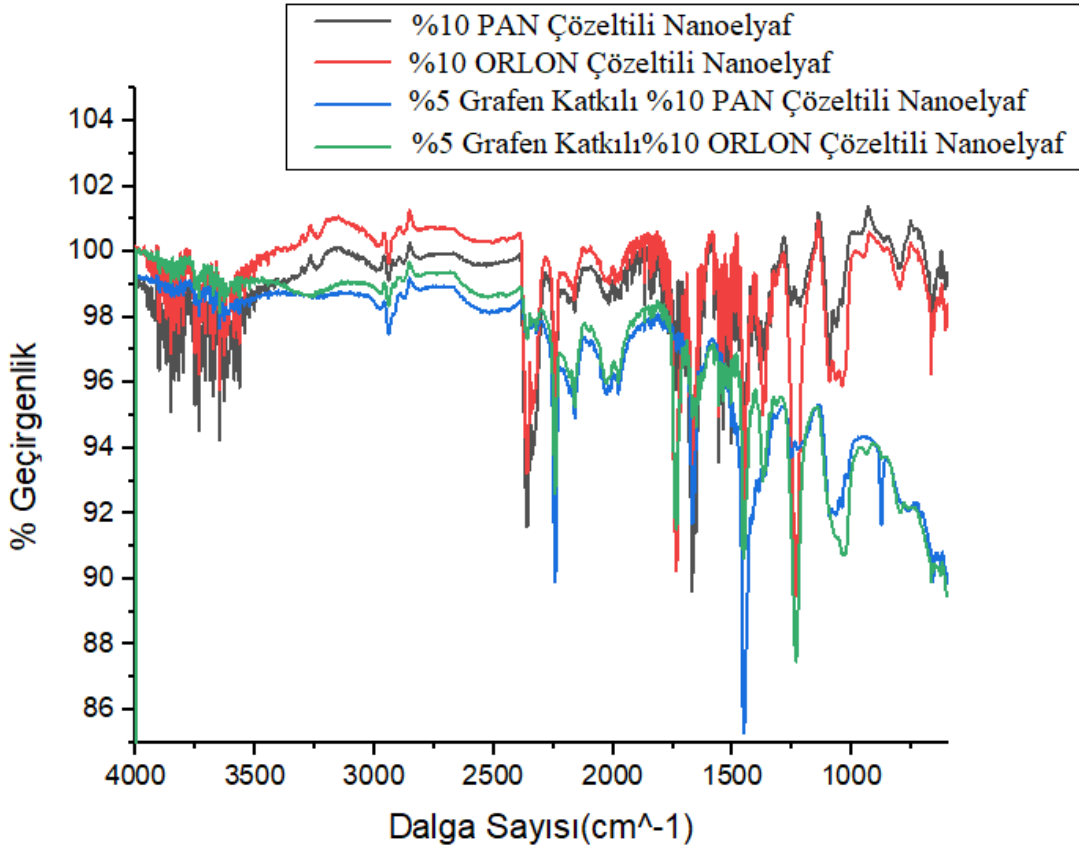


Şekil 4.4. %5 Grafen katkılı %10 orlon çözeltisiyle üretilen nanofiber materyal SEM görüntüsü

4.2.FTIR Sonuçları

Hazırlanan saf PAN, Orlon, grafen katkılı PAN ve grafen katkılı Orlon nanoliflerinin kimyasal yapıları, FTIR ile incelenmiştir. Grafik sonuçları, tüm

numunelerin temel kimyasal yapısının PAN olduğunu doğrulamakta ve katkı maddelerinin etkileşimine dair önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 4.5. Hazırlanan numunelerin FTIR grafikleri

Hazırlanan saf PAN, Orlon, grafen katkılı PAN ve grafen katkılı Orlon nanoliflerinin kimyasal yapıları, FTIR ile incelenmiştir. Grafik sonuçları, tüm numunelerin temel kimyasal yapısının PAN olduğunu doğrulamakta ve katkı maddelerinin etkileşimine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Tüm spektrumlarda gözlemlenen en karakteristik bant, yaklaşık 2242 cm⁻¹'de yer alan güçlü piktir. Bu pik, PAN yapısının kimyasal parmak izi olan nitril (C≡N) grubunun gerilme titreşimine aittir. Bu bandın hem saf PAN hem de Orlon numunelerinde net bir

şekilde var olması, Orlon elyafının da temel polimer omurgasının PAN olduğunu kesin olarak doğrulamaktadır (Sadeghi, 2015).

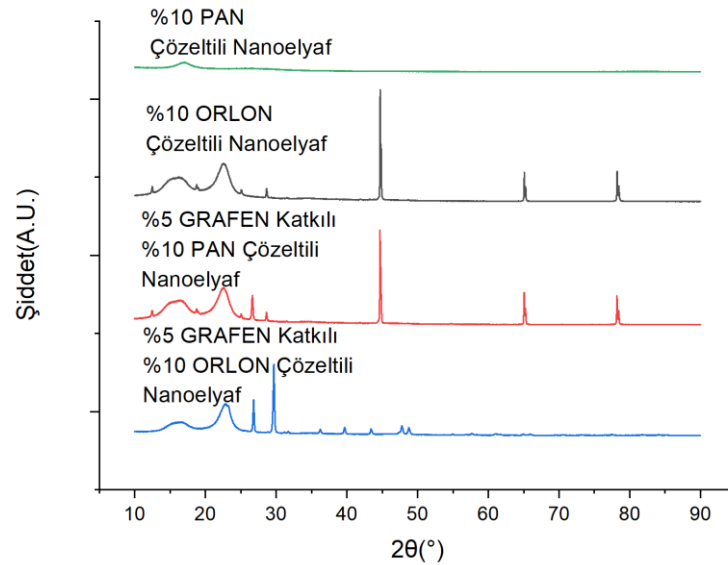
Saf PAN ve Orlon spektrumları genel olarak benzerlik gösterse de, Orlon spektrumunda 1734 cm^{-1} 'de gözlemlenen belirgin C=O (karbonil) gerilme piki önemli bir farktır. Bu pikin varlığı, ticari bir ürün olan Orlon'un yapısında, üretim sürecinde kullanılan akrilat veya ester bazlı komonomerlerin bulunduğuna işaret eder. Bu tür komonomerler, genellikle elyafın boyanabilirliğini ve işlenebilirliğini artırmak için kullanılır (Liu,2018).

%5 Grafen katkılı numunelerin spektrumları, grafensiz hallerine oldukça benzerdir. Grafenin kendisine ait belirgin bir IR piki olmamasından dolayı spektrumda doğrudan gözlemlenmez. Ancak, grafenin varlığı polimer zincirleriyle etkileşime girerek bazı piklerin şiddetinde ve şeklinde değişikliklere neden olabilir. Örneğin, 1667 cm^{-1} 'de görülen pik, hem DMF çözücü kalıntısına hem de grafenin katalitik etkisiyle başlamış olabilecek kısmi halkalaşma (siklizasyon) reaksiyonlarına (C=N oluşumu) atfedilebilir.

Tüm numunelerde ortak olan diğer önemli pikler, 2940 cm^{-1} civarında görülen pik alifatik C–H gerilme titreşimleri, 1455 cm^{-1} civarında görülen pik ise alifatik CH₂ ve CH gruplarının C–H bükülme deformasyonlarını göstermektedir (Nasouri, 2015).

4.3. XRD Sonuçları

Şekil 4.6'da numunelerin XRD spektrumları görülmektedir.



Şekil 4.6. Numunelerin XRD spektrumları

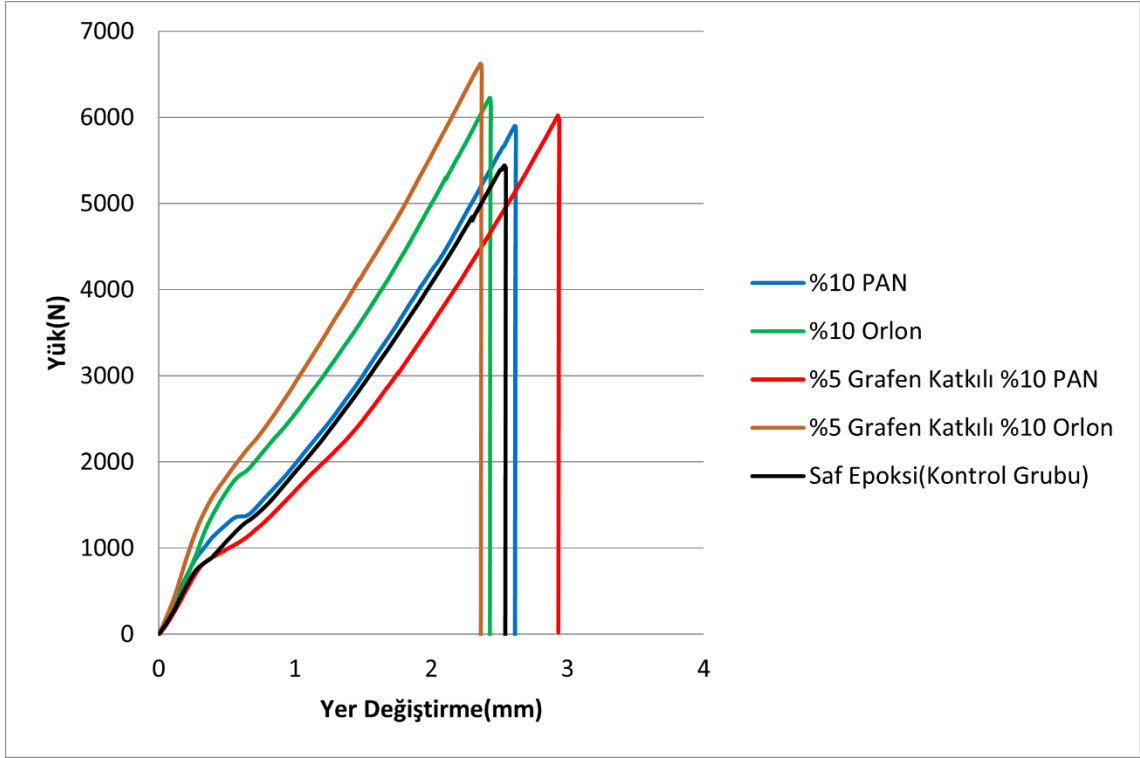
PAN ve Orlona ait bütün XRD eğrilerinde de yaklaşık $2\theta = 17^\circ$ 'de geniş ve karakteristik bir pik sergilemektedir. Bu pik, PAN polimerinin hekzagonal kristal yapısındaki (100) düzlemine karşılık gelir ve malzemenin yarı kristal doğasını doğrular. Bu bulgu, literatürdeki PAN nanolifleri üzerine yapılan XRD çalışmalarıyla tutarlıdır. (Jatoi v.d., 2019; Kaur v.d., 2016). Orlon spektrumunun da benzer bir desen göstermesi, kimyasal olarak PAN temelli bir akrilik elyaf olduğunu teyit eder.

Grafen katkılı kompozit numunelerde iki önemli değişiklik gözlemlenmektedir. PAN ve Orlon'a ait olan $\sim 17^\circ$ 'deki polimer piki varlığını korumaktadır. Bununla birlikte, $2\theta = 26,8^\circ$ civarında yeni ve keskin bir pik ortaya çıkmaktadır. Bu pik, grafenin (002) düzlemine aittir ve grafen tabakalarının polimer matrisi içinde başarılı bir şekilde dağıldığını gösterir. Literatürde, PAN/grafen kompozitlerinde grafenin bu karakteristik piki ile tanımlandığı belirtilmektedir (Aslam v.d., 2022).

Spektrumlar, saf polimerlerin (PAN ve Orlon) beklenen yarı kristal yapısını göstermektedir. Grafen katkısı, polimerin kristal yapısını temelden değiştirmemekte, ancak kompozit yapıya kendi kristal düzlemlerini eklemektedir. Özellikle Orlon ve Grafen katkılı numunelerde $44-45^\circ$ gibi daha yüksek açılarda görülen keskin piklerin, elektroğirme işlemi sürecinde elyaf numunelerin üretimi sırasında kullanılan alüminyum folyoda kaynaklanma ihtimali bulunmaktadır.

4.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Üretimi yapılan kompozitlerin uçları arasına uygulanan yük (N) ve buna bağlı olarak numunenin uzama miktarını (yer değiştirme, mm) gösteren bir gerilim-gerinim grafiği Şekil 4.8 de verilmektedir. Eğrilerin ulaştığı tepe noktası, numunenin kopmadan önce dayanabildiği maksimum yükü (maksimum çekme dayanımı) temsil eder. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere grafen katkılı orlon numunesi 6700 N değeri ile en yüksek çekme dayanımına sahiptir. Çekme dayanımları sırasına göre katkısız Orlon numunesi 6200 N gibi bir değer almaktadır. Grafen katkılı PAN 6000 N, katkısız PAN numunesi ise 5900 N çekme kuvveti ile Orlon'a göre daha düşük bir değere sahiptir. Elyaf takviyelerinin etkisini karşılaştırmak adına elyaf ile desteklenmemiş yalnızca saf epoksi ile yapılan yapıştırma numunesini çekme dayanımı ise 5400 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Hazırlanan çekme deneyi numunelerinin yük-yer değiştirme grafiği

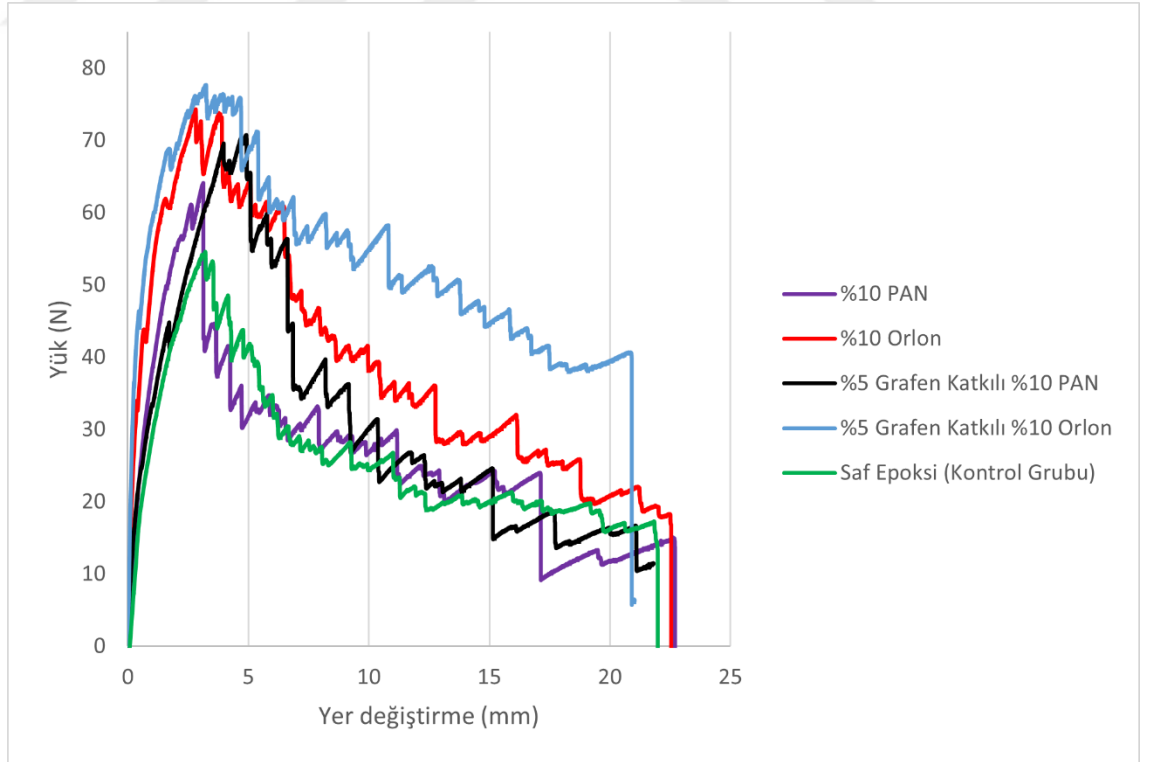
Grafikte en dikkat çekici bulgu, geri dönüştürülmüş bir malzeme olan Orlon'un ve onun grafenli kompozitinin, saf PAN polimerinden daha yüksek bir çekme performansı göstermesidir. Genellikle geri dönüşüm süreçleri polimerlerin molekül ağırlığını düşürerek mekanik özelliklerini zayıflatır. Ancak bu çalışmada Orlon'un daha iyi performans göstermesi, orijinal akrilik elyafın (Orlon) üretiminde kullanılan komonomerlerin veya katkı maddelerinin polimer zincirleri arasında daha iyi bir etkileşim sağladığını düşündürmektedir.

Grafen, olağanüstü mekanik özellikleriyle bilinen bir malzemedir ve polimer matrislere eklendiğinde kompozitlerin çekme mukavemetini ve elastisite modülünü önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Grafen katkısı, Orlon'un maksimum dayanımını yaklaşık %8 oranında artırarak beklendiği gibi pozitif bir etki göstermiştir. Bu, grafen ve Orlon matrisi arasında etkili bir yük transferi olduğunu göstermektedir. Grafen katkısı, katkısız PAN elyafla desteklenmiş yapıştırırmaya kıyasla maksimum dayanımda belirgin bir artış sağlamamış, ancak malzemenin daha az yer değiştirerek (daha gevrek bir şekilde) kopmasına neden olmuştur. Bu durum, grafenin PAN matrisi içinde homojen dağılmamış olabileceğini veya arayüzey bağının zayıf kalarak gerilimi etkin bir şekilde dağıtamadığını düşündürülebilir.

Elektroeoğırme ile üretilen nanolifler, yüksek yüzey alanı/hacim oranları sayesinde kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanıldığında matris ile güçlü bir arayüzey oluşturur. Bu durum, nanofiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımını, delaminasyon direncini ve interlaminer kırılma tokluğunu artırır. Grafikteki tüm polimer numunelerinin elyaf takviyesi bulunmayan epoksiden daha yüksek performans göstermesi, nanoliflerin bu güçlendirici etkisinin bir kanıtıdır.

Geri dönüştürülmüş Orlon nanoliflerinin, saf PAN'a karşı mekanik olarak sadece geçerli bir alternatif değil, aynı zamanda daha yüksek performanslı bir seçenek olabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca yapılan deney çalışması, grafen takviyesinin başarısının, matris polimeriyle olan uyumuna ve arayüzey etkileşimine kritik düzeyde bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan DCB deneylerinin sonuçları Şekil 4.8.'da gösterilmektedir. DCB grafiği, kompozitin katmanları arasındaki çatlak ilerlemesine karşı direncini (tokluğunu) göstermektedir. Grafikteki tüm nanolif takviyeli numunelerin, takviyesiz "Saf" numuneden kat kat daha tok olduğu net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.8. Çift konsol kırı (DCB) deneyinin yük-yer değiştirme grafiği

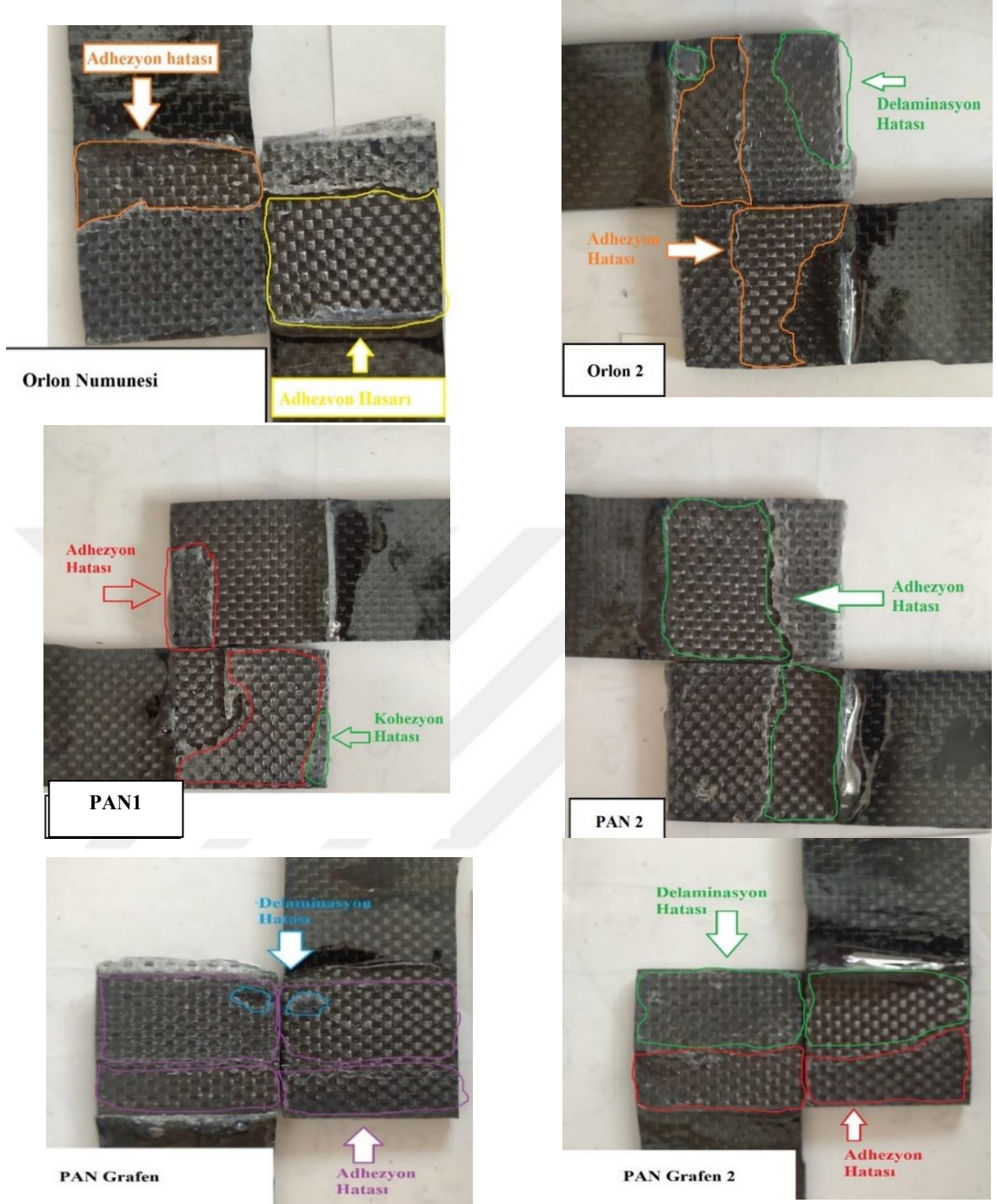
Nanolif ara katmanlama ve lif köprülemesi ile oluşan tokluk artışının arkasındaki temel mekanizma, literatürde "nanofiber interleaving" olarak bilinen tekniktir. Kompozit katmanları arasına yerleştirilen nanolif ağı, ilerleyen bir çatlakla karşılaştığında, çatlağın iki yüzeyi arasında köprüler kurar ("fiber bridging"). Çatlağın ilerleyebilmesi için bu mikroskobik lif köprülerini kırması veya matrsten sıyırması gerekir ki bu da büyük miktarda enerji tüketir. Bu enerji sönümleme mekanizması, malzemenin kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırır.

Grafen katkılı numunelerin en üstün tokluk değerlerini göstermesi, grafenin "lif köprüleme" mekanizmasını daha da güçlendirdiğini göstermektedir. Akademik çalışmalar, nanoliflere eklenen grafenin, liflerin kendi içsel mukavemetini artırdığını ve çatlak ucunda ek enerji yutucu mekanizmalar (örneğin, yüzey alanını artırarak) oluşturduğunu rapor etmektedir. Bu sinerjik etki, Grafen Katkılı Orlon numunesinin neden en tok malzeme olduğunu bilimsel olarak açıklamaktadır (Rafie, 2010).

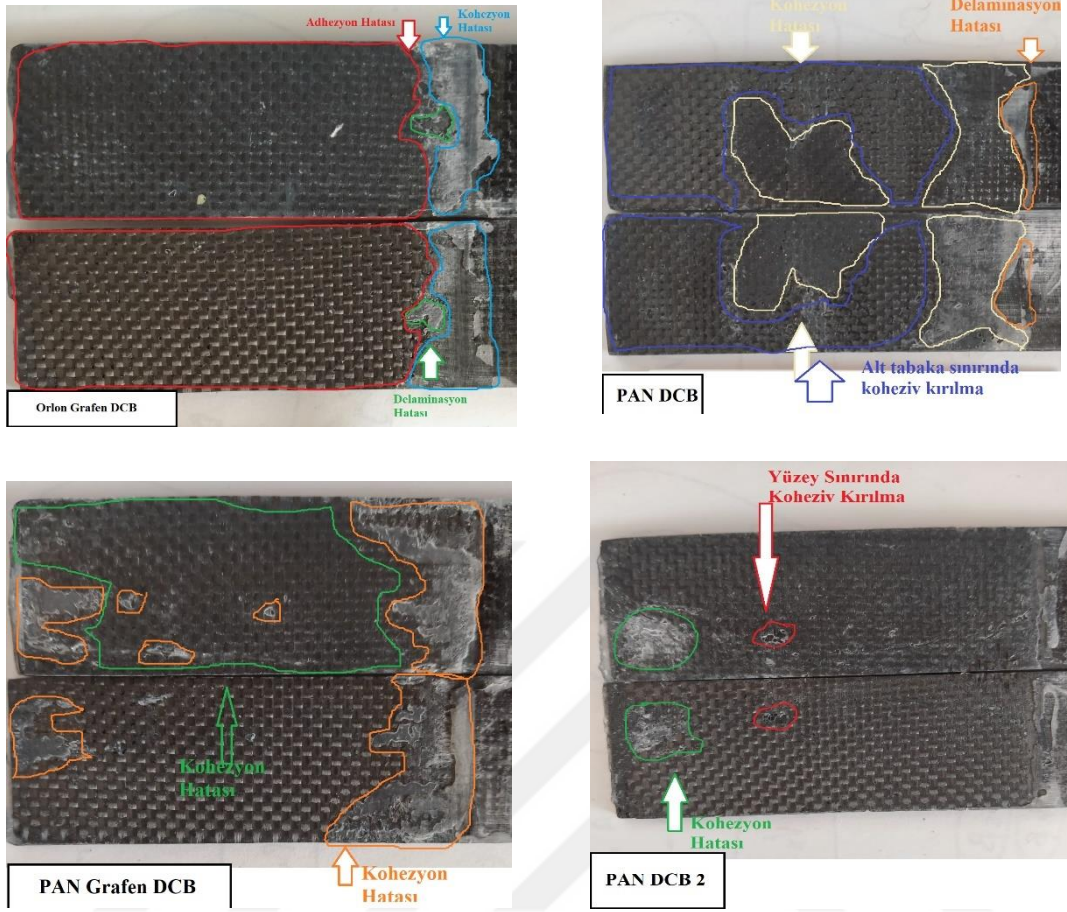
Kirişlerin açılması sırasında numunelerin üzerinde ani yük değişimi görülmektedir. Bunun sebep olarak katmanlar arasında olan çatlaklardır. Numunelerin hepsinde genel olarak çatlak uzunluğu arttıkça çatlağı ilerletecek olan kritik yük değerlerinin de azaldığı görülmektedir (Palazzetti ve Zucchelli, 2017; Ulus, 2019)

4.5. Çekme Deneyi Numunelerinin Makroskobik İncelenmesi

Çekme deneyleri sonucunda oluşan yüzey hasarları normal şartlarda çok sağlıklı bir sonuç veremez ancak numune hakkında genel bir fikir oluşturur. Şekil 4.10'da farklı bağlantı hataları görülmektedir. Orlon 2, PAN grafen, PAN grafen 2 numunelerindeki delaminasyon hataları yapıştırıcının yüzeye iyi tutunduğunu gösteriyor. Adhezyon hatası olan bölgelerde yeterince yüzeye tutunma olmadığı görünüyor.



Şekil 4. 9. Çekme deneyi sonucu oluşan bağlantı hataları



Şekil 4. 10. DCB deneyinde oluşan bağlantı hataları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, "Polimerlerin Elektroğirme Yöntemiyle Geri Dönüşümü ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı tez çalışmasının temel bulguları, bilimsel açıklamalarıyla birlikte bütünsel bir şekilde değerlendirilmekte ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

5.1. Temel Bulgular ve Bilimsel Değerlendirmesi

Saf PAN'dan üretilen nanoliflerin homojen ve kusursuz bir morfoloji sergilerken, geri dönüştürülmüş akrilikten üretilen liflerin daha kalın ve heterojen bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Bu farklılığın temel nedenleri, geri dönüştürülmüş malzemenin maruz kaldığı prosesler sonucu moleküler ağırlığının (M_w) düşmesi ve yapısında safsızlıklar ile ticari üretimden kaynaklanan komonomerler (örneğin metil akrilat) barındırmasıdır. Düşük moleküler ağırlık, elektroğirme sırasında jet kararsızlığına yol açarak boncuklu ve düzensiz liflerin oluşumuna neden olur.

Beklenmedik Mekanik Performans Üstünlüğü Mekanik test sonuçları, tezin en dikkat çekici bulgusunu ortaya koymuştur. Hem tek yönlü çekme testinde hem de DCB testinde, geri dönüştürülmüş Orlon esaslı numuneler, saf PAN esaslı numunelere göre belirgin şekilde daha üstün bir mekanik performans sergilemiştir. Bu sonuç, geri dönüştürülmüş malzemelerin genellikle daha zayıf olduğu yönündeki genel beklentinin aksinedir. Bu üstünlüğün olası nedenleri komonomer etkisi ve lif morfolojisi olabilir. Orlon'un yapısındaki komonomerler, saf PAN'a kıyasla daha esnek bir polimer zinciri oluşturarak kompozit numunelerde matris ile daha iyi bir arayüzey bağı kurmuş ve yükün daha etkin dağılmasını sağlamış olabilir. Orlon liflerinin daha heterojen yapısı, çatlak ilerlemesi sırasında daha fazla enerji sönümleyici bir mekanizma oluşturarak özellikle kırılma tokluğunu artırmış olabilir.

Bu çalışmanın en önemli sonucu, yalnızca mutlak performans değil, maliyet ve sürdürülebilirlik dengesidir. Geri dönüştürülmüş akrilik elyaf atıkları, saf PAN'a kıyasla neredeyse sıfır maliyetli bir hammadDEDİR. Elde edilen mekanik performansın saf PAN'dan bile daha iyi olduğu düşünüldüğünde, malzemenin performans/maliyet oranı saf PAN'dan çok daha üstündür. Bu durum, geri dönüştürülmüş akrilik bazlı kompozitleri,

ultra yüksek performans gerektirmeyen sayısız endüstriyel uygulama için ideal bir aday haline getirmektedir:

5.2.Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu tezin literatüre en önemli katkısı, endüstriyel bir atığın (geri dönüştürülmüş akrilik elyaf), yüksek teknoloji bir malzeme olan saf PAN'a karşı sadece bir alternatif olmakla kalmayıp, belirli kompozit uygulamalarında daha iyi mekanik sonuçlar verebileceğini göstermesidir. Bu bulgu, geri dönüştürülmüş malzemelerin potansiyelini yeniden değerlendirmek için önemli bir kapı aralamaktadır.

5.3. Çalışmanın Ana Sonuçları

Bu tez çalışması, düşük maliyetli ve bol miktarda bulunan geri dönüştürülmüş akrilik elyaf atıklarının, katma değerli bir malzeme olan karbon elyaf üretimi için bir öncü olarak kullanılabilirliğini, endüstri standardı saf PAN ile karşılaştırarak araştırmıştır. Elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1.Geri dönüştürülmüş akrilik elyaf, DMF içinde başarıyla çözülmüş ve elektroegirme yöntemiyle sürekli nanolif matları olarak üretilebilmiştir. Bu, tekstil atıklarının ileri bir üretim tekniğiyle nanoyapılı malzemelere dönüştürülebileceğini göstermiştir.

2.Saf PAN'dan üretilen nanolifler, homojen ve boncuksuz bir morfoloji sergilerken, geri dönüştürülmüş akrilikten üretilen liflerin, daha heterojen bir çap dağılımına sahip olduğu ve yapısal kusurlar (boncuklar) içerdiği tespit edilmiştir. Ancak beklenin aksine PAN elyaflar ORLON elyaflardan daha kalın elde edilmiştir. Bu farklılığın, geri dönüştürülmüş malzemenin daha düşük moleküler ağırlığına ve yapısındaki komonomer/safsızlık içeriğine bağlı olduğu düşünülmektedir.

3.FTIR analizi, her iki malzemenin de temel olarak PAN yapısında olduğunu doğrulamış, ancak geri dönüştürülmüş akrilikte komonomerlere ait ek kimyasal izler tespit etmiştir. Benzer şekilde XRD analizinde de elyafların hammaddesinin büyük ölçüde benzer olduğu görülmektedir.

4.Mekanik testler, hem nanolif matı hem de grafen katkılı elyaf formunda, saf PAN'dan elde edilen malzemelerin, geri dönüştürülmüş akrilikten elde edilenlere göre

belirgin şekilde daha düşük çekme dayanımına ve Young modülüne sahip olduğunu nicel olarak kanıtlamıştır.

5.Geri dönüştürülmüş akrilik bazlı elyafın sunduğu muazzam maliyet avantajı ve sürdürülebilirlik katkısı nedeniyle, ultra yüksek performans gerektirmeyen (örneğin, otomotiv, inşaat, spor malzemeleri) geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesi için teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir bir alternatif olma potansiyeli taşıdığı sonucuna varılmıştır.

5.4. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışma, geri dönüştürülmüş akrilik elyafın potansiyeline dair önemli temel bilgiler sunmakla birlikte, konunun daha derinlemesine araştırılması için yeni kapılar aralamıştır. Gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1.Bu çalışmada, karşılaştırmanın adil olması için sabit proses parametreleri kullanılmıştır. Ancak geri dönüştürülmüş akriliğin kendine özgü reolojik özellikleri vardır. Gelecekteki çalışmalarda, geri dönüştürülmüş akrilik çözeltisi için elektroğirme parametrelerinin (polimer konsantrasyonu, uygulanan voltaj, akış hızı, mesafe) bir deney tasarımı (Design of Experiments - DoE) yaklaşımı kullanılarak sistematik bir şekilde optimize edilmesi önerilmektedir. Bu, geri dönüştürülmüş malzemenin gerçek morfolojik ve mekanik potansiyelinin ortaya çıkarılmasını sağlayacaktır.

2.Bu çalışmada tek bir tür geri dönüştürülmüş akrilik elyaf kullanılmıştır. Piyasada farklı renklerde, farklı komonomer içeriklerine sahip ve farklı kullanım ömürlerinden geçmiş çok çeşitli akrilik atık bulunmaktadır. Bu farklı atık kaynaklarının, elektroğirme prosesi ile üretilen elyaf özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, yöntemin genellenebilirliği hakkında değerli bilgiler sunacaktır.

3.Üretilen kompozit malzemelerin sadece çekme özellikleri değil, aynı zamanda spesifik uygulamalar için kritik olan diğer özellikleri de (örneğin, darbe dayanımı, yorulma ömrü, termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik) test edilmelidir. Bu, malzemenin potansiyel kullanım alanlarını daha net bir şekilde tanımlamaya yardımcı olacaktır.

4.Bu çalışmanın en önemli motivasyonlarından biri ekonomik ve çevresel faydalardır. Saf PAN ve geri dönüştürülmüş akrilik bazlı elyaf üretim süreçleri için kapsamlı bir tekno-ekonomik analiz (TEA) ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA)

yapılması, bu faydaları nicel olarak ortaya koyacak ve endüstriyel fizibiliteyi daha sağlam bir zeminde değerlendirmeyi mümkün kılacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Acik, G., Cansoy, C. E., ve Kamaci, M. (2019). Effect of flow rate on wetting and optical properties of electrospun poly(vinyl acetate) micro-fibers. *Colloid and Polymer Science*, 297(1), 77-83. <https://doi.org/10.1007/s00396-018-4443-3>
- Afzir. (t.y.). *Karbon Fiber Kumaş*. <https://afzir.com/tr/carbon-fiber/>
- Al-Abduljabbar, A., ve Farooq, I. (2023). Electrospun Polymer Nanofibers: Processing, Properties, and Applications. *Polymers*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/polym15010065>
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., ve Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625-2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Andrady, A. L., ve Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- Almafie, M. R., Marlina, L., Riyanto, R., Jauhari, J., Nawawi, Z., ve Sriyanti, I. (2022). Dielectric Properties and Flexibility of Polyacrylonitrile/Graphene Oxide Composite Nanofibers. *ACS Omega*, 7(37), 33087–33096. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03144>
- Aslam, M., Khan, T., Basit, M., Masood, R., ve Raza, Z. A. (2022). Polyacrylonitrile-based electrospun nanofibers – A critical review. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 53(12), 1575–1591. <https://doi.org/10.1002/mawe.202200150>
- Baji, A., Mai, Y. W., Wong, S. C., Abtahi, M., ve Chen, P. (2010). Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. *Composites Science and Technology*, 70(5), 703-718. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.01.010>
- Banikazemi, S., Rezaei, M., Rezaei, P., Babaie, A., ve Eyvazzadeh-Kalajahi, A. (2020). Preparation of electrospun shape memory polyurethane fibers in optimized electrospinning conditions via response surface methodology. *Polymers for Advanced Technologies*, 31(10), 2199-2208. <https://doi.org/10.1002/pat.4940>
- Bhardwaj, N., ve Kundu, S. C. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, 28(3), 325-347. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>
- Bluhm, H., Frey, W., Giese, H., Hoppé, P., Schultheiß, C., ve Sträßner, R. (2000). Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(5), 625-636. <https://doi.org/10.1109/94.879358>
- Bream, C. E., ve Hornsby, P. R. (2001). Comminuted thermoset recyclate as a reinforcing filler for thermoplastics - Part I Characterisation of recyclate feedstocks. *Journal of Materials Science*, 36, 2977-2990.

- Buluş, E., Tosun, G., ve Şahin, Y. M. (2017). *Doğal İzole Edilmiş Biyoseramiklerden Elektrospinning Yöntemi İle Polimerik Biyokompozit Malzeme Eldesi*. Fırat Üniversitesi.
- Casasola, R., Thomas, N. L., Trybala, A., ve Georgiadou, S. (2014). Electrospun poly lactic acid (PLA) fibres: Effect of different solvent systems on fibre morphology and diameter. *Polymer*, 55(18), 4728-4737. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.06.032>
- Cordoba, A., Saldias, C., Urzúa, M., Montalti, M., Guernelli, M., Focarete, M. L., ve Leiva, A. (2022). On the Versatile Role of Electrospun Polymer Nanofibers as Photocatalytic Hybrid Materials Applied to Contaminated Water Remediation: A Brief Review. *Nanomaterials*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/nano12050756>
- Czerwinska, N., Giosuè, C., Generosi, N., Pierpaoli, M., Jbr, R., Luzi, F., Corinaldesi, V., ve Ruello, M. L. (2025). Electrospun Fibers from Biobased and Recycled Materials for Indoor Air Quality Enhancement. *Molecules*, 30(6). <https://doi.org/10.3390/molecules30061214>
- Çeliközlü, S. (2023). Biyoaktif Bileşiklerin Elektro eğirme Yöntemi İle Nanoenkapsülasyonu. *Nanoteknoloji ve Organik Kimya*, 0-1. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub393.c1560>
- Diwan, T., Abudi, Z. N., Al-Furaiji, M. H., Nijmeijer, A. (2023). A Competitive Study Using Electrospinning and Phase Inversion to Prepare Polymeric Membranes for Oil Removal. *Membranes*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/membranes13050474>
- De Vrieze, S., Van Camp, T., Nelvig, A., Hagström, B., Westbroek, P., De Clerck, K. (2009). The effect of temperature and humidity on electrospinning. *Journal of Materials Science*, 44(5), 1357-1362. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3010-6>
- Dincer, K., Önal, G., Akdemir, A., & Selbes, M. (2016). Elektro Eğirme Yöntemiyle Nanofiber Tabakalı Hava Filtresi Üretimi ve Karakterizasyonu. İçinde *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology* (C. 4, Sayı 4). <https://doi.org/10.15317/scitech.2016.57>
- Dziike, F., Makurunje, P., Matshitse, R. (2022). Biomass Electrospinning: Recycling Materials for Green Economy Applications. *Electrospinning - Material Technology of the Future, May 2022*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103096>
- ecfr. (t.y.). *PART 303—RULES AND REGULATIONS UNDER THE TEXTILE FIBER PRODUCTS IDENTIFICATION ACT*. <https://www.ecfr.gov/current/title-16/chapter-I/subchapter-C/part-303>
- Frank, E., Hermanutz, F., Buchmeiser, M. R. (2012). Carbon fibers: Precursors, manufacturing, and properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 297(6), 493-501. <https://doi.org/10.1002/mame.201100406>

- Frank, E., Steudle, L. M., Ingildeev, D., Spörl, J. M., Buchmeiser, M. R. (2014). Carbon fibers: Precursor systems, processing, structure, and properties. *Angewandte Chemie - International Edition*, 53(21), 5262-5298. <https://doi.org/10.1002/anie.201306129>
- Fredi, G., ve Dorigato, A. (2021). Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(3), 159-177. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.006>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 25-29. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Görgün, N. (2019). *Elektro- eğirme tekniği kullanılarak polimer esaslı katalizör destek malzemesi hazırlanması ve karakterizasyonu*. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Gu, J., Gu, H., Cao, J., Chen, S., Li, N., Xiong, J. (2018). Robust hydrophobic polyurethane fibrous membranes with tunable porous structure for waterproof and breathable application. *Applied Surface Science*, 439, 589-597. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.267>
- Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Huang, X. (2009). Fabrication and properties of carbon fibers. *Materials*, 2(4), 2369-2403. <https://doi.org/10.3390/ma2042369>
- Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223-2253. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00178-7)
- Hunt, E. J., Zhang, C., Anzalone, N., Pearce, J. M. (2015). Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. *Resources, Conservation and Recycling*, 97(April), 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.004>
- Ince Yardimci, A., Yagmurcukardes, N., Yagmurcukardes, M., Capan, I., Erdogan, M., Capan, R., Tarhan, O., Acikbas, Y. (2022). Electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber: preparation, experimental characterization, organic vapor sensing ability and theoretical simulations of binding energies. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 128(3). <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05314-5>
- Jambeck, J. R., Roland, G., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L. (2015). Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 764-768.
- Jinsuncarbon. (2024). *Karbon Elyafın Özellikleri*. <https://jinsuncarbon.com/tr/karbon-elyafin-ozellikleri/>
- Jatoi, A. W., Gianchandani, P. K., Kim, I. S., Ni, Q. Q. (2019). Sonication induced effective approach for coloration of compact polyacrylonitrile (PAN) nanofibers.

- Ultrasonics Sonochemistry*, 51(June 2018), 399–405.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.035>
- Kaur, N., Kumar, V., Dhakate, S. R. (2016). Synthesis and characterization of multiwalled CNT–PAN based composite carbon nanofibers via electrospinning. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2051-6>
- Karimi, A., Rahmatabadi, D., Baghani, M. (2024). Direct Pellet Three-Dimensional Printing of Polybutylene Adipate-co-Terephthalate for a Greener Future. *Polymers*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/polym16020267>
- Khayyam, H., Jazar, R. N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii, K., Fakhrhoseini, S. M., Kumar, S., Naebe, M. (2020). PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling. *Progress in Materials Science*, 107(May 2019), 100575. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100575>
- Kim, J., Choi, M., You, N. H., Yu, J., Yoo, H., Ku, B. C. (2021). High-flame retarding properties of polyacrylonitrile copolymer nanocomposites with synergistic effect of elemental sulfur-doped reduced graphene oxide and bio-derived catechol units. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 148, 106477. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106477>
- Klotz, M., Haupt, M., Hellweg, S. (2023). Potentials and limits of mechanical plastic recycling. *Journal of Industrial Ecology*, 27(4), 1043-1059. <https://doi.org/10.1111/jiec.13393>
- Koski, A., Yim, K., Shivkumar, S. (2004). Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning. *Materials Letters*, 58(3-4), 493-497. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00532-9](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00532-9)
- Kozanoğlu, G. S. (2006). *Elektrospinning Yöntemiyle Nanolif Üretim Teknolojisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Li, X., Peng, Y., Deng, Y., Ye, F., Zhang, C., Hu, X., Liu, Y., Zhang, D. (2022). Recycling and Reutilizing Polymer Waste via Electrospun Micro/Nanofibers: A Review. *Nanomaterials*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/nano12101663>
- Lima, F. de A., Honorato, A. C. S., Medeiros, G. B., Chagas, P. A. M., da Silva, E. N., Vieira, A. C. C., Oliveira, W. P., Aguiar, M. L., Guerra, V. G. (2025). Analysis of recycled polystyrene electrospinning process: Fiber diameter, morphology, and filtration applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115435>
- Liu, X., v.d. (2018). "Effect of comonomer content on the structure and properties of polyacrylonitrile-based precursor fibers". *RSC Advances*, 8(26), 14503-14511.
- Lv, M. Y., Ge, H. Y., Chen, J. (2009). Study on the chemical structure and skin-core structure of polyacrylonitrile-based fibers during stabilization. *Journal of Polymer Research*, 16(5), 513-517. <https://doi.org/10.1007/s10965-008-9254-7>

- Maraveas, C., Kyrtopoulos, I. V., Arvanitis, K. G. (2024). Evaluation of the Viability of 3D Printing in Recycling Polymers. *Polymers*, 16(8), 37. <https://doi.org/10.3390/polym16081104>
- Mehrpouya, F., Foroughi, J., Naficy, S., Razal, J. M., Naebe, M. (2017). Nanostructured electrospun hybrid graphene/polyacrylonitrile yarns. *Nanomaterials*, 7(10), 11–13. <https://doi.org/10.3390/nano7100293>
- Milam-Guerrero, J. A., Kwon, D. J., Choi, Y. Y., Al-Badani, F., Jiang, J., Schaefer, J., Myung, N. V. (2023). From waste to wearable: an alternative waste stream for unusable textiles turned into piezoelectric textiles. *RSC Sustainability*, 1(2), 326–334. <https://doi.org/10.1039/d2su00068g>
- Meng, L., Zhang, Y., Huang, Y., Shibata, M., Yosomiya, R. (2004). Studies on the decomposition behavior of nylon-66 in supercritical water. *Polymer Degradation and Stability*, 83(3), 389–393. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.08.001>
- Nasouri, K., Shoushtari, A. M., Kafrou, A. (2015). "Thermal and spectroscopic studies of electrospun polyacrylonitrile/graphene nanocomposite". *Polymer Composites*, 36(2), 241–248.
- Nurul, S., Jamil, A., Daik, R., & Ahmad, I. (2014). *Synthesis and Thermal Properties of Acrylonitrile/Butyl Acrylate/Fumaronitrile and Acrylonitrile/Ethyl Hexyl Acrylate/Fumaronitrile Terpolymers as a Potential Precursor for Carbon Fiber*. 6207–6223. <https://doi.org/10.3390/ma7096207>
- Owais, A. (n.d.). *How is Carbon Fiber Made?* https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=24480&utm_source=chatgpt.com
- Patel, S. H., Gonsalves, K. E., Stivala, S. S., Reich, L., Trivedi, D. H. (1993). Alternative procedures for the recycling of sheet molding compounds. *Advances in Polymer Technology*, 12(1), 35–45. <https://doi.org/10.1002/adv.1993.060120104>
- Palazzetti, R. ve Zucchelli, A. (2017). Electrospun nanofibers as reinforcement for composite laminates materials – A review. *Composite Structures*, 182(September), 711–727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.021>
- Perrin, D., Leroy, E., Clerc, L., Bergeret, A., Lopez-Cuesta, J. M. (2005). Treatment of SMC composite waste for recycling as reinforcing fillers in thermoplastics. *Macromolecular Symposia*, 221, 227–236. <https://doi.org/10.1002/masy.200550323>
- Qi, Z., Yu, H., Chen, Y., Zhu, M. (2009). Highly porous fibers prepared by electrospinning a ternary system of nonsolvent/solvent/poly(l-lactic acid). *Materials Letters*, 63(3–4), 415–418. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.10.059>
- Rafiee, M. A., v.d. (2010). "Graphene as a reinforcement to improve the Apple-converted-space mechanical properties of polymer composites". *Small*, 6(2), 179–183.

- Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- Rashid, T. U., Gorga, R. E., Krause, W. E. (2021). Mechanical Properties of Electrospun Fibers—A Critical Review. *Advanced Engineering Materials*, 23(9), 1-26. <https://doi.org/10.1002/adem.202100153>
- Sadeghi, M., v.d. (2015). "A review on quiescent and electrospinning of polyacrylonitrile". *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 52(12), 991-1004.
- Sanchaniya, J. V., Lasenko, I., Kanukuntala, S. P., Smogor, H., Viluma-Gudmona, A., Krasnikovs, A., Tipans, I., Gobins, V. (2023). Mechanical and Thermal Characterization of Annealed Oriented PAN Nanofibers. *Polymers*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/polym15153287>
- Shen, L., Haufe, J., Patel, M. K. (2009). Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. *Group Science, Technology and Society*, June, 41.
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2127-2139. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>
- Song, Y., Wang, Y., Xu, L., Wang, M. (2019). Fabrication and characterization of electrospun aligned porous PAN/Graphene composite nanofibers. *Nanomaterials*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/nano9121782>
- Supaphol, P. ve Chuangchote, S. (2008). On the electrospinning of poly(vinyl alcohol) nanofiber mats: A revisit. *Journal of Applied Polymer Science*, 108, 969-978. <https://doi.org/10.1002/app.27664>
- Torres, A. (2000). Recycling by pyrolysis of thermoset composites: characteristics of the liquid and gaseous fuels obtained. *Fuel*, 79(8), 897-902. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00220-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00220-3)
- Tsuchimoto, I. ve Kajikawa, Y. (2022). Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 14(24), 1-39. <https://doi.org/10.3390/su142416340>
- Turner, T. A., Pickering, S. J., Warrior, N. A. (2011). Development of recycled carbon fibre moulding compounds - Preparation of waste composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(3), 517-525. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.11.010>
- Utekar, S., V K, S., More, N., Rao, A. (2021). Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites – Driving force, challenges and methods. *Composites Part B: Engineering*, 207(December 2020), 108596. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108596>

- Ulus, H. (2019). Tuzlu Su Yaşlandırmasının Halloysit Nanotüp-Epoksi/Bazalt Fiber Nanokompozitlerin Mekanik Ve Kırılma Performansına Etkisi.
- Vashisth, P., Pruthi, P. A., Singh, R. P., Pruthi, V. (2014). Process optimization for fabrication of gellan based electrospun nanofibers. *Carbohydrate Polymers*, 109, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.003>
- Verschate, O., Loccufier, E., Swanckaert, B., De Clerck, K., Daelemans, L. (2023). Microscale and Macroscale Deformation Behavior of Electrospun Polymeric Nanofiber Membranes Using In Situ SEM during Mechanical Testing. *Polymers*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/polym15071630>
- Wang, L. ve Qin, X. (2024). *Electrospinning Fundamentals, Methods, and Applications*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/>
- Warren, C. D. (2016). Carbon Fiber Precursors and Conversion. İçinde *Oak Ridge National Laboratory*. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/fcto_h2_storage_700bar_workshop_3_warren.pdf
- Winter, H., Mostert, H. A. M., Smeets, P. J. H. M., Paas, G. (1995). Recycling of sheet-molding compounds by chemical routes. *Journal of Applied Polymer Science*, 57(11), 1409-1417. <https://doi.org/10.1002/app.1995.070571116>
- Yaman, N., Öktem, T., ve Seventekin, N. (2007). Karbon Liflerinin Özellikleri ve Kullanım Olanakları. *Ege Üniversitesi Tekstil Ve Konfeksiyon Dergisi*, 17(2), 90-95.
- Yao, J., Bastiaansen, C. W. M., Peijs, T. (2014). High strength and high modulus electrospun nanofibers. *Fibers*, 2(2), 158-187. <https://doi.org/10.3390/fib2020158>
- Yünel, T. Y., Ersoy, A., & Ehsani, A. (2019). X-ışını difraksiyonu yöntemi ile kantitatif mineral içeriği tayini ve çalışma şartlarının etkisi. *Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 16-28.
- Zhang, X., Khan, M. M. R., Yamamoto, T., Tsukada, M., Morikawa, H. (2012). Fabrication of silk sericin nanofibers from a silk sericin-hope cocoon with electrospinning method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 50(2), 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.12.006>
- Zhao, Y., Cao, X. ve Jiang, L. (2007). Bio-mimic Multichannel Microtubes by a Facile Method. *Journal of the American Chemical Society*, 129(4), 764-765. <https://doi.org/10.1021/ja068165g>