



**T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LASER ABLASYON YÖNTEMİYLE Ag
KATKILI TiO₂ METAL NANOPARÇACIK
ÜRETİMİ VE DOKU MÜHENDİSLİĞİNE
YÖNELİK KULLANIMI**

**Nezihe MEHTAP
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK Anabilim Dalı**

**Kasım-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Nezihe MEHTAP tarafından hazırlanan “Laser Ablasyon yöntemiyle Ag Katkılı TiO₂ Metal Nanoparçacık Üretimi ve Doku Mühendisliğine Yönelik Kullanımı” adlı tez çalışması 29/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof.Dr.Hamdi Şükür Kılıç

Üye

Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK

Üye

Doç.Dr.Yasemin GÜNDOĞDU KABAKÇI

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL

FBE Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 23201008 nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

İmza

Nezihe MEHTAP

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LASER ABLASYON YÖNTEMİYLE Ag KATKILI TiO₂ METAL NANOPARÇACIK ÜRETİMİ VE DOKU MÜHENDİSLİĞİNE YÖNELİK KULLANIMI

Nezihe MEHTAP

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
FİZİK Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

2024, 95 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK
Doç.Dr.Yasemin GÜNDOĞDU KABAKÇI

Nanoteknoloji döneminin başlamasıyla malzemelerin nano boyutta benzersiz özellikler sergilediği görülmüştür. Çeşitli nanomalzemeler arasında nanofiberler üstün özellikleri sayesinde tıptan endüstriye kadar birçok farklı alanda kullanım alanına sahiptirler. Nanofiber üretiminde etkili bir teknik olan elektroğirme yöntemi ile elde edilen fiberlerin morfolojisinin iyileştirilmesinde birçok modifikasyon yapılmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında temiz ve hızlı bir nanoparçacık yöntemi olarak bilinen laser ablasyon tekniği kullanılarak Ag ve TiO₂ nanoyapılarının femtosaniye (fs) laser ablasyon ile sentezi ortaya konmuştur. Laser sistemimizin 800 nm temel dalga boyu çıkışı kullanılmış ve bu dalga boyunda yaklaşık olarak 10¹²⁻¹⁴ W/cm² laser yoğunluğunda sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca bu üretilen NP'ların karakterizasyonu yapılarak poliakrilonitril (PAN) ve kolajen polimerleri içerisine katılanmış ve elektroğirme yöntemi kullanılarak alüminyum hedef üzerinde nanofiber üretimi gerçekleştirilmiştir. Doku mühendisliği uygulamalarında yoğun olarak kullanılan Ag ve TiO₂ malzemelerinin laser ablasyon yöntemi ile üretilerek polimer içerisindeki davranışları incelenmiştir. Elde edilen fiberlerin germe-çekme, yüzey gerilimi ve görüntüleme teknikleri ile fiber karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan ölçümde, nanofiberlerin çapının 1 ile 1.000 nm arasında değiştiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrosinning; Gümüş/TiO₂ NP'ları ;Kolajen ;Poliakrilonitril (PAN)

ABSTRACT

MS THESIS

**PRODUCTION OF Ag-DOPED TiO₂ METAL NANOPARTICULARS BY LASER
ABLATION METHOD AND THEIR USE IN TISSUE ENGINEERING**

Nezihe MEHTAP

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE OF PHILOSOPHY
IN PHYSICS**

Advisor: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

2024, 95 Pages

Jury

Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK

Doç.Dr.Yasemin GÜNDOĞDU KABAKÇI

With the beginning of the nanotechnology era, it has been observed that materials exhibit unique properties at the nanoscale. Among various nanomaterials, nanofibers have been used in many different areas from medicine to industry thanks to their superior properties. Many modifications have been made to improve the morphology of the fibers obtained by electrospinning, which is an effective technique in nanofiber production. In this master's thesis study, the synthesis of Ag and TiO₂ nanostructures with femtosecond (fs) laser ablation was demonstrated using the laser ablation technique, known as a clean and fast nanoparticle method. The 800 nm basic wavelength output of our laser system was used and the results were examined at approximately 10^{12-14} W/cm² laser intensity at this wavelength. In addition, the characterization of these produced NPs was made and they were added to polyacrylonitrile (PAN) and collagen polymers and nanofiber production was carried out on an aluminum target using the electrospinning method. Ag and TiO₂ materials, which are used intensively in tissue engineering applications, were produced by laser ablation and their behaviors within the polymer were examined. Fiber characterization of the obtained fibers was carried out by stretching-tension, surface tension and imaging techniques. In the measurement made with scanning electron microscope (SEM), it was observed that the diameter of the nanofibers varied between 1 and 1000 nm.

Keywords: Collagen ;Electrospinning; Silver/TiO₂ Nanoparticles; Polyacrylonitrile (PAN)

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 23201008 numaralı ve Laser Ablasyon Yöntemiyle TiO₂ ve Ag Metal Nanoparçacık Üretimi ve Doku Mühendisliğine Yönelik Kullanımı başlıklı tez projesi olarak desteklenmiş ve Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Bu tez çalışmasının tamamlanması sürecinde,

Çalışma konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar her bir aşamada bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan, danışmanım olduğu için hep gurur duyacağım değerli hocam sayın Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ'a,

Araştırmanın her bir aşamasında samimi yaklaşımlarıyla, görüşleriyle beni destekleyen, beni doğru yönde yönlendiren, motive eden sayın Doç. Dr. Yasemin GÜNDOĞDU KABAKÇI ve Doç. Dr. Serap YİĞİT GEZGİN hocalarıma

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde maddi destek sağlayan Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bugüne ulaşmamı sağlayan, varlıklarıyla güç veren her zaman yanımda olduklarını hissettiren canım annem Ayşe MEHTAP ve canım babam Şeref MEHTAP'a

tüm kalbimle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışmayı gerçekleştirmemde bana öncü olan annem Ayşe MEHTAP' a armağan ediyorum.

Nezihe MEHTAP
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1.NANOTEKNOLOJİ.....	4
1.1.1.NANOTEKNOLOJİNİN TANIMI, TARİHÇESİ VE KULLANIM ALANLARI	4
LASERİN TANIMI TARİHÇESİ ve ÇEŞİTLERİ	7
FEMTOSANİYE LASER	8
LASERİN UYGULAMA ALANLARI	9
LASER ABLASYON.....	11
NANOPARÇACIK OLUŞUMU İÇİN PLAL	11
(Sıvıda Darbeli Laser Ablasyonu)	11
NANOPARÇACIK	15
NP’LARIN ÖNEMİ.....	17
NANOPARÇACIK ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	22
NANOFİBER	22
NANOFİBERLERİN ÖNEMİ.....	24
ANTİBAKTERİYEL AKTİVİTEYE SAHİP NANOFİBERLER.....	24
NANOFİBER ÜRETİM YÖNTEMLERİ	25
ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİNİN TARİHÇESİ.....	26
ELEKTROEĞİRME YÖNYEMİ İLE NANOFİBER ÜRETİMİ	32
ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER	34

POLİMER ÇÖZELTİSİNDEN KAYNAKLANAN PARAMETRELER.....	35
İŞLEM PARAMETRELERİ.....	37
ÇEVRESEL PARAMETRELER.....	39
ELEKTROEĞRİLMİŞ NANOFİBERLERİN DOKU MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMI	40
POLİMERLER.....	41
KOLLAJEN	42
POLİAKRİLONİTRİL (PAN)	43
NANOFİBER KARAKTERİZASYONU İÇİN KULLANILAN CİHAZLAR.....	45
TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM).....	45
FTIR (Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi)	46
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	48
3.MALZEME VE YÖNTEM.....	52
LASER ÇALIŞMA PRENSİBİ	55
Laboratuvar Ortamında Kullanılan Cihazlar	56
Femtosaniye Laser Sistemi	56
Laser ablasyon ile nanoparçacık üretimi	57
PAN Çözeltilerinin Hazırlanması	59
Elektroegirme düzeneği	60
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	63
4.1. Analiz için Kullanılan Cihazlar	63
4.2. Nanofiberlerin Karakterizasyon Analizleri.....	64
4.2.1. FTIR Görüntü ve Analizleri.....	64
4.2.2. SEM Görüntü ve Analizleri	69
4.2.3. Çekme cihazı Görüntü ve Analizleri	77
5.SONUÇLAR.....	80
5.1 Öneriler	82
ÖZGEÇMİŞ	83
KAYNAKLAR	84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ag	Gümüş
g	Yerçekimi Sabiti
R	Damlacığın Yarıçapı
TiO ₂	Titanyum dioksit
V	Uygulanan Voltaj
ZnO	Çinko Oksit
γ	Yüzey gerilimi
ϵ	Dielektrik Sabiti
ρ	Çözelti Yoğunluğu

Kısaltmalar

AgNp	Gümüş nanoparçacık
DMF	Dimetilformadid
DNA	Deoksiriboz nükleik asit
EMD	Elektro Manyetik Dalga
FS	Femto Saniye
FTIR	Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopisi
HFIP	Propanol
Kv	Kilovolt
LAL	Sıvılarda Laser Ablasyonu
m	metre
mm	milimetre

nm	Nanometre
NP	Nanoparçacık
ns	Nanosaniye
PAN	Poliakrilonitril
PH	Pondus hydrogenii
PLA	Darbeli Lazer Ablasyon
PLAL	Sıvı içinde darbeli laser ablasyonu
PLGA	Poli laktik ko glikolik asit
Ps	pikosaniye
RNA	Ribonükleik asit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UV	Mor ötesi(Ultraviyole)
Vc	Kritik voltaj
YDFL	İterbiyum Katkılı Fiber Lazer
µm	mikrometre

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kompozit Malzemeler (HAMAMCI, 2018).....	1
Şekil 1.2. Laser ablasyon yöntemi ile metal bir hedeften nanoparçacık üretim tekniği .	12
Şekil 1.3. Nanoparçacık üretiminde kullanılan yöntemler	22
Şekil 1.4.İğne ucundaki damla üzerine etki eden kuvvetler (Çakmakçı, 2009)	29
Şekil 1.5.Elektriksel bükülme kararsızlığına sahip elektrospinning jet (Han, 2007)	32
Şekil 1.6. Elektroğirme tekniği kullanarak nanofiber üretim süreci	33
Şekil 1.7. PAN polimerinin polimerizasyonu(Çunayev, 2021)	44
Şekil 3. 1 Çalışmada kullanılan Poliakrilonitril (PAN)	53
Şekil 3. 2 Çalışmada kullanılan % 99.9 saflıktaki DMF	53
Şekil 3. 3 Çalışmada kullanılan (a) Ag, (b) TiO ₂	54
Şekil 3. 4 Çalışmada kullanılan Kolajen.....	55
Şekil 3. 5 Femtosaniye laser sistemi	57
Şekil 3. 6 Gümüş ve TiO ₂ NP'lerinin üretiminde kullanılan deney düzeneği	58
Şekil 3. 7 Ag nanoparçacık üretimi	58
Şekil 3. 8 TiO ₂ nanoparçacık üretimi	59
Şekil 3. 9 PAN çözeltisinin hazırlanması	59
Şekil 3. 10 Hazırlanan Ag, TiO ₂ NP'ları ve PAN karışımı	60
Şekil 3. 11 Polimer besleme ünitesi.....	61
Şekil 3. 12 Deneyde kullanılan elektroğirme düzeneği	61
Şekil 3. 13 Çözeltilerin oranlarının hesaplanmasında kullanılan araçlar.....	62
Şekil 3. 14 Güç Kaynağı	62
Şekil 3. 15 Silindirik nanofiber toplayıcı	63
Şekil 3. 16 Elektroğirme sonucu elde edilen nanofiber	63
Şekil 4.1. Fourier Dönüşüm Spektrometresi (FTIR) BRUKER / VERTEX 70 Cihazı (SÜ, İLTEK laboratuvar)	64
Şekil 4.2. TiO ₂ NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri	65
Şekil 4.3. Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri	66
Şekil 4.4. TiO ₂ ve Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri	67
Şekil 4.5. Kolajen 'e %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri.....	68
Şekil 4.6. TiO ₂ ve Ag NP'larına Kolajen ve %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri	69
Şekil 4.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Zeiss Evo LS10 Cihazı (SÜ, İLTEK laboratuvar)	70
Şekil 4 8 MTM-10 yüksek çözünürlüklü kalınlık izleme sistemi (İLTEK)	70
Şekil 4.9. TiO ₂ NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)	71

Şekil 4.10. Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)	72
Şekil 4.11. TiO ₂ ve Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)	73
Şekil 4.12. Kolajen 'e %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)	74
Şekil 4.13. TiO ₂ ve Ag NP'larına Kolajen ve %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)	76
Şekil 4.14. Çekme cihazı	77
Şekil 4.15. (a) Çekme testi esnasında numune görüntüsü, (b) çekme cihazına yerleştirmeye hazır numunenin görüntüsü.....	78
Şekil 4.16. Kuvvet - zaman grafiği.....	79
Şekil 4.17. Uzama – zaman grafiği.....	80

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Laser Uygulama Alanları(Akman, 2006)	10
Tablo 1.2. Sıvıda darbeli laser ablasyonu ile hazırlanan NP'ları etkileyen faktörler (Khairani ve ark., 2023).....	13
Tablo 1.3. NP'ların bazı kullanım alanları(BEYKAYA ve ÇAĞLAR, 2016)	18
Tablo 1.4. Çeşitli metal nanoparçacıklar ve bunların uygulama alanları(BEYKAYA ve ÇAĞLAR, 2016).....	19
Tablo 1.5. Nanofiberlerin uygulama alanları (Ofaz, 2016)	23
Tablo 1.6. Nanofiberlerin yapısını ve formunu etkileyen parametreler(Süslü, 2009)....	35

1. GİRİŞ

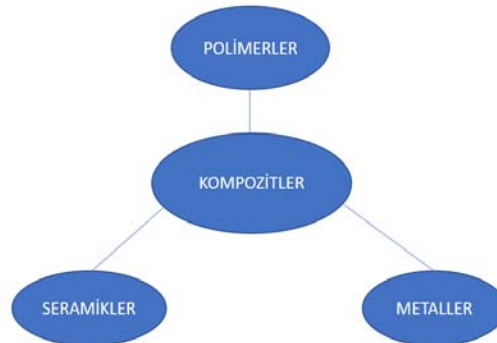
Bilim ve Teknolojideki uygulamalarıyla hızla büyüyen bir alan olarak ortaya çıkan ve nano ölçekte yeni malzemeler üretmek amacı taşıyan nanoteknoloji, birçok ülke tarafından stratejik bir alan olarak belirlenmiştir (Havva ve ÇÖLGEÇEN; Rai ve ark., 2009; Sabancı, 2019). Sivil ve askerî uygulamalar ile insanların yaşam tarzlarını ve ülke ekonomilerini dönüştürmede stratejik bir potansiyele sahip olan bu alanda yapılan yatırımlar her yıl düzenli olarak artmakta, bu da konunun önemini göstermektedir (ERGÜL ve ÇAKIR, 2023).

Nanoteknoloji temeline dayalı çalışmaların gün geçtikçe artma nedenlerini sıralayacak olursak;

- Malzemenin temel yapısındaki bilgi eksikliklerini tamamlayabilir olması
- Nanoteknolojinin umut verici pratik uygulamalar vaat etmesi,
- Çalışmaların sanayi sektöründe yüksek maddi kazanımlara olanak sağlaması
- Kullanılan teknolojilerin geliştirilmesine yönelik ihtiyaçlar
- Çevre sorunlarının çözümüne yönelik yöntem arayışları
- Birçok farklı bilim dalları ile birlikte çalışması

şeklinde sıralayabiliriz (Sekmen, 2019).

Malzemeler genel olarak; metal, seramik ve polimerler olmak üzere şekil 1’de gösterildiği gibi üç gruba ayrılmaktadır. Bu malzemelerin güçlü ve zayıf tarafları vardır. Gelişen teknoloji ile bu malzemelerden iki veya daha fazlası, içyapıları aynı kalacak şekilde baskın niteliklerinin tek bir malzemede toplanması amacıyla birleştirilerek üretilen yeni malzemeye kompozit malzeme denilmektedir (HAMAMCI, 2018).



Şekil 1.1. Kompozit Malzemeler (HAMAMCI, 2018)

Fazlarından bir tanesinin en az bir boyutunun 100 nm'den küçük olduğu çok fazlı sistemler olan nanokompozitler, nm biriminde olmaları nedeniyle yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptirler. Kimyalarına göre ikiye ayrılan nanokompozitler metalden yapılan inorganik (karbon olmayan) nanomalzemeler ve karbon ve hidrojenle yapılan organik (hidrokarbon) nanomalzemeler şeklindedir. Karbon bazlı nanomalzemeler (grafen, karbon nanotüpler ve karbon noktaları gibi NP'ler), çok sayıda çalışma ve çeşitli uygulamalar olması nedeniyle geniş bir morfoloji aralığına sahip farklı bir nanomalzeme sınıfı olarak kabul edilmektedir (Ehtesabi ve ark., 2023). Çok düşük yoğunluktaki nanomalzemeler polimer matrisler içine eklendiğinde polimerlerin fiziksel ve mekanik niteliklerinin önemli ölçüde değişimlerine sebep olmaktadır. Nanokompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan polimerler işleme kolaylığı, mekanik davranış ve esnek yapı özelliğine sahiptir. Polimer katkılı nanokompozit eldesinde pek çok farklı nanoparçacık kullanılabilmektedir (EREM ve ÖZCAN, 2015).

Antimikrobiyal özellik gösteren NP'ların , antibiyotikler ve biyositler gibi tipik organik bileşikler içerenlerden daha iyi antimikrobiyal performansa sahip olduğu ve lifli matların geliştirilmesinde gelecek vaad ettiği bilinmektedir. Benzer şekilde, titanyum dioksit ve gümüş antimikrobiyal nanoparçacıklar daha yüksek kimyasal ve termal stabilite gibi bazı avantajlar göstermiş olup bunun yanı sıra gelişmiş elektronik mekanik , ve termal özelliklere sahiptirler(Rodríguez-Tobías ve ark., 2019).

Nanoparçacık üretiminde aşağıdan yukarıya (Bottom-up) ve yukarıdan aşağıya (Top Down) olmak üzere iki farklı metod bulunmaktadır. Bu yöntemlerin ilkinde atom veya moleküllerden daha büyük boyutta malzeme elde edilirken, ikincisinde ise daha kaba cisimlerden daha küçük boyuta sahip NP'lar elde edilmektedir (Fazio ve ark., 2020).

NP sentezinde yeni metodolojilerin geliştirilmesine yönelik araştırmalardan olan Sıvıda Darbeli Laser Ablasyonu (PLAL), çevresel sürdürülebilir olması, uzun ömürlü olması ve kolay deney kurulumu (sentez ortamının aşırı koşullarını gerektirmeyen), gibi birçok umut verici avantaj sayesinde giderek artan bir ilgi kazanmaktadır (Dell'Aglia ve ark., 2015). Sıvı içinde darbeli laser ablasyonu (PLAL), nanoparçacık üretimi için kullanılan fiziksel ve yukarıdan aşağıya bir yaklaşım olup sıvı bir ortam altında katı bir hedefin (genellikle bir çubuk, plaka veya ince film) ışınlanması durumudur (Nyabadza ve ark., 2023). Sıvılarda laser ablasyonunun (LAL) kullanımı, tıbbi ve endüstriyel

uygulamalarda faydası tartışılmaz olan NP'ların üretilmesinde, en önemli fiziksel yaklaşımlardan biri olarak kabul görmüştür (Juma ve ark., 2023).

Nanofiber elde edilmesinde pek çok yöntem arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi de elektro eğirmedir. Bu yöntemin tercih edilmesindeki başlıca neden üretim için gerekli parametrelerinin basit ve maliyetsiz olmasının yanında hızlı bir şekilde değiştirilebilir olmasıdır. Bu yöntemde ekonomik ve kolay temin edilebilme özelliğine sahip polimer yapılar için en uygun çözücü seçilip nanofiber üretimi gerçekleştirilmektedir (Yiğitol, 2019). Aynı zamanda bu yöntem doku rejenerasyonunu, yara pansumanını, kemik rejenerasyonunu ve filtrelemeyi destekleyebilen ikame malzemelerin geliştirilmesine odaklanarak çok çeşitli malzemelerden nano bölmelerin imalatı konusunda dikkat çekerek doku mühendisliği uygulamaları için de yaygın olarak kullanılmaktadır (Nirwan ve ark., 2022). Elektro eğirme yöntemi nanofiber üretiminde μm ile nm çap aralığındaki nanofiberlerin elde edilmesinde kolay ve kullanışlı bir yöntem olup, polimer çözeltisi besleme ünitesine konularak, ünitenin toplayıcı plaka yüzeyi ile metal iğne ucu arasında bir elektrik alanının oluşturulması esasına dayanan bir yöntemdir (Duygulu, 2020).

Hücre bazlı tedaviler, özellikle de doku mühendisliği, umut verici bir onarım platformu olarak ilgi görmektedir (Hosseini ve Mozafari, 2020). Günümüzde, doku mühendisliği uygulamalarının nanoteknoloji ile bütünleşmesiyle biyolojik yapılarla uyum içinde, saf ekstraselüler matriks yapısına benzer doku iskeleleri geliştirilmektedir. Doku mühendisliği ile üretilmiş bir implantın nano boyutlu tasarımı biyo uyumluluk göstererek, doğal hücre dışı matrikse kesin bir benzerlik sağlayarak fonksiyonel doku yenilenmesi için gerekli olan biyolojik faktörlere erişim sağlar (Hosseini ve Mozafari, 2020). Elektroegirme yöntemi ile üretilmiş olan fiberler, doku mühendisliğinin yanı sıra katalizörlerin, pillerin, elektronik sensörlerin, paketlerin, filtrasyon membranlarının, tıbbi implantların, yara pansuman malzemelerinin ve tıbbi kumaşların ve ilaç dağıtım sistemlerinin tasarımında da potansiyel uygulama alanına sahiptir (Ghosal ve ark., 2019).

Bu yüksek lisans tez çalışmasında Ag ve TiO_2 metal hedefler kullanarak laser ablasyon yöntemi ile nanoparçacık (NP) sentezleyerek bu NP'ları PAN ve kolajen bileşiminden oluşan polimerlere katkılıyıp nanofiber üretimine yer verilmiştir. PAN polimeri kullanılmasıdaki ana neden PAN polimerlerinin elektroegirme işlemi için istenilen yüksek dielektrik sabitine sahip bir yapıya sahip olmasıdır. Çözeltiye çözücü-çözücü olarak DMF eklenerek üretimi gerçekleştirilen nanofiberlerin optimum şartları

belirlenip karakterizasyonları ortaya konmuş olup üretilen nanofiberlere germe çekme deneyi gerçekleştirerek morfolojik olarak karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları tamamlanan nanofiberlerin doku mühendisliğine ne derece katkı sağlayabileceğini tartışılmıştır.

1.1.NANOTEKNOLOJİ

1.1.1.NANOTEKNOLOJİNİN TANIMI, TARİHÇESİ VE KULLANIM ALANLARI

Nano kelimesi, orijinal hali Latince nanus ve Yunanca nanos kelimelerinden gelmekte olup, aşırı derecede küçük boyutlu, cüce anlamındadır. Bilimsel yönden bakıldığında ise metrenin milyarda biri anlamına gelen nano aslında bir ölçek iken nanoteknoloji ise bu ölçekte gerçekleştirilen teknolojileri ifade etmekte ve kapsamaktadır (Otari ve ark.; Özdoğan ve ark., 2006; Kutucu, 2010; Singh ve ark., 2019).

Nanoteknoloji; fizik, kimya, biyoloji, tıp ,mekanik, optik,malzeme bilimi v.b birçok farklı alanla ilişki içinde (Kutucu, 2010; Zarzycki, 2014) olup, nanometre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) boyutunda tasarlanmış yeni malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlayan bir teknolojidir (Navalakhe ve Nandedkar, 2007). Farklı bir yaklaşımla nanoteknoloji, malzemenin yapıtaşları olan atomların istenildiği formda düzenlenmesi, her bir alanda üretilen malzemelerin dayanıklılığının artırılması ve doğaya olabildiğince az zarar veren üretim yapılmasına yönelik bir teknolojidir (Sabancı, 2019).

Nanoteknoloji ile ilgili araştırmalar 1950’li yıllarda başlamıştır. Nanoteknoloji kelimesini Tokyo Bilim Üniversitesi’nden Norio Taniguchi ilk defa kullanmış ve nanoteknolojiyi, kullanılmakta olan teknolojilerin küçültülmesine dayanan bir teknoloji olarak tanımlamıştır (Sekmen, 2019). Nanoteknoloji vizyonunun ilk ortaya çıkışı ise ünlü fizikçi Richard Feynman tarafından dile getirilmiştir. Amerikan Fizikçiler Cemiyeti toplantısında Feynman “Aşağıda Daha Çok Yer Var: Fiziğin Yeni bir Sahasına Davet” konulu konuşmasında atomların ve moleküllerin kontrol edilebileceğinden, bunu gerçekleştirebilmek için de bir takım geliştirilmiş yeni aletlere duyulan ihtiyaçtan söz etmiştir. Atomik seviyeye inildikçe yer çekimi kuvvetine verilen öneminin azalırken, Van der Waals gibi zayıf kuvvetlerin öneminin ciddi derecede artacağını da belirtmiştir. Malzemelerin minyatürleştirilmesini ilk kez dile getiren

Feynman kuantum elektrodinamiği çalışmaları ile 1965 yılında Fizik Nobel ödülünü almıştır (Feynman, 2006; Ersöz ve ark., 2018a). Feynman'ın çalışmalarından ilham alan K.Eric Drexler, 1986 yılında “ nanoteknoloji ” terimini “ Yaratma Motorları: Nanoteknolojinin Yaklaşan Devri ” kitabında kullanmıştır. Yayınlanan bu kitap ilk nanoteknoloji kitabı olmuştur. Nanoteknolojinin gelişiminin başlaması ise Tarama Elektron Mikroskobu'nun keşfi ile olmuştur (Ersöz ve ark., 2018a).

Nanoteknolojinin tıpta, endüstriyel uygulamalarda ve tarımda geniş uygulama alanlarının olması, aynı zamanda insanlık yararına yeni amaçlar doğrultusunda kullanılabilir olması yönü, gelişmiş ülkelerde önemli yatırım araçlarını kendine bağlamaktadır. Bununla birlikte nanoteknolojinin biyomedikal bilimler ile etkileşiminin artmasıyla, biyomedikal alanda kullanılması amacıyla geliştirilen nanofabrikasyon teknikleri ile hücrelerin fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerine etkisinin incelenmesine olanak sağlarken, metal nanoparçacıklara yönelik gerçekleştirilen geniş çaplı çalışmalar ile araştırmacılar bu metal parçacıkların antimikrobiyal ve antioksidan özelliklerini keşfetme fırsatı bulmuşlardır (Shankar ve ark., 2004; Mohanpuria ve ark., 2008; Ramaswamy ve ark., 2015). Nanoteknolojinin diğer bir önemli yanı ise daha iyi ürünler ve daha gelişmiş üretim araçları sunuyor olmasıdır (Kutucu, 2010).

Nanoteknolojinin kullanım alanına her geçen gün yenileri eklenmektedir (Sabancı, 2019). Bu alanları sıralayacak olursak;

Malzeme ve imalat sektöründe; nanoteknolojinin geleneksel yöntemler ile üretilen malzemelere oranla daha dayanıklı, hafif ve daha az malzeme ile üretim sağlaması, neredeyse hiç artık oluşturmaması gibi özellikleri diğer üretim yöntemlerine göre üstünlüklerindendir (Özdoğan ve ark., 2006; ERGÜL ve ÇAKIR, 2023). Gelecekte akıllı yüzeylerin pek çok yerde kullanılması planlanmaktadır. Akla gelen ilk akıllı yüzey uygulamalarını ise; suyu itme özelliği sayesinde silecekleri gereksiz kılan otomobil camları, buğulanma yapmayan ayna ve camlar, kendi kendini temizleme özelliğine sahip bina dış cepheleri, ve sürtünmesiz yüzeyler şeklinde sıralayabiliriz (Kutucu, 2010).

Tekstil sektöründe; tutum, hava geçirgenliği, ıslanma gibi fiziksel ve mekanik özellik kaybını azaltması, kimyasal kullanımı azaltılması ve enerji maliyetlerini düşürmesi gibi nedenler nanoteknolojinin tekstil ve giysi alanlarında kullanılması

sebepleridir (Celep ve Koç, 2007). Kendi kendini temizleyen kumaşlar, ultraviyole ışınların zarar vermesini engelleyen giysiler, su geçirmeyen kumaşlar bunlara örnek olarak verilebilir (Sabancı, 2019).

Tıp ve sağlık sektöründe; nanoteknoloji alanındaki çalışmalar en çok erken teşhis ve tedavide kullanılması amacıyla nanosensörler, kanser tedavisi uygulamaları, hedefli ilaç salım sistemlerinin geliştirilmesi ve dışarıdan ameliyat izi bırakmayan hassas cerrahi operasyonlar yapabilen nanorobotların tasarlanması üzerinde yoğunlaşmıştır. Tıbbi tanı ve tedavide kullanılan aletler nano boyutta tasarlanmış bilgisayar teknolojilerine dayanmakta ve bu sayede geliştirilen nanostent, kanın pıhtılaşmasını önleyerek kalp hastalarının iyileşme sürecine yardımcı olur (Sabancı, 2019; ERGÜL ve ÇAKIR, 2023).

Havacılık ve uzay sektöründe; hacim ve ağırlık bakımından belli miktarda yakıt alınabilmesi ve bu koşullar sonucunda yapılacak görev süresinin kısılması ile ilgili sorunlar, sadece yakıt miktarı ile sınırlı kalmayıp; hava ve uzay araçlarında kullanılan malzeme ve elektronik cihazların, sıcaklık ve radyasyona dayanıklılığı gibi faktörler de süreci etkilemektedir. Nanoteknoloji ile daha az malzeme kullanımı, dolayısıyla daha az ağırlık ve maliyetlerin düşmesinin yanında malzemenin dış etkenlere karşı direnci de artmaktadır (ERGÜL ve ÇAKIR, 2023).

Enerji alanında; nanoenerjinin, dünyanın petrole dayanan enerji bağımlılığını azaltması, verim sağlayacak şekilde enerji üretimi sağlaması ve depolanabilir olup sonrasında kullanılabilir olması son derece önemli yeniliklere yol açacağı şeklinde değerlendirilmektedir (Sabancı, 2019; ERGÜL ve ÇAKIR, 2023).

Savunma alanında ise nanoteknoloji alanında yapılan araştırmalar, daha çok optik sistemler üzerine olup; nano makineler, robotik sistemler, akıllı malzemeler ve akıllı silah sistemleri, insan hafızasını artırmada etkili bellekler, askerlerin performansının artırılmasında kullanılmak üzere ilaç ve dış iskelet sistemleri, zırh teknolojisi, kuantum bilgisayarlar ve iletişim sistemleri üzerine geliştirilmektedir (ERGÜL ve ÇAKIR, 2023).

LASERİN TANIMI TARİHÇESİ VE ÇEŞİTLERİ

“Etkilemeli Salma ile Işığın Güçlendirilmesi” anlamına gelen **LASER** “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harfleri ile sembolize edilmekte olup morötesi bölge ile kızılötesi bölge arasında elektromanyetik dalga (EMD) oluşmasını sağlayan bir cihazdır (KAYMAK; Boyraz ve Yıldız, 2017).

Laserin temeli, Danimarka’lı fizikçi Bohr’ un 1900’lerin başında şekillendirdiği atomun kuantumlu yapısı ile, 1917 yılında, Albert Einstein’ın teorik etkilemeli salma öngörüsü ve Göpper-Mayer (Göppert-Mayer, 1931) tarafından formülasyonunun gerçekleştirilmiştir.

Einstein’ın 1916 yılında ortaya koyduğu uyarılmış emisyon kuramı ve Göpper-Mayer tarafından 1931 yılında gerçekleştirilen iki foton uyarma sürecinin teorik bir çalışma ile ortaya konulmasının ardından, bu çalışmaları takiben ilk olarak mikrodalga alanında MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) teknolojisi geliştirilmiş, 1953 yılına kadar teorik bilgi düzeyinde kalan bu çalışmalar sonrasında 1960 yılında Theodore H. Maiman, ilk laser cihazını icat etmiştir. İlk kez sağlık alanında retina cerrahisinde uygulanan Ruby laser 1965 yılında Dr.Leon Goldman tarafından ciltte bulunan dövmenin silinmesi amacıyla medikal alanda ilk defa kullanılmıştır (Kan, 2011). 1964 yılında W. Bridges argon iyon laserini, 1966 yılında da W. Silfvast, G.R. Fowles ve B. D. Hopkins ilk mavi He-Cd metal buhar laserini üretmiştir. Yine 1966’da P. P. Sorokin ve J. R. Lankard IBM laboratuvarlarında ilk sıvı laseri üretmişlerdir (Akkan, 2009). 1974 yılında laserin ilk kez kullanılmasının ardından 1988 yılında Hanna ve arkadaşları çalışmalarının sonucunda YDFL geliştirmiştir. Yine 1988 yılında Fermann ile Koplw ve arkadaşlarının 2000 yılında yaptığı araştırmada tek modlu bir optik fiberin çekirdeğinin, optik yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle düşük doğrusal olmayan eşiklere neden olduğu görülmüştür. Bu durumda çözümün, doğrusal olmayan eşikleri önemli derecede artıran çok büyük çekirdekli çok modlu fiberlerde tek modlu çalışması şeklinde olduğu gösterildi. Yine bu çalışma laserlerin güç ölçeklendirmesini geliştirici niteliktedir. Zamanla kullanıldığı ortama bağlı olarak laserler, yalıtkan laserler, yarı iletken laser, gaz ve boya laserleri olmak üzere dört gruba ayrılmıştır. Bunlar; katkılanmış yalıtkan laser, Alexandrite laser, yakut laser, He Ne laser, Nd: YAG laser şeklindedir (Kars, 2022; Karanfil, 2023).

Günümüzde ise nanosaniye ve pikosaniye laserlerden sonra geliştirilen femtosaniye (10^{-15}) laser ile en kısa puls üretimi sayesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Gündoğdu ve ark., 2014).

FEMTOSANİYE LASER

“Ultra hızlı” laser olarak adlandırılan bu laserlerin darbe süreleri ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) fs mertebesinde olduğundan “fs laserler” olarak isimlendirilirler. Laserin odaklandığı malzeme üzerinde çok büyük anlık güçlere ulaşılmaktadır (Soylu; Gündoğdu ve ark., 2014). Uzunluğu saniyenin katrilyonda biri mertebesinde olan bu laserler, ışığı birkaç mikron spot alanına odaklaması durumunda puls oldukça yoğun bir enerji durumuna ulaşılmaktadır (Tunay). Eşit dalga boyu ve enerji altında pulslar üreten fs ile ns laser sistemlerinin karşılaştırılması yapıldığında, fs laser sistemlerinin 10^6 kat fazla pik güçleri sağladığı görülmüştür. Elde edilen pik güçleri arasındaki bu fark nedeniyle malzemelerin fs ve ns laser pulslarını soğurma mekanizmalarıda farklı süreçlerle gerçekleşmektedir (BAYIR).

Femtosaniye (fs) lazer darbeleri ile dielektrik malzemeler arasındaki etkileşimin birkaç önemli özelliği bulunmaktadır. Bunlardan *ilki*, etkileşimin oldukça doğrusal olmamasından dolayı uyarımın son derece küçük bir odak hacmine lokalize edilebilmesidir. Bu durum, ultra kısa bir darbe için komşu yapılara minimum ısı aktarımıyla daha da güçlendirilebilir. *İkincisi*, foton enerjisinin malzemenin bant aralığından daha küçük olması durumunda bile uyarımın tüm malzemelerde gerçekleştirilebilir olmasıdır (Balling ve Schou, 2013).

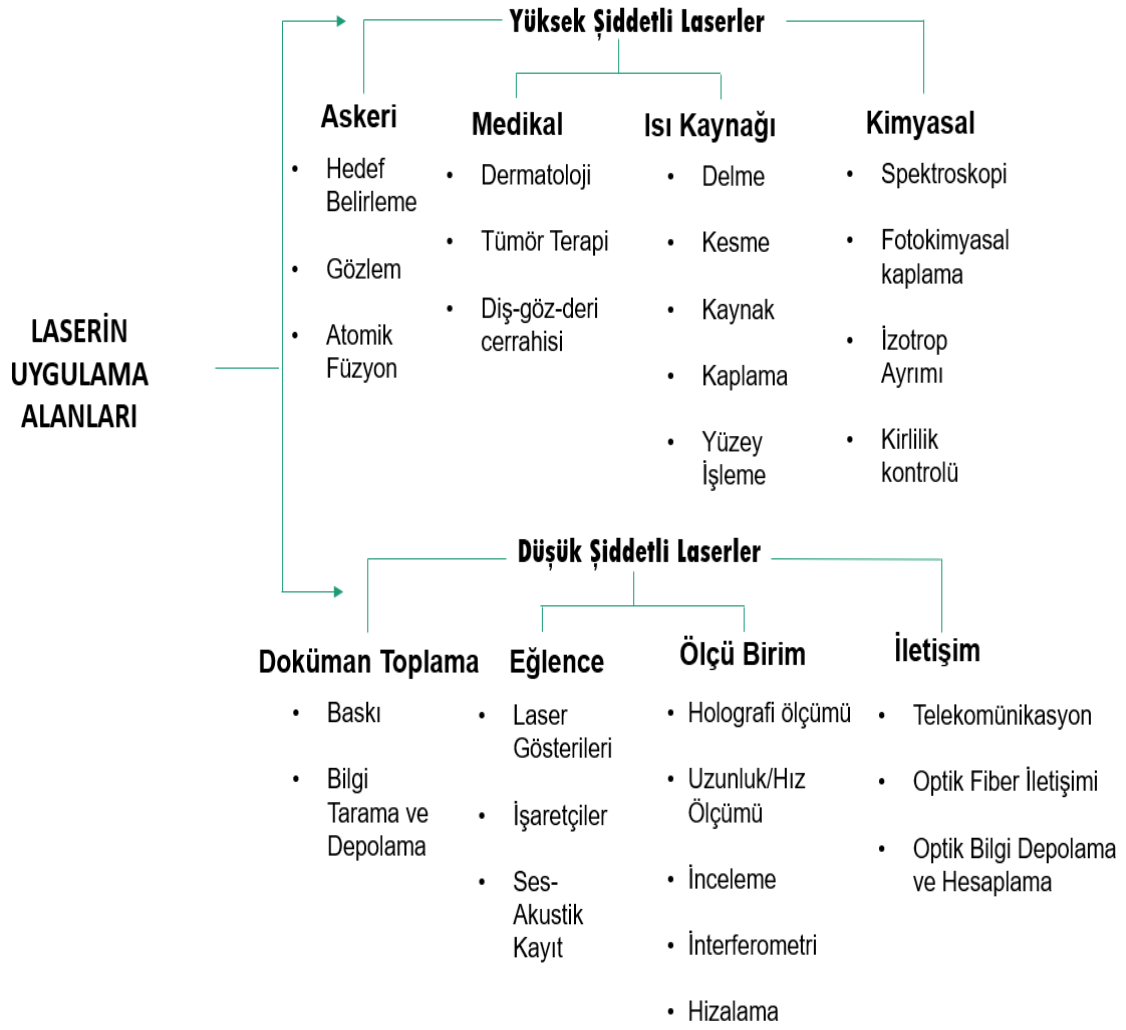
Uzun pulslu laserle malzeme işlemenin dezavantajı ısıнын termal difüzyon süresinin puls süresinden daha küçük olması sebebiyle, işlenen yerin etrafında önce eriyen sonra katılaştan istenmeyen yapıların oluşabilmesidir. Ultra hızlı laserler de ise, puls laser puls süresinin termal difüzyon hızına göre çok daha hızlı gerçekleşmesi nedeni ile, ısı malzeme içinde henüz yayılmadan enerji belli bir noktada yoğunlaşır, işleme süreci ısı işlem gerçekleşmeden önce tamamlanmış olur ve işlenen yer neredeyse erimeden gaz fazına geçmektedir. Buna **faz inflakı** da denilmektedir. Böylelikle ışığın yoğunlaştığı alanda güçlü bir ablasyon süreci gerçekleşirken işlenen bölgenin çevresinde oluşan termal ve mekanik hasarda minimize edilerek oluşan muhtemel duman, buhar ve partiküller de yüksek oranda giderilmiş olur. Femtosaniye laserin bu özelliği hem

malzeme üzerinde hassas işleme açısından hem de verimin yüksek olması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Hüzmelerin iyi bir şekilde odaklandığı eşik enerjisine yakın enerjiler kullanıldığı durumda malzeme üzerinde mikron ve mikron altı yapılar elde etmek mümkün olur. Dolayısıyla, kısa pulslu (fs) laserler hem geçirgen hem de ışığı soğurabilen malzemeler üzerinde etkili bir biçimde kullanılırken aynı zamanda işlenecek malzemenin özelliklerini değiştirmek ya da ablasyon gibi amaçlarla da kullanılabilir (Tunay).

LASERİN UYGULAMA ALANLARI

Teknolojideki gelişmeler ile laser bir çok alanda klasik yöntemlerin yerine geçerek önem kazanmıştır. Uygun laser parametrelerinde malzemenin son özelliklerinin kontrolü sağlanabilmektedir. İşleme prosedürleri ile malzemenin istenilen uygulamada işlevselliğinin sağlanmasına ve optimum şartların belirlenmesine olanak sağlanmış olur (Günerhan, 2021). İşlem hızının yüksek olması yüksek kalitede düşük ısısal zarar, temiz ve hassas bir işlem ortaya çıkarmada etkili olan laser sistemleri çok büyük enerjiyi çok küçük zaman diliminde (puls süresi) ve çok küçük alanlarda toplayabilme özellikleri ile de birçok alanda tercih edilmektedir (Candan, 2008).

Laserler silikon tabaka işleme, kimyasal tepkimelerin geliştirilmesi işlemleri, canlı organizmanın dış yüzeyine herhangi bir zarar vermeden organ içinde hassas cerrahi müdahale işlemleri, DRAM için UV baskı, tıbbi cihaz üretimi gibi işlemlerde de kullanılmaktadır (Candan, 2008; Çelik, 2011; Gündoğdu ve ark., 2014). Laser uygulama alanları tablo 1.1’de gösterilmiştir.



Tablo 1.1. Laser Uygulama Alanları(Akman, 2006)

Savunma sanayinde kullanılmasıyla ülkelerin güvenliği açısından vazgeçilmez hale gelen laserler, biyolojide hücrelerin canlı olarak incelenmesinde kullanılabildiği gibi medikal alanda ameliyatların gerçekleştirilmesinde kullanımı ile de insan ömrünün uzamasına katkıda bulunmaktadır (Akman, 2006).

Bunun yanında fs laserler, ısıtılmış malzemede termal yükleri en aza indirme yetenekleri sayesinde biyolojik dokuların yüksek hassasiyetle, yüksek kalitede ablasyonuna olanak tanımaktadır.

LASER ABLASYON

Laser ablasyon, bir katıdan güçlü laser pulsarı ile hedef yüzeyden malzeme sökme işlemi olup bu işlemin gerçekleşmesinde kullanılan laser sisteminin parametreleri ve hedef malzemenin özellikleri önem arz etmektedir. Koparılan parçacıklar laser ışınının enerjisine göre mikro veya nano boyutlarda olabilmektedir (BAYIR).

Sert, hassas ve ısıya duyarlı malzemelerin işlenmesi, ince film üretimi gibi amaçlarla kullanılan Laser Ablasyon tekniğinde ablasyon oranı belirlenirken, puls başına düşen ortalama ablasyon hızı kullanılmaktadır. Laser ablasyonun bağlı olduğu parametreler ise, fotonun enerjisi, laserin akısı, odak noktasındaki demet genişliği, ısı veya optik işlemin derinliği, buharlaşma entalpisi, iç basınç gibi parametrelerdir (Kiliç ve Durmuş, 2016).

Laser ablasyon işlemi ile yapılan çalışmaları ikiye ayırabiliriz. Bunlardan birincisi; hedef malzeme ve yapıların şekillendirilmesine dayalı çalışmalar olup ikincisi ise ince film üretimi gibi çalışmalar şeklinde incelenebilir (BAYIR). Bu yöntem ile pek çok farklı malzemeden yüksek kalitede saf yarı iletken ve metal nanoparçacıklar üretilmektedir.

Laser Ablasyon işlemi sıvı, gaz ve vakum ortamı şeklinde birçok farklı ortamlarda uygulanabilmektedir. Sıvı ortamdaki Laser Ablasyonu ile gaz ortamındaki Laser Ablasyon'u karşılaştırıldığında, sıvı ortamında yapılan Laser Ablasyonu'nun sıvı ile hedef arasındaki etkileşimler ile sınırlı kaldığı görülür (Bayram).

Yüksek enerjiye sahip malzemelerin sentezlenmesi için köklü bir yaklaşım olan Sıvılarda laser ablasyon; katı bir malzemeden başlayarak çok çeşitli nanoyapıların sentezlenmesi için yukarıdan aşağıya bir işlem olup, bu yöntem ile üretilen nanopartiküllerin çözeltileri sürecin yüklü parçacıklar oluşturmaları sebebiyle koloidal stabilite içermektedir (Kim ve ark., 2023).

NANOPARÇACIK OLUŞUMU İÇİN PLAL

(Sıvıda Darbeli Laser Ablasyonu)

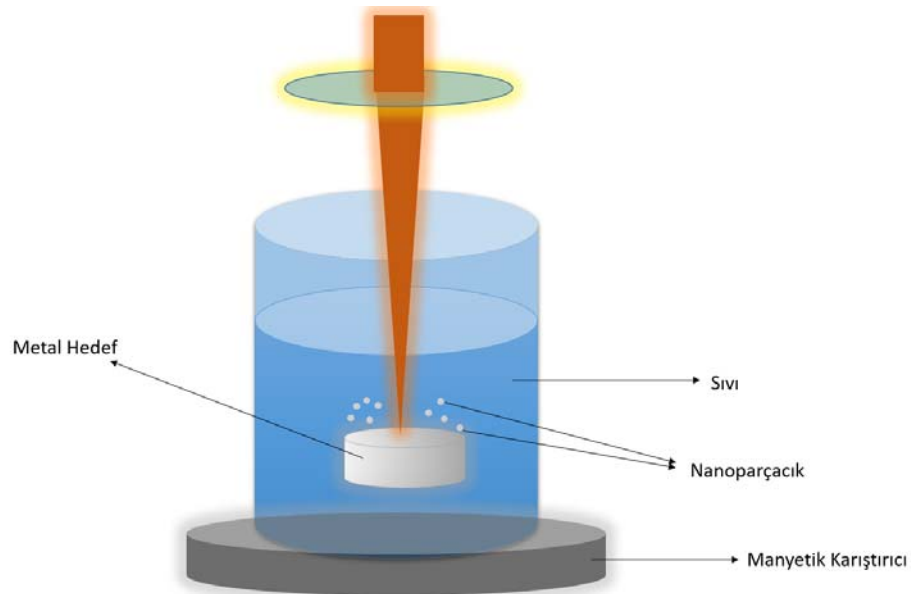
Hava ortamında veya gaz atmosferinde katı bir hedeften laser ablasyon yöntemiyle NP'ların üretilmesine ek olarak, kesilen hedefin sıvı bir ortama daldırılması durumunda NP'lar, hedefi çevreleyen sıvı içinde üretilerek koloidal bir çözelti

oluşumuna sebep olurlar (Semaltianos, 2010). Şekil 1.2’de gösterilen sıvı içinde darbeli laser ablasyonu (PLAL), stabilize edici organik malzemeler olmadığı halde uzun vadeli stabiliteye sahip nanopartikül kolloidleri üretmekte güçlü bir yöntemdir (Lévy ve ark., 2021). PLAL’i diğer yöntemlerden ayıran özellikler, kimyasal içermemesi, reaksiyon süresinin kısa olması, çok adımlı sentetik prosedürlerden kaçınılması, indirgeyici ajanların bulunmaması, laboratuvar güvenliği, düşük toksisite ve üretilen NP’ler sıvı bölge içinde sınırlı olduğundan ekstraksiyon kolaylığı sağlaması ile çevre dostu bir süreç olmasıdır (Subhan ve ark., 2022).

Laser-malzeme etkileşimi sırasında, laser kaynaklı parçalanma meydana gelerek gerçekleşen termodinamik reaksiyonları oluşum sırası şu şekildedir:

1. Radyasyonun hedef metal yüzey tarafından emilerek enerjinin aktarılması;
2. Patlayıcı buharlaşma ve plazma dumanının oluşması;
3. Sıcaklık ve basınç değişimlerinden dolayı çözeltide şok dalgalarının oluşması;
4. Plazma genişmesi – soğuması;
5. Kavitasyon kabarcığının oluşması - genişlemesi, süpersonik hızlarda büzülme ve daha fazla difüzyonun yaratılması.

Yukarıda verilen sıralama ile metal hedefin ablasyonu ve NP’lerin salınması gerçekleşmiş olur (Dell’Aglio ve ark., 2015; Subhan ve ark., 2022).



Şekil 1.2. Laser ablasyon yöntemi ile metal bir hedeften nanoparçacık üretim tekniği

Nanosaniye (ns) puls uzunluğundaki bir laser pulsusu metal plaka üzerine düşürüldüğünde metal plaka yüzeyinde bir sıcaklık oluşmasına sebep olur. Metal plakanın enerjiyi soğurması ile malzemenin yüzeyinde buharlaşma meydana gelir. Oluşan bu buhar bulutu içerisinde metalden kopan atomlar ve elektronlar bulunur. Böylece, yüzeyden dışarı yönde ilerleyen buhar bulutu soğuyacak ve buharlaşan atomlar NP olarak yoğunlaşacaktır. Plazma soğutma aşamasında üretilen NP'lar çevredeki sıvıya yayılarak koloidal bir çözelti oluşturabilir (Dell'Aglia ve ark., 2015).

Oluşturulan metal NP'ların şekil ve boyut gibi özellikleri, laser akısı, laser puls süresi (ns, fs, ps), alan başına düşen enerjisi, laser ışınının dalga boyu, ablasyon ortamı, metalin türü, içinde üretildiği sıvının cinsi gibi laser parametrelerine bağlıdır (Balachandran ve ark., 2022).

Sıvıda darbeli laser ablasyonu ile hazırlanan NP'ları etkileyen faktörler tablo 1.2 de gösterilmiştir.

Fizikokimyasal Faktörler	Fotonik Faktörler	Malzeme Bilimi ve Mühendisliğini Etkileyen Faktörler
- Sıvı viskozitesi - Kavitasyon balonu - Gaz oluşumu - Sıvı dinamiği - Tabaka kalınlığı - Redoks potansiyeli - Sıvı pirolizi - Yüzey kimyası	- Laser akıcılığı - Darbe süresi - Uzamsal odaklanma koşulu - Tekrarlama oranı - Darbe enerjisi - Laser dalga boyu	- Hedef şekli - Yüzey dokusu - Kompaktlık derecesi - Malzeme bileşimi - Termal iletkenlik

Tablo 1.2. Sıvıda darbeli laser ablasyonu ile hazırlanan NP'ları etkileyen faktörler (Khairani ve ark., 2023).

Laser akısı; eşik değerinin altında olduğu zaman, malzeme sadece termal olarak ablate edilmektedir. Enerji soğurulmasındaki artış eşik akısında azalmaya sebep olacaktır (Çolpan, 2008).

Darbe süresi; bir laser pulsunun yarım yükseklikteki tam genişliği (FWHM) olarak tanımlanmaktadır. Hedef malzeme üzerinden puls başına koparılacak malzeme miktarı, puls süresi ve enerji yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Aynı zamanda puls süresi, ablasyon oranı üzerinde oluşan ısı birikimleri sebebiyle belirleyici bir etkidir. Arka arkaya sıralanan pulsler arasında geçen sürede hedef malzemenin ısı olarak dengeye gelmediği durumda, geciken pulslerin ablasyon gerçekleştirebilmesi için daha az seviyede enerji aktarımı yapmaları gerekecektir (Rosenfeld ve ark., 1999).

Uzamsal Odaklanma Koşulu; ışın çapı ve lens odak uzunluğu ile ilişkilidir. Daha küçük odak uzunluklu lensler kullanılarak daha küçük bir spot hacmi elde edilebilirken çıkarılan ve sıçrayan malzemenin lense hasar vermesini önlemek amacıyla daha fazla özen gösterilmesi gerekir. Enerji yoğunluğunu arttırmak için laser ışınının enerjisi malzeme işleme işlemlerinde küçük bir alana odaklanmalıdır (Korkusuz, 2021).

Tekrarlama oranı; her darbeden sonra nanoparçacıklar hedeften dışarı atılır ve her darbe hedef tarafından absorbe edilecek kadar yeterli laser enerjisi sağlayarak hedefin erimesine neden olur. Böylelikle laser darbelerinin tekrarlama oranının artırılması nanoparçacık oluşum oranının artmasını sağlar (Attallah ve ark., 2023). Darbe tekrarlama oranının (lazerin saniyede yayınladığı darbelerin sayısı) değiştirilmesiyle laser sistemi tarafından sağlanan güç değişir (Amsellem ve ark., 2023).

Laser darbesinin enerjisi; laser ablasyon işleminin başlaması için gerekli olan eşik enerjisinden düşük olduğu durumda, laser darbesinin emilmesi nedeniyle hedef ısınır, ancak bu enerji hedeften malzeme fırlamasına neden olacak kadar yeterli olmayacağından herhangi bir plazma bulutu oluşumu gözlenmez. Eşik enerjinin üzerinde, ablasyona uğrayan NP'ların veriminin laser akısıyla birlikte artması beklenirken daha yüksek laser akısında ise emilimdeki artışın kolaylaşmasıyla ablasyon oranı artar. Böylelikle, ablasyona uğrayan NP'ların boyutu, daha yüksek laser akısında küçülür (Balachandran ve ark., 2022).

Laser dalga boyu; temel ve harmonik dalga boylarına sahip laser kaynağının seçilmesi, istenen nanopartikül morfolojisi ve boyut dağılımının elde edilmesi bakımından çok önemlidir (Subhan ve ark., 2022). Laser ablasyon tekniğinin dalga

boyuna etkisi, farklı dalga boylarındaki hedeflerin ablasyonu ile elde edilen parçacık boyutu dağılımlarının incelenmesiyle anlaşılabilir. Son zamanlarda yapılan çok sayıda çalışma, LAL tarafından üretilen NP'lerin daha büyük dalga boylarında, daha kısa dalga boylarında elde edilenlere oranla daha büyük boyutlu NP'lar elde edildiğini göstermiştir. Dalga boyunun azalmasıyla NP boyutlarındaki azalmanın, muhtemelen sıvılarda LAL ve laser parçalanması gibi her iki işlemin bir arada bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Byram ve ark., 2023). Burada hedef malzemelerin ışık soğurma özelliklerinin, farklı dalga boylarında soğurulan fotonların sayısını etkilediğini ve dolayısıyla her malzeme için bir optimum dalga boyunun varlığını belirtmek yararlı olacaktır (Nyabadza ve ark., 2023).

Malzemelerin termal iletkenliği; parçacıkların erimiş halde olduğu süreyi ve dolayısıyla NP'ların en verimli şekilde büyümek için zamana sahip olduğu süreyi de belirlemektedir (Mahdieh ve Fattahi, 2015). PLAL'in yapıldığı sıvı ortam, ürünü kontrol etmede en önemli parametrelerden biridir. Sıvı, NP boyut dağılımını, morfolojiyi, kimyayı, ablasyon verimliliğini, antimikrobiyal etkileri, iletkenliği, optik özellikleri ve zeta potansiyellerini (kararlılık) etkilemektedir. Örnek olarak Ag NP'lerin DI suyunda üretimi ile asetonda ayrıştırıldığı durumda üretimi farklı sonuçlara sahip olacağından sıvı ortamın seçimi önem arz etmektedir. Sıvı türünün seçiminde, amaçlanan kullanım ve hedef malzemeyle stabilite/reaktivite (örn. oksidasyon durumları) ve ayrıca gerekli NP verimi ve optik özellikler temel alınmalıdır (Nyabadza ve ark., 2023). Sıvının sıcaklığının artması durumunda NP'ların şekli küreselden uzuna doğru değişecektir. Kinetik enerjinin artması nedeniyle morfolojik çeşitlilik görülebilir ve bu da başlangıçta yoğunlaşma sonucu oluşan büyük NP'ları ile laser ışınının yolunda var olan NP'ları arasındaki çarpışma oranının artmasına sebep olur (Attallah ve ark., 2023).

NANOPARÇACIK

Nanoteknolojinin ve aslında nanomalzemelerin temelini 100 nm büyüklüğünde ve daha küçük boyuttaki tozlar olarak tanımlanan NP'lar oluşturmaktadır (Rao ve ark., 2006). Bu parçacıklar diğer ticari malzemelerden genelde farklı olarak; kuantum boyutunun etkilerinin yüksekliği, yüzey atomlarının yapılarında farklılık ve yüksek

yüzey/hacim oranına sahip olma v.b üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler sayesinde nanoparçacıklar yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Liveri, 2006). Katı malzemeler boyutları ve kütleleri ne olursa olsun sabit fiziksel özellikler gösterirken, NP'ların, hacimlerine göre yüzeylerindeki atom oranının büyük olması nedeniyle boyutlarına bağlı özelliklere sahip olması geniş bir spesifik yüzey alanıyla sonuçlanmasının asıl sebebidir (Benettayeb ve ark., 2023). NP'ların boyutu, şekli, konsantrasyonu, topaklanma durumu ve kırılma indisi gibi durumlar optik özelliklerine dayalıdır ve ayrıca bunlar analiz altındaki NP'ların stabilitesini yani; kırılma indeksini belirler. Bu karakterizasyon yöntemleri, yüzeylerinin şekli, boyutu, elektrik yükü ve gözeneklilik hakkında aktif bilgiler sağlar ve çeşitli alanlardaki uygulanabilirliğini belirlemede önemli rol oynar (Kavitha ve ark., 2023). Nanomalzemenin boyutunun küçülmesiyle yüzey alanı hacime oranla büyüyerek esneklik ve sertlik gibi fiziksel özellikler değişmektedir (Çorman, 2010). NP'ların kolay emilmeleri, kontrollü dağıtımları ve düşük dozlarda bile oldukça etkili olmaları tarım alanında pestisit (böcekleri, bakterileri ve yabancı otları öldüren, nanometre ölçeğinde fiziksel, fizikokimyasal ve kimyasal yöntemlerle hazırlanan bileşikler) olarak kullanılmasını sağlayarak aynı zamanda patojenlerin azaltılmasında önemli etkiyi beraberinde getirmiştir (Al-Khayri ve ark., 2023; Guleria ve ark., 2023).

Nanomalzemeler gıda ürünlerinin güvenliği için nanokaplama olarak ta kullanılabilir. Parçacık boyutları, parçacık bileşimleri, yüzey yükleri, ara yüzey özellikleri ve diğer biyolojik moleküllerle etkileşimleri nedeniyle gıda endüstrisinde farklı nano kaplama türleri mevcuttur. Nano kaplama, renk/tat bozulmasını, besin değerini ve patojen mikropların büyümesini önlemek için nem, ağırlık kaybı, oksijen ve karbondioksit gazlarının değişimi gibi yenilebilir malzemenin tüm gereksinimlerini karşılar (Guleria ve ark., 2023). Nano boyutlu malzemelerin vücut içinde de daha iyi çözünme göstererek daha iyi sonuçlar sağladığı daha önce yapılan çalışmalarda kaydedilmiştir. Dahası, NP'lar kan dolaşımındaki ilaçların yarı ömrünü uzatabilmelerinin yanında daha iyi salım etkinlikleri sunabilir. Bu sebeple bu tür fizikokimyasal parametreler antibakteriyel uygulamaya yönelik NP'ların tasarlanmasında dikkate alınmalıdır (Roy ve ark., 2023). Ek olarak nanoparçacıklar, yüklerini kontrollü bir şekilde serbest bırakacak şekilde tasarlanabilir ve böylece zaman içinde sürekli ilaç dağıtımına olanak sağlanır. Nanoparçacıklar ayrıca tıbbi görüntülemede kontrast malzemeleri veya biyolojik numunelerdeki spesifik biyomoleküllerin tespiti gibi tanısal amaçlarla da kullanılabilir. Rejeneratif tıpta

nanomalzemeler, doku mühendisliği için iskele olarak veya doku onarımını ve yenilenmesini destekleyen büyüme faktörleri ve diğer sinyal molekülleri için taşıyıcı olarak kullanılabilir (Yusuf ve ark., 2023).

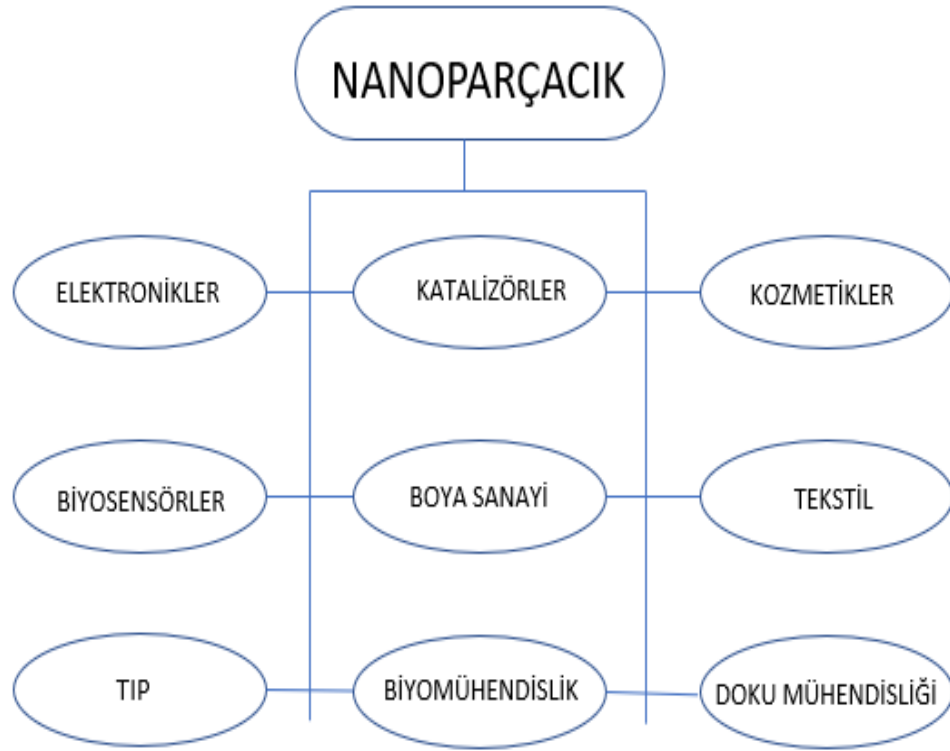
NP'LARIN ÖNEMİ

Nanoparçacıklar sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle birçok kullanım alanına sahiptir. Metal nanoparçacıkları, kataliz, optik, elektronik, algılama, ilaçlar, yüzey kimyası, eczacılık ve floresan malzemeler dahil pek çok farklı alanda uygulama fırsatı bulmaktadır (Xia ve ark., 2023).

Polimerik nanoparçacıklar (PNP'ler); düşük sitotoksitesi, iyi biyo-uyumluluk, daha yüksek geçirgenlik ve tutma (EPR) etkisi, zayıf çözünen ilaçları verme yeteneği ve bunların sürekli salınımı gibi özellikleri sayesinde doku mühendisliği uygulamaları için biyoaktif malzemelerin enzimatik bozunmadan biyoaktivitesinin korunmasında önemlidir (Fathi-Achachelouei ve ark., 2019).

Günümüzde nanoparçacıklar medikal ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Medikal uygulamalarda; çeşitli antibiyotiklerin, akıllı ilaçların, bakteriler tarafından salgılanan ve gene savunma amaçlı kullanılabilen bakteriyosinlerin taşıyıcı olarak kullanılmasında önemli iken endüstriyel uygulamalarda ise; ürünlerin kalitelerinin ve sağlamlıklarının artırılmasında, parçacıklardan yarı iletken-iletken malzemelerin üretiminde, çevre temizliğinde, seramik, tekstil ve boya endüstrisinde oldukça üst düzey bir öneme sahiptir.

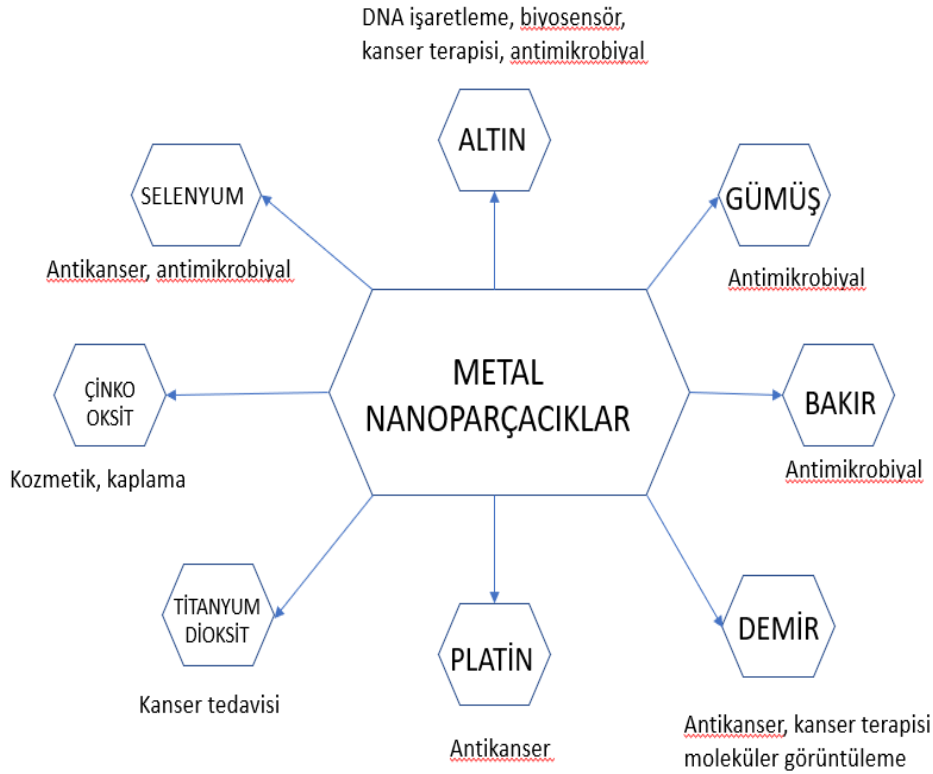
Bu kullanım alanlarından bazıları tablo 1.3'de verilmiştir.



Tablo 1.3. NP’ların bazı kullanım alanları(BEYKAYA ve ÇAĞLAR, 2016)

NP’ların karakterizasyonu; performanslarını artıran ve dolayısıyla onları geniş bir uygulama yelpazesi için faydalı kılan kritik fiziksel ve kimyasal özellikler geliştirmelerine olanak tanıyan nano ölçekli boyutlarıyla yapılmaktadır. Yaygın kullanım alanlarından biri olan biyomedikal alanında nanoparçacıklar kontrollü ilaç dağıtımı, belirli alanların görüntülenmesi, DNA yapılarının araştırılması, gen aktarımı, hücrelerin fototermal ablasyonu ayrıca birçok terapide kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Nanoparçacıklar dokuların hücre dışı matris (ECM) bileşenlerinin doğal nanometre boyut ölçeğini de taklit etmektedirler. Bu nano ölçekli parçacıklar organ ve dokuların ECM ve hücreler gibi bileşenleri ile hiyerarşik olarak çeşitli atomlar, moleküller, nano yapılar, mikro yapılar ve makro ölçekli yapılar içererek aslında vücudumuzun ayrılmaz bir parçası olarak düşünülebilir (Hasan ve ark., 2018).

Çeşitli metal nanoparçacıklar ve bunların uygulama alanları tablo 1.4’ de verilmiştir.



Tablo 1.4. Çeşitli metal nanoparçacıklar ve bunların uygulama alanları(BEYKAYA ve ÇAĞLAR, 2016)

GÜMÜŞ NANOPARÇACIKLAR VE KULLANIM ALANLARI

Gümüşün antimikrobiyal olarak kullanımı uzun bir geçmişe sahip olup gümüş nanoparçacıklar çok daha iyi ve biyoyumlu antimikrobiyal malzemelerdir (Sofı ve ark., 2022). Tarih öncesi zamanlardan bu yana gümüş; madeni para, mutfak eşyaları, solüsyon, köpük, merhem ve losyonların içeriğinde kullanılırken; günümüzde; genetik hastalıkların tespiti, biyomedikal mühendislik uygulamaları, tıbbi cihazlar, foto görüntüleme gibi mekanik, elektrik, manyetik, fotokimyasal alanlarda (Calderón-Jiménez ve ark., 2017) kullanımının yanında, ilaç taşınımı, yiyecek ve ürün paketlemesi, UV ışınların zararlı etkilerinin önlenmesi, deterjanlardaki antibakteriyel sprelerde, kozmetik ve tekstil alanlarında kullanılmaktadır. Ag NP'ların kullanım alanlarının yaygın olması verimli üretim tekniklerinin anlaşılması ve çeşitli yöntem yaklaşımlarının da önem kazanmasında etkili olmuştur.

Serbest oksijene maruz kaldığında kendiliğinden oksitlenen gümüş (Salleh ve ark., 2020) farklı kimyasal reaksiyonlarının da anlaşılmasıyla gümüş NP'ların sentezlenmesi çalışmalarının hızlanmasını sağlamıştır. Genellikle Ag NP'ların kullanım alanları;

antibakteriyel, antifungal etkileri ve özellikle biyouyumlu özellikleri nedeniyle sağlıkta, anti-kanser etkileri sebebiyle tıbbi araştırma alanları, katalizör görevi görmesi nedeniyle fotokataliz uygulamaları, yarı iletken endüstrisi ve optoelektronik cihazlar şeklindedir (Gündoğdu ve ark., 2024). Atık sularda doğal olarak biriken gümüş nanoparçacıklar (Howe ve ark., 2002), deneysel çalışmalarda çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılarak da sentezlenebilmektedir. Fiziksel yöntemlerde laser ablasyon, gama ışıması, elektron ışınlaması ve buhar yoğunlaştırma yaklaşımları gümüş NP'ların sentezinde sıklıkla kullanılmaktadır (Iravani ve ark., 2014; Salleh ve ark., 2020). Kimyasal yöntemlerde ise organik ve inorganik ajanlar kullanılmakta iken işlemlerin uzun sürede tamamlanması bu yöntemin dezavantajlarından (Singh ve ark., 2017). Gümüş NP'ların kullanım alanları gün geçtikçe artış göstermekte ve hayatımızda büyük önem arz etmektedir. İnsan sağlığı üzerine önemli etkilerin olduğu düşünüldüğünde gümüş NP'ları merak ve araştırma konusu olmuştur (KARAHAN ve ÇÖLGEÇEN, 2021).

GÜMÜŞ NP'LARIN ANTİMİKROBİYAL ETKİLERİ

Gümüş, tarih öncesi bir metal olup çeşitli patojenlere karşı geniş spektrumlu bir antibiyotik olarak kullanılabilir (YokeshBabu ve ark., 2013). Ag NP'lere maruz kalan bakteriler, Ag NP'lerin oksidasyonundan üretilmiş gümüş iyonlarının pozitif yükü ile bakterilerin negatif yüklü hücre zarları arasında bulunan elektrostatik çekim sebebiyle bakteriler hücre duvarına yapışma eğilimi gösterirler. Ag NP'lar bakterilerin hücre duvarında bulunan proteinlere karşı da güçlü bir çekim gösterirler. Bu sayede Ag NP'lar hücre içerisine kolayca girebilmektedirler. Antimikrobiyal özelliği, gümüş miktarına ve salınan gümüş oranına bağlı olan gümüş; metalik halde inert olup derideki nem ve yara sıvı ile reaksiyon göstererek iyonlaşmaktadır. İyonize halde olan gümüş, doku proteinlerine bağlanıp, bakterinin hücre duvarında ve nükleer zarda hücre bozulmasına ve ölümüne yol açabileceği için oldukça reaktiftir (YokeshBabu ve ark., 2013).

Gümüşün en önemli avantajı, mikroorganizmalara karşı daha yüksek toksisiteye sahip olmasının yanı sıra memeli hücrelerinde daha düşük toksisiteye sahip olmasıdır (Bao ve ark., 2015). Yaranın iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda, gümüşün toksik etki göstermesini engellemek için hücre metabolizmasına karışmasına engel olacak

şekilde sağlam ve geçirgen bir destek içerisinde tutulması gerekmektedir (Maneerung ve ark., 2008).

TİTANYUM DİOKSİT NANOPARÇACIKLAR VE KULLANIM ALANLARI

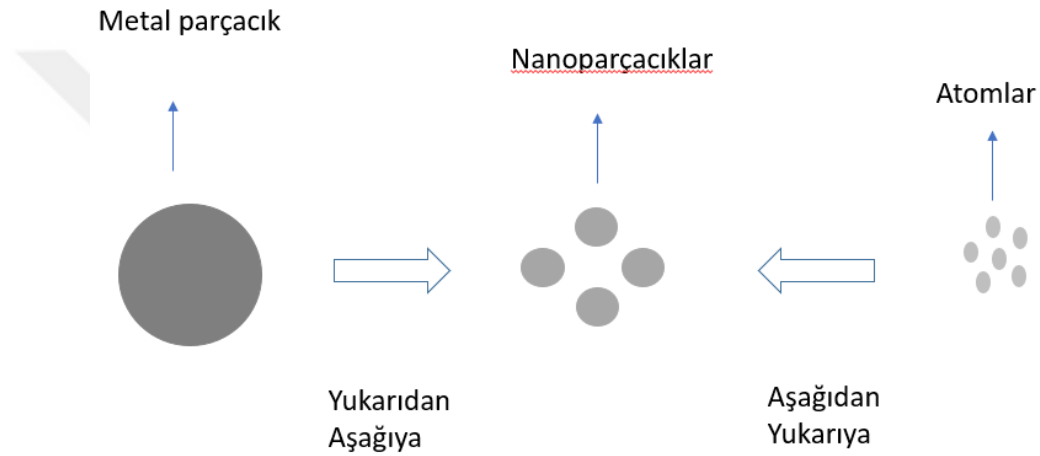
Titanyum oksit, yeryüzünde doğal olarak bulunan bir mineraldir. Polimer esaslı nanokompozit üretiminde kullanılan nanotaneceklerin başında gelen TiO_2 güçlü oksitleyici etkisi, kararlı yapısı ve toksik olmaması nedeniyle üretilen en popüler nano malzemelerden biri (EREM ve ÖZCAN, 2015) olup, hava, toprak ve suda arındırma işlemini sağlamak için kullanılmaktadır (Esterkin ve ark., 2005). TiO_2 'nin alkalın fosfat aktivitelerini, metabolik aktivitelerini, hücre iskeleti oluşumunu, kalsiyum birikimini vb. arttırarak hücresel aktiviteyi arttırdığı düşünülmektedir (Umair Wani ve ark., 2023). TiO_2 NP'lar; güneş pillerinde, lityum pillerinde, kozmetik endüstrisinde, yapay ipek teknolojisinde, renkli cam üretiminde, deri ve kumaş boyanmasında, kemik implantlarında ve biyouyumlu malzemelerde, korozyondan koruma amaçlı kaplamalarda ve kâğıt endüstrisi gibi bir çok alanda kullanılabilmektedir (Diebold, 2003; Maiyalagan ve ark., 2006; Tekmen ve ark., 2008). Nano boyuttaki TiO_2 dalga boyu 180-340 nm arasında olan mor ötesi (UV) ışınlarla maruz kaldığında reaktif hale dönüşerek katalitik bir tepkime başlar ve safsızlık oluşturan azot oksitler gibi moleküllerin foto bozunumu nano TiO_2 molekülleri ile artırılır (Afşar, 2023). Aynı zamanda hafif UV aydınlatması altında kanser hücrelerini, bakterileri ve virüsleri öldürme yeteneğine de sahiptir (Spoiala ve ark., 2015). Hücre büyüme özellikleri ile Gram pozitif ve Gram negatif bakteriler karşısında antibakteriyel potansiyele sahip olması nedeniyle TiO_2 , doku mühendisliği ve yara iyileştirme iskeleleri için önemli bir kriter olan hücre yapışması ve büyümesi için de yapısal bir çerçeve sağlamaktadır (Ghosal ve ark., 2019; Ehtesabi ve ark., 2023).

TiO_2 yaygın olarak cilt kremlerinde ve kozmetiklerde de dezenfektan olarak kullanılmaktadır (Ehtesabi ve ark., 2023).

Ag ve TiO_2 NP'larının, organik-inorganik bir nanokompozit oluşturmak için poliakrilonitril (PAN) polimer matrisine herhangi bir kimyasal ve yapısal modifikasyon olmadan iyi yüklendiği bilinmektedir (Liu ve ark., 2003; Lim ve ark., 2006; Shi ve ark., 2017).

NANOPARÇACIK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Nanoyapılı malzeme ve cihazların tasarımı, üretimi ve işlevsel yönden kullanımını içeren nanoteknoloji alanındaki öncelikli adım nanoparçacık üretimidir (Gürmen ve ark., 2008). NP'ların üretim yöntemleri aşağıdan yukarı "Bottom Up" ve yukarıdan aşağı "Top Down" olmak üzere iki çeşitli şekilde gerçekleştirilmektedir. Aşağıdan yukarı tekniğinde, atom veya moleküllerden daha büyük boyutta malzeme elde edilirken, yukarıdan aşağı tekniğinde ise büyük kütleli cisimler işlenerek daha küçük boyuta sahip NP'lar elde edilmektedir (Sofı ve ark., 2022).



Şekil 1.3. Nanoparçacık üretiminde kullanılan yöntemler

Yukarıdan aşağıya yaklaşımındaki yöntemlerin amacı hacmi geniş olan bir malzemeye dışarıdan mekanik bir etki ya da kimyasal tepkimeler gerçekleştirilmesi sonucu malzemenin nanoboyuta kadar küçülebilecek parçalara ayrılmasıdır. Bu yaklaşımda mekanik aşındırma, elektro patlama ve laser ablasyon verilebilecek en genel örneklerdendir. Aşağıdan yukarıya yaklaşımındaki yöntemlerin amacı ise atomik veya moleküler halde bulunan yapıların kimyasal tepkimeler yardımıyla büyütülmesidir. Asal gaz yoğunlaştırma bu yönetime örnek verilebilir.

Bu çalışmada yapılacak olan deneysel çalışmalarda kullanılacak nanoparçacık üretim metodu olması bakımından laser ablasyonu üzerinde durulmuştur.

NANOFİBER

Nanofiberler hafif olmasının yanında gözenek sayısı fazla ve geniş yüzey alanına sahip, aynı zamanda işlevsel ve dayanıklılığı yüksek olan yeni nesil malzemelerdir. Çapı 100 nm ve altında bir değerde olan fiberler nanofiber olarak tanımlanmakta olup, nanometrenin tanımı gereği (1 metrenin milyarda biri, 10^{-9} m) bazı kaynaklarda 1 mikro metrenin altındaki fiber yapılar için kullanılan bir terimdir. Küçük boyutları ile daha yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olan nanofiberler; uygulama kolaylığı, düşük maliyet, düşük yoğunluk, yüksek biyo uyumluluk ve mukavemet, pürüzsüz yapı ve kaplama özelliği, mekanik performans gibi spesifik özelliklere sahip olması ile doku mühendisliğinden savunma sanayisine kadar geniş bir alanda kullanım alanına sahiptir (Oflaz, 2016).

Biyomedikal	➤ Tıbbi Protezler ➤ Tele-tıp ➤ İlaç Taşıma ➤ Yara Örtücüler ➤ Cilt Bakım Ürünleri ➤ Doku Şablonları
Uzay Teknolojisi	➤ Güneş ve Işık Panelleri ➤ Uzay Platformları
Savunma Sanayi	➤ Koruyucu Giysiler
Elektriksel ve Optik Uygulamalar	➤ Elektrodlar ➤ Algılayıcılar ➤ Sensörler
Filtrasyon	➤ Kimyasal Gaz ➤ Hava ➤ Kan
Kompozitler	➤ Malzeme Kuvvetlendiriciler
Tarım ve Gıda Sektörü	➤ Bitki Koruma Örtüleri ➤ Gübre Vericiler
Diğer	➤ Enzim Taşıyıcılar

Tablo 1.5. Nanofiberlerin uygulama alanları (Oflaz, 2016)

Elektronik alanda uygulanmanın yanı sıra nanofiberler; piller, güneş enerjisi ve yakıt hücreleri ve süper kapasitörler için malzeme (membranlar ve elektrotlar) olarak da kullanılmaktadır. Boyalar, ağır metaller, hidrokarbonlar ve diğer organik ve inorganik maddeler gibi büyük miktarlarda kirleticilerin atık sulara deşarjı, çevrede insanlar üzerinde ciddi etkileri olan ciddi türde bir kirliliğe neden olmasıyla, dünya su kriziyle

karşı karşıya kalırken, bu durum büyük miktardaki suyun arıtılmasına yönelik yeni teknolojilere ve yöntemlere olan ilgiyi artırmıştır. Nanofiberler bu teknolojiler arasında yüksek adsorpsiyon kapasiteleri ve diğer malzemelerle işlevselleştirilebilme olasılıkları ile bu gibi durumlarda etkili rollerini kanıtlamışlardır(Zamel ve Khan, 2021).

Nanofiberlerin farklı kullanım alanları tablo 1.5 de verilmiştir.

Nanofiberler farklı polimerlerden üretilebilirken, aynı zamanda farklı fiziksel özelliklere ve uygulama potansiyellerine sahiptirler.

NANOFİBERLERİN ÖNEMİ

Nanofiberler, elektroegirme proteinleri, biyolojik ilaçlar, biyoaktif moleküller, doğal polimerler (biyolojik makromoleküller), uçucu yağlar, gümüş NP'lar (Ag NP'lar), ve yara iyileştirme uygulamaları için kök hücreler gibi farklı biyolojik bileşenlerle yüklenebilir (Sethuram ve Thomas, 2023). Nanofiberlerin yara çevresinde nemi muhafaza edebilir olmaları, yara oluşumunu engelleyebilir olmaları, hücrelerin büyümesini arttırabilir olmaları ve hücre dışı matrisi taklit edebilmeleri ile biyomedikal alanda öneme sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı nanofiber teknolojisi, cilt bakımı, yara iyileştirme, doku mühendisliği, ilaç dağıtımı, kemik mühendisliği, implantlar, kan damarı mühendisliği, kıkırdak mühendisliği vb. alanda kullanılabilmektedirler (Ekrami ve ark., 2023; Patel ve Gundloori, 2023).

Yara iyileşmesini hızlandırmak için kapsüllenmiş hemostatik ve antimikrobiyal faktörlerle yüklenen yara örtülerinin üretiminde çoğunlukla nanofiber yöntemi kullanılarak patojenlerin koloni kurmasını engelleyerek enfeksiyon riskinin azaltılması amaçlanmaktadır (Ekrami ve ark., 2023).

ANTİBAKTERİYEL AKTİVİTEYE SAHİP NANOFİBERLER

Dünya çapında insan ölümlerinin en önemli nedenlerinden birisi mikropların neden olduğu bulaşıcı hastalıklardır. Organizmada herhangi bir bulaşıcı hastalığa neden olabilen mikroplara patojen denilmektedir. Patojen kaynaklı sağlık riskleri halen bir sorun olmaya devam etmekte ve bu nedenle farklı yaklaşımlar kullanılarak etkili antimikrobiyal ajanların hazırlanması her zaman büyük bir endişe kaynağı olmaya devam etmektedir (Senthamizhan ve ark., 2017). Antibakteriyel aktiviteye sahip nanofiberler genellikle polimerlere antibakteriyel malzemelerin eklenmesiyle hazırlanan

çözültiden alınarak elektroegirme yoluyla üretilmektedir. Bu antibakteriyel nanofiberlerin üretilmesinde kullanılan polimerlerin, toksik olmaması, iyi mekanik özelliklere sahip olması, biyouyumluluk göstermesi ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikte olması gerekmektedir (Liu ve ark., 2017).

Diğer metal oksitlerin yanı sıra çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit (TiO₂), de olağanüstü fizikokimyasal özelliklerinden dolayı çok yönlü ve çevre dostu malzemeler arasında kabul görmüştür. Elektroegirme yöntemi ile hazırlanan ZnO nanoyapıları, antimikrobiyal aktiviteleri açısından kapsamlı bir şekilde incelendiğinde, ABD Gıda ve İlaç İdaresi tarafından genel olarak güvenli kabul edilen (GRAS) birçok kişisel ve sağlık bakım ürünüde kullanılmaktadır (Senthamizhan ve ark., 2017).

NANOFİBER ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Nanofiber üretim yöntemleri 5 çeşittir. Bunlar:

1) Çekme (drawing) yöntemi

Basit ve uygun maliyetli fototenik tel üretimi sağlanmakta olup çekme bölgesinde sabit bir sıcaklık dağılımını gerektiren bir yöntemdir. Bunun yanı sıra, imal edilen tellerin uzunlukları sınırlıdır. Bu teknik yalnız, çekim esnasında oluşan gerilimleri taşıyabilme ve güçlü deformasyonlardan geçebilme özelliğine sahip malzemeler kullanılarak üretilen nanofiberler için gerçekleştirilebilmektedir (Kiyak ve Cakmak, 2014; Karahan, 2017).

2) Faz ayrımı yöntemi

Fiziksel uyumsuzluktan dolayı fazların ayrıldığı bu yöntem 5 aşamadan oluşur. Bunlar işlem sırasıyla polimerin çözünmesi, sıvı-sıvı faz ayrımı, polimer jelleşmesi, çözücünün jelden ekstraksiyonu ve söndürme olarak tanımlanabilir. Basit bir prosese sahip bu yöntem birkaç polimerle sınırlı olup sadece laboratuvar ölçekli bir yöntemdir (Kiyak ve Cakmak, 2014; Cevizlidere, 2020).

3) Kendiliğinden birleşme yöntemi

Bu yöntemde daha küçük birimlerin bir araya gelmesinde moleküller arası kuvvetler olup yeni nesil malzemeler tasarlamak ve üretmek için yenilikçi bir yol sağlamak amaçlanmaktadır. Bu yöntemin; üretim prosesinin zorluğu, fiber boylarının kısa olması, sınırlı sayıda polimere uygulanabilmesi gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır (Kiyak ve Cakmak, 2014; Özen, 2019).

4) Kalıp – sentez yöntemi

Çeşitli yapılara sahip nano malzemelerin sentezinin kontrollünde etkili olan bu yöntem; nano boyutta gözeneklere sahip bir metaloksit membranı ifade eder. Kullanılan membran kalınlıkları 5-50 mm olup silindirik yapıda gözeneklere sahiptir. Su basıncı ile membrandan polimer çözeltisinin geçmesi sağlanmaktadır. Polimer, membranın altında yer alan katılaştırıcı sıvı ile karşılaştığında nanofiber oluşumu gerçekleşir. Oluşan nanofiberlerin çapları membran içerisinde bulunan gözeneklerin çapları tarafından belirlenmektedir (Kiyak ve Cakmak, 2014; Demirel, 2018).

5) Elektrosprin (elektroeğirme) yöntemi

Günümüzde 20 nm ile 1 mikron arasında değişen çaplarda düşük maliyetli, yüksek dayanımlı nanoliflerin üretildiği yöntemdir (Kiyak ve Cakmak, 2014).

Elektroeğirme yöntemiyle nanofiberlerin üretilmesi, yalnızca bir malzemenin yüksek moleküler ağırlığa sahip olması, uygun visko-elastik özelliği olması ve uygun bir moleküler ağırlığa sahip olması gereken bir veya daha fazla malzeme ile karıştırılması durumunda mümkün olabilir. Bu nedenle polimerler, elektroeğirilmiş nanofiberlerin üretimi için uyarlanmıştır (Patel ve Gundloori, 2023).

Bu 5 çeşit nanofiber üretim yöntemlerinden en uygunu elektroeğirme (elektrosprin) yöntemi olup bu yöntem materyal metod kısmında detaylandırılmıştır.

ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİNİN TARİHÇESİ

Elektrospinning olarak da bilinen elektroeğirme yöntemi, çok güçlü bir nanofiber üretim tekniği olmakla birlikte mikro ve nano ölçekte elyaf üretebilecek kadar

çok yönlüdür (Ding ve ark., 2018). Bir sıvıyı veya ince aerosolleri bir polimer çözeltisinden dağıtmak için elektrik kuvvetlerinin kullanıldığı elektro spreylemenin soyundan gelen elektroğirme, kavramsal olarak benzer bir teknolojidir. İlk olarak 1747'de Abbé Nollet tarafından gerçekleştirilmiş olup ilk patenti John Cooley ve William tarafından alınmıştır (Keirouz ve ark., 2023). William James Morton ve John Francis Cooley elektroğirme yoluyla küçük lifler üretme olasılığını keşfettiler (Ding ve ark., 2018). 1882 de Rayleigh belirli büyüklükteki bir sıvı damlasının yüzey gerilimini aşarak patlamasına neden olan maksimum yük miktarını hesaplayarak ilk teorik çalışmayı yapmış oldu (Lukáš ve ark., 2009; Ding ve ark., 2018). 1914 yılında Minnesota Üniversitesi'nde çalışan bir fizikçi olan John Zeleny tarafından elektrospinning ile ilgili metal kılcal damarların en uç noktasındaki sıvı damlacıklarının davranışını tanımlayan ilk rapor yayımlandı. John Zeleny bu raporunda metal kılcal borunun ucundaki jet püskürmesinin, kenarda tutulan ve voltaj arttıkça bir spre yay üzerine parçalanarak bir sıvı damlası yüzey gerilimi sunduğunu gösterdi. Anton Formhals, 1931 ve 1944 yılları arasında, polimer çözeltilerden nanolifli malzemeler üretmenin en eski yöntemi olan elektroğirme ile ilgili 22 buluşun patentini aldı; bunlar arasında sadece prosesler değil aynı zamanda nanoipliklerin hazırlanmasına yönelik aparatlar da bulunmaktaydı (Keirouz ve ark., 2023; Uddin ve ark., 2023).

1964 ile 1969 yılları arasında elektroğirme sürecinin oluşumunun anlaşılmasına önemli katkılarda bulunan Taylor yaptığı çalışmalarla yüksek gerilim altında sıvı damlacığının hareketini matematiksel bir denklem ile ifade etmiştir. Bu denklem, bir sıvı damlacığının koni haline gelebilmesinde etkili olan kritik voltajın hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$V_c^2 = 4 \left(\frac{H^2}{L^2} \right) \left(\ln \left(\frac{2L}{R} \right) - 1.5 \right) (1.3\pi R \gamma) (0.09)$$

Yukarıdaki formüldeki parametreler;

V_c ; kritik voltaj (kilovolt),

H; elektrotlar arası mesafe (cm),

L; iğne ucu uzunluğu (cm),

R; iğne ucu yarıçapı (cm) ve

γ ; yüzey gerilimi (dyne/cm)

olarak tanımlıdır (Söylemez, 2016).

Elektriksel alan uygulandığı esnada iğnenin ucunda oluşan polimer damlasının şeklini inceleyen Taylor, iğnenin uç kısmında oluşan sıvı damlasının şeklini ilk başta yarı küresel bir yüzeye benzetmiş, elektriksel kuvvetin artması ile birlikte bu sıvı damlasının koni şeklini aldığını ve sonrasında bu koninin tepesinden jetler çıktığını gözlemlemiştir. Elektriksel alan uygulanması sonucu elektrik yükü ile yüklenen sıvının yüzeyinde, elektrostatik kuvvet ve yüzey gerilimi kuvveti dengeye ulaştığında iğnenin uç kısmındaki jetin bu koniye benzer şeklini diğer araştırmacılar “Taylor konisi” olarak adlandırmışlardır (Düzyer, 2009). Taylor, elektriksel kuvvete maruz kalan sıvının $49,3^\circ$ ’lik açıda konik bir şekildayken, sıvının yüzey gerilimi ile elektrostatik kuvvetin dengede olduğunu göstermiştir (Düzyer, 2009; Çunayev, 2021). Daha sonra yapılan çalışmalarda ise bu açı 33.5° ve 22.5° olarak modifiye edilmiştir (Çakmakçı, 2009). 1966 yılında Simons, pozitif yüklü elektrotu aseton çözücü kullanarak hazırladığı poliüretan, polikarbonat gibi polimer çözeltilerine, eksi yüklü elektrotu ise toplayıcı plakaya bağlayarak gerçekleştirdiği deneyde hem hafif hem de çok ince lif elde etmiştir. Simons lif elde etmede değişken olarak viskozite, iletkenlik, çözücü cinsi gibi parametreleri kullanmıştır (Söylemez, 2016). 1971 yılında Baumgarten, çapları 0,05-1,1 μm aralığındaki akrilik fiberlerin elektroğirilmesi için bir aparat yaptı. Geliştirdiği bu sistem sayesinde çözelti ve işlem değişkenlerinin liflerin yapısal özelliklerini ne derece etkilediğini araştırmıştır. Yaptığı deneylerde çözelti viskozitesi, jet uzunluğu, elektriksel alan şiddeti ve çözelti akış hızı gibi parametrelerin lif çapını nasıl etkilediğini incelemiştir (Angamma ve Jayaram, 2016; Söylemez, 2016). 1977 yılında Martin, Cockshott ve Fildes, elektroğirme metoduyla ürettikleri lifli yüzeylerin sağlık alanında kullanılabilir olmasını açıklamış, politetrafloroetilen, poliüretan, polivinilalkol gibi organik malzemelerden ürettikleri lifli yüzeylerle, yaraların iyileştirilmesinde kullanılan yara örtüsü ve doku iskeleleri gibi medikal protezler elde etmişlerdir. 1986 yılına gelindiğinde Hayati ve Tadros yaptıkları çalışmalarda, elektro eğirme yöntemi ile gerçekleştirdikleri polimer çözeltilisinden kararlı jet oluşumuna kadar elektriksel alanın etkisi araştırmalarında sıvının iletkenliğinin, jet oluşumunun belirlenmesinde en önemli faktör olduğu çıkarımını yapmışlardır. Bununla birlikte yalıtkan çözeltilerin yüzeylerinde yük taşıyamadıklarından jet oluşturamadıklarını, yarı iletken çözeltilerin koni şeklinde kararlı jetler oluşturabildiklerini ve iletkenliği yüksek olan çözeltilerin bir damlacığında ise voltajın artırılması ile birlikte birçok jetler oluştuğunu göstermişlerdir

(Söylemez, 2016). Elektro-eğirme metodunun temel prensibi 1934’de Anton Formhals’ın patentiyle başlamış ve 1994’te, “electrostatic spinning” ifadesinden türetilerek “electrospinning” terimi ile ifade edilmiştir. 1990’lı yıllarda ise, Reneker ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarla elektrospinnleme yönteminin nano lif üretiminde ilk kez kullanıldıktan sonra bu yöntem artık bir çok alanda kullanılmaya başlanmıştır (Söylemez, 2016)

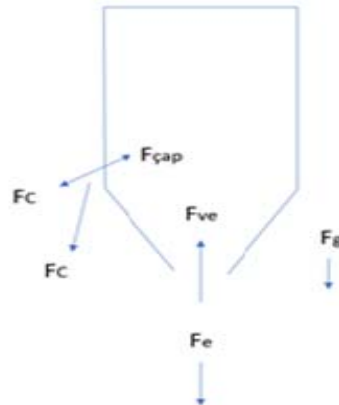
Son yıllarda nanoteknolojiye olan ilginin artması nedeniyle nano lif üretim teknolojisinde kullanılan, aktif ve geniş bir çalışma alanına sahip elektroegirme işlemi, tekstil endüstrisinden doku mühendisliğine kadar birçok alanda uygulanmakta olup ultra ince fiberler ve çapları mikron altı veya nanometre boyutunda olan çeşitli polimerlerin lifli yapılarının bu işlemle kolayca üretilmi sağlanmaktadır (Bhardwaj ve Kundu, 2010; Söylemez, 2016).

ELEKTROEĞİRME İŞLEM BASAMAKLARI

Elektro eğirme sürecinin başlangıcından toplayıcı plaka üzerinde rastgele nanolifler oluşturmaya kadar olan süreci;

- iğne ucunda damlacık oluşması,
- taylor konisinin oluşması,
- polimer jetin oluşması,
- kararlı bölgede jetin uzaması,
- kararsız bölgenin oluşması ve
- lif formunun katı hale geçme sürecinin gerçekleşmesi

şeklinde sıralayabiliriz (Söylemez, 2016).



Şekil 1.4.İğne ucundaki damla üzerine etki eden kuvvetler (Çakmakçı, 2009)

Güçlü bir elektrik alanı varlığında bir elektrik kuvveti uygulanarak sıvı bir polimer çözeltisini katı nanofiberlere dönüştürme işlemi olan elektroçizme tekniğinde öncelikle polimer uygun bir çözücüde çözülerek şırınganın içerisine yerleştirilir. Sonraki aşamada iğne ucu ile toplayıcı arasında yüksek gerilim uygulanır. İğnenin ucundaki polimer damlası kritik voltaj değerine kadar yüzey gerilimi tarafından uygulanan kuvvetlerin etkisiyle küresel bir şekildedir. Polimer çözeltisine uygulanan yüksek voltaj ile damlanın yüzeyinde oluşan yükler, birbirini iter ve yüzey geriliminin tersi yönde elektrik kuvvetler oluşur. Buradaki sıvı damlanın üzerinde; damlanın uzamasını sağlayacak yerçekimi ve elektriksel polarizasyon kuvveti, koninin oluşumunu engellemeye yarayan viskozite, yüzey alanının küçültülmesini sağlayan yüzey gerilimi ve yüzey alanının genişletilmesinde kullanılan normal elektrik yük arasında bir kuvvet dengesi bulunmaktadır. Bu kuvvetler şekil 1.4 ile gösterilmiştir. Bu kuvvetler damlacığı jet formuna getirerek, yüksek bir ivme yardımıyla toplayıcıya taşıyan kuvvetlerdir.

Elektrik alandan kaynaklanan çekim (polarizasyon) kuvveti (F_E) yüklü damlacık ve düze ile toplayıcı arasındaki elektrik alan kuvvetlerinin ortalaması olup damlacığı toplayıcıya doğru çeker. Denklemi ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$F_E = \frac{(4\pi\epsilon V^2)}{\left(\ln\left(\frac{4L}{R}\right)\right)^2}$$

E: dielektrik sabiti,

V: uygulanan voltaj,

L: iğne-toplayıcı plaka arası mesafe,

R: ise damlacığın yarıçapıdır.

F_C ; Damlacığın kendi içerisindeki oluşturduğu Coulomb itme kuvvetidir.

Damlacığın içinde itme kuvvetleri oluşturan Coulomb itme kuvvetini veren denklem aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$F_C = q^2 / \ell^2$$

Burada; ℓ damlacık içindeki iki parçacık arasındaki uzaklığı ifade eder. Bu kuvvet jetin uzamasını sağlayan parçacıklar arası itme kuvvetidir.

$F_{\text{çap}}$; yüzey gerilim kuvveti olup damlayı ve jeti stabilize eden kuvvettir.

F_{ve} ; viskoelastik kuvvettir. Polimer jetinin uzamasını ve akmasını engelleyen polimer zincirleri arasındaki sürtünme kuvvetleridir.

F_g ; yerçekimi kuvvetidir. Damlacığın toplayıcıya ulaşması için, elektro üretimin yönüne göre artı ya da eksi etkiye sahiptir

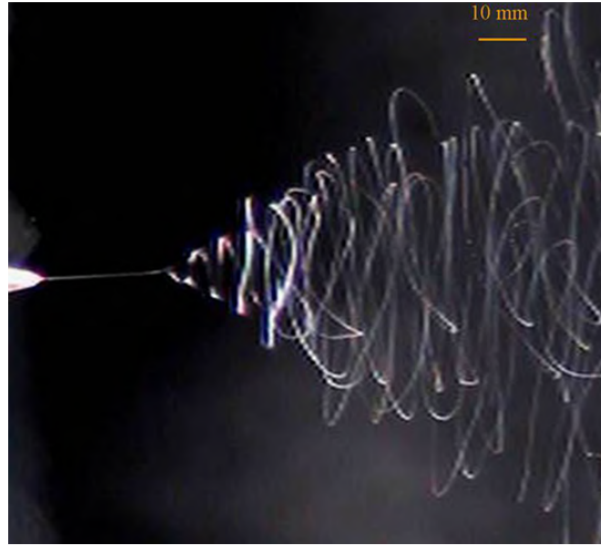
$F_g = \rho \pi r^2 g$ olarak ifade edilir.

Burada; ρ çözelti yoğunluğu, g yerçekimi sabitidir (Ulusoy, 2022).

Yeterli elektrik alan varlığında bu kuvvetler damlanın Taylor konisi olarak bilinen koniye dönüşmesini sağlar (Shin ve ark., 2001) ve kritik değere ulaştığında elektrostatik kuvvetler yüzey gerilimi kuvvetlerine eşitlenir. Elektrik alanın artışıyla yüzey gerilimi tarafından elektrostatik kuvvet dengelenemez ve bu durum yüklü ince bir jetin Taylor konisinden fırlatılmasına sebep olur (Sill ve Von Recum, 2008; Çakmakçı, 2009; Nirwan ve ark., 2022). Çözeltinin yüzey gerilimini aşması durumunda uygulanan voltaj değerine “kritik voltaj (F_c)” adı verilmektedir. Düzenin ucundan çıkan polimer jeti ise elektriksel alan etkisi ile karşı taraftaki yüklü toplayıcıya doğru hareket etmeye başlayacaktır (Çunayev, 2021).

Şırınga ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe aynı zamanda çözücünün uzaklaştığı, polimer jetinin ise incelişip uzadığı bölgedir. Polimer jetin bu alanda hareketi esnasında birçok eğilme kararsızlığı oluşarak çözücü buharlaşır (Çunayev, 2021). Polimer jetin bu düzensiz hareketi, çözelti türünün değiştirilmesi ve işlem parametrelerine bağlı olarak farklılık gösteren, üç kararsızlık halinden yalnız birini veya üçünü birlikte de gösterebilir. Bu hallerden birincisi klasik Rayleigh kararsızlığı, ikincisi eksenel simetrik alan akımlanması ve üçüncüsü ise Whipping kararsızlığıdır. Bu üç kararsızlık hallerinden elektroğirme sürecinde en fazla karşılaşılan “Whipping kararsızlığı”dır. Whipping kararsızlığının nedeni jetin yüzeyinde aynı yüklenmiş liflerin birbirlerini karşılıklı olarak itmesi ile jet merkezinde oluşturdukları tork tur. Jetin toplayıcı plakaya yaklaşmasıyla yükler birbirini iterek ana jetten kopan daha küçük boyutta jetler oluştururlar. Polimer jetin elektriksel kuvvet etkisi altında hızlanıp yeteri kadar incelendiği durumda viskoelastik kuvvetler daha fazla artar ve elektrostatik kuvvetlerden az bir farkla büyük olduğunda ise polimer jeti dengesiz bir hale gelir. Bu anda, dışardan etki edecek olan hafif bir hava akımı bile salınım oluşmasına sebep olarak yeni Whipping kararsızlıkları oluşturur. Bu kararsızlık haline de “ikinci Whipping kararsızlığı” denir. İğnenin uç kısmından çıkan jetler birinci ve ikinci Whipping kararsızlık bölgelerinden

sonra fiber formuna gelerek toplayıcı plaka üzerine düzensiz olarak birikirler (Söylemez, 2016).



Şekil 1.5. Elektriksel bükülme kararsızlığına sahip elektrospinning jet (Han, 2007)

Fiber jet çözücünün buharlaşmasına izin vererek toplayıcı üzerinde katı polimer liflerin birikmesine neden olur ve Elektroğirme işleminin son basamağı gerçekleşir. Burada toplayıcı üzerinde çözücünden tamamen uzak, sürekli liflerden oluşan iki boyutlu dokusuz yüzey formunda yapılar oluşur. Üretilen lifler birkaç nanometreden onlarca mikrometreye kadar çaplara sahip olabilmektedir. Oluşan nanofiberler, toplayıcı plaka üzerinde gelişigüzel konumlanarak dokusuz bir yüzey oluşturur (Çakmakçı, 2009; Üstündağ, 2009; Çunayev, 2021). Oluşan bu yüzeyin pürüzsüz olup olmaması veya damlacıklar halinde dağılıp dağılmaması; polimerin molekül ağırlığına, zincir dolaşmasına ve işlemde kullanılan çözücüye bağlıdır (Jiang ve ark., 2015).

ELEKTROEĞİRME YÖNYEMİ İLE NANOFİBER ÜRETİMİ

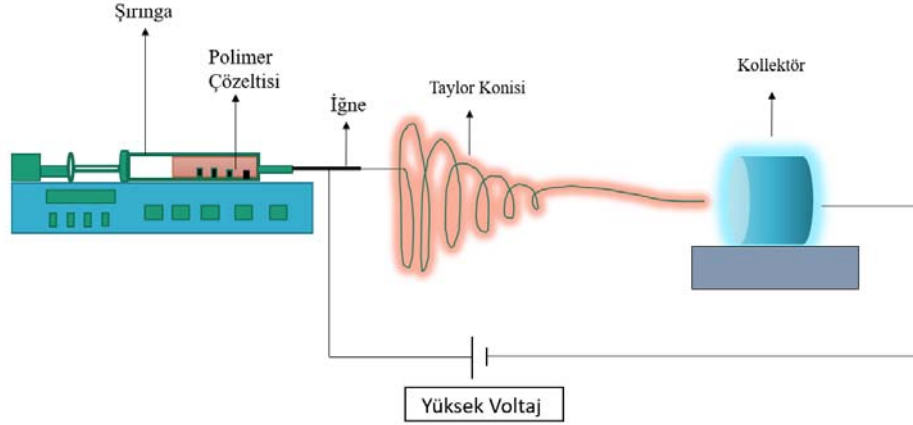
Elektroğirme sistemi üç ana ünitelerden oluşmaktadır.

Bunlar:

- Polimer çözeltisi ile doldurulmuş ve metalik bir iğne ile kapatılmış bir şırınga ve kontrol sistemine sahip bir enjektör pompası,
- Yüksek voltaj güç kaynağı,

- İğnenin ucundan önceden belirlenmiş bir mesafeye yerleştirilmiş kollektördür (alttabaka).

Kullanılacak deneysel sistem Şekil 1.6 ile verilmektedir



Şekil 1.6. Elektroegirme tekniği kullanarak nanofiber üretim süreci

Çeşitli polimer türlerinden nanofiber eldesi için elektroegirme yöntemi son derece ekonomik ve verimli bir yöntem olmakla birlikte kullanılan polimer çözeltisinin viskozitesi, elektriksel iletkenliği, yüzey gerilimi ve pH değeri gibi fizikokimyasal değerler üretilecek malzemenin yapısını etkileyen faktörlerdir (ÇAYDAMLI, 2012).

Elektro egirme işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken hususlara değinecek olursak;

- Polimerin çözülmesi için gerekli olan uygun çözücü seçilmeli ve hazır hale getirilmelidir.
- Çözücü hızlı bir şekilde buharlaşmalı ve aynı zamanda nano boyutlu fiberlerin nanometre boyutuna ulaşmadan sertleşmesini engellemelidir.
- Polimerin şırınga ucundan serbestçe akmasını sağlamada kullanılan çözücünün viskozitesi ve yüzey gerilimi, jetin oluşumu açısından çok hassas ayarlanmalıdır.
- Güç kaynağı, çözeltinin viskozitesinin ve yüzey geriliminin ayarlanmasında yeterli olmalıdır.
- Şırınga ucu ile topraklanmış yüzey arasındaki mesafe çok kısa olmamalı, aynı zamanda fiberlerin oluşması için zaman içerisinde çözücünün buharlaşmasına yetecek kadar da büyük olmalıdır (Yiğitöl, 2019).

Nanofiberlerin yapısının, gözenekli bir hale gelmesiyle yüzey alanı büyük miktarda artırılabilir. Elektro-eğirme yöntemi ile üretilen nanofiberlerde gözenekli yapı oluşturmanın iki ayrı yöntemi vardır. Bu yöntemlerden *birincisi*, farklı kimyasal içeren çözeltilerden elde edilen nanofiberlerin yapısında bulunan bileşenlerden birinin seçici olarak ayrılması sonucu gözeneklerin oluşması, *ikinci yöntemde* ise, elektro-eğirme işlemi boyunca işlem parametrelerinin değiştirilmesi ile farklı polimerlerin faz ayrışmalarından faydalanılması şeklindedir (Süslü, 2009). Sentetik polimerlerin birçoğu mekanik olarak sağlam olmasına rağmen, doğal polimerlerin hücre bağlanmasını, büyümesini ve farklılaşmasını destekleyen kendine özgü birtakım özelliklerinden yoksundurlar. Bu sebeple, bir elektro-eğirme çözümü formüle etmek için farklı polimerleri birleştirmek, doğal ve sentetik polimerlerin arzu edilen özelliklerini tek bir platformda bütünleştirmeye yönelik bir stratejidir (Ghosal ve ark., 2019).

Düzgün nanofiber üretiminde temel amaç, boncuklu yapıların olmadığı, ince fiberler elde edilmesidir. Elektro-eğirme işlemi, uygulanması kolay bir yöntem gibi görünse de düzgün nanofiber elde edilmesini sağlayan bir çok parametre vardır. İstenen formda nanofiber morfolojisi ve özellikleri elde edilmesinde bu parametrelerin optimizasyonu elektro-eğirme işleminin en büyük zorluğudur. Optimum parametreler belirlenmediği durumda, toplayıcı üzerinde oluşan yüzeyde damlacık oluşumu ve boncuklu yapılar gibi hatalar görülebilir (Çunayev, 2021).

ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Elektro-eğirme yöntemi ile elde edilen nanofiberlerin çapı ve morfolojisi üç ana başlık altında toplanmış çeşitli parametrelere bağlıdır. Bunlar;

- 1) Polimer çözeltisinden kaynaklanan parametreler
- 2) İşlem parametreleri
- 3) Çevresel parametreler şeklindedir (Rahmati ve ark., 2021).

Nanofiberlerin yapısını ve boyutunu etkileyen parametreler tablo 1.6 da verilmiştir.

Polimer çözeltisinden kaynaklanan parametreler	İşlem parametreleri	Çevresel parametreler
Molekül kütlesi ve viskozite	Uygulanan voltaj	Sıcaklık
Yüzey gerilim kuvveti	İğne-toplayıcı plaka arası mesafe	Nem
Çözeltinin iletkenliği	Çözeltinin akış hızı	Basınç
Dielektrik sabiti	Toplayıcının etkisi	Atmosfer cinsi
Çözücü uçuculuğu	Şırınga çapı	

Tablo 1.6. Nanofiberlerin yapısını ve formunu etkileyen parametreler(Süslü, 2009)

POLİMER ÇÖZELTİSİNDEN KAYNAKLANAN PARAMETRELER

Molekül Kütlesi ve Viskozite

Polimerin molekül kütlesini, çözeltideki polimer zincirlerin uzunluğu olarak tanımlayabilirken, polimer zincirinin uzunluğunu ise çözücü içerisindeki polimer zincirlerinin karmaşıklık miktarı olarak tanımlayabiliriz. Polimerin molekül kütlesinin artması durumunda oluşturduğu çözeltinin viskozitesinin de artar. Bu durum polimerin molekül kütlesinin, polimer çözeltisinin viskozitesinin belirlenmesinde önemli bir faktör olduğunu gösterir (Üstündağ, 2009). Elektroegirme işlemi için çözelti viskozitesinin optimum yani uygun olması gerekmektedir, çünkü çok düşük viskozitede kısa lifler oluşur ve elyaf oluşmaz. Çok yüksek viskozitede ise çözelti iğnenin ucunda

kuruyabileceğinden polimer çözeltisinden jetlerin çıkarılması zorlaşır (Üstündağ, 2009; İNAN ve ŞEKER, 2021).

Çözelti viskozitesinin arttığı durumda çözücü moleküllerinin polimer molekülleriyle etkileşimi artarak boncuksu yapıların azaldığı ve daha düzgün nanofiber yapıların oluştuğu gözlenirken düşük moleküler ağırlığa sahip polimerlerin varlığında ise boncuksu yapılarda artış olduğu gözlemlenmiştir (Gilik ve Avcı, 2021).

Yüzey Gerilim Kuvveti

Çözeltinin yüzey geriliminin azaltılması ile boncuksuz lifler elde edilebilirken yüzey geriliminin artırılması durumunda ise düzgün olmayan jet oluşumu ve düze ucunda püskürtülen damlacıkların oluşması sebebiyle elektro-eğirme işlemi engellenmektedir (Sunar ve Hasçıçek, 2017).

Çözeltinin İletkenliği

İletkenliği yüksek çözeltilerde elektro eğrilmiş nanofiber çapının önemli ölçüde düştüğü gözlenirken, iletkenliği düşük olan çözeltilerde ise jetin yetersiz uzanımı sonucu boncuklu yapılar görülebilir (Sunar ve Hasçıçek, 2017). Yüksek iletkenliğe sahip olan çözeltilerin, yük taşıma potansiyellerinin yüksek olmasından bu çözeltilerin fiber jeti, bir elektrik alanının varlığında, düşük iletkenliğe sahip bir çözeltiden gelen fiber jetine göre daha büyük bir çekme kuvvetine maruz kalacaktır (Sill ve Von Recum, 2008). Çözeltinin iletkenliğini; çözeltinin pH değerinin değiştirerek veya iyon ilave ederek artırılabilir. Çözeltiye tuz ilave edilerek jet üzerinde oluşan gerilme ve uzama değerleri artarken aynı zamanda boncuklu yapı oluşumu da engellenmiş olur. Böylelikle elektro-eğirme işlemi ile nanofiber elde etmek için gerekli olan kritik voltaj değerinin düşmesi sağlanır ve oluşan fiberlerin daha büyük bir alanda oluşması sağlanır (Süslü, 2009; Üstündağ, 2009).

Çözücünün Dielektrik Sabiti

Çözeltinin dielektrik sabitinin yüksek değer olması durumunda, boncuklu yapının oluşumu engellenmiş, aynı zamanda daha küçük çapta fiber üretimi sağlanmış olur. Çözeltiye N-N'' Dimetilformamit (DMF) gibi çözücülerin ilavesi çözeltinin dielektrik özelliklerinin artırarak fiber yapısının iyileştirilmesini sağlayabilir. Dielektrik sabitinin

yüksek olması elektro çekim jetinin kararsızlığının artması daha geniş bir alanda, daha küçük çaplı fiber oluşumunu destekler (Süslü, 2009; Üstündağ, 2009).

Çözücünün Uçuculuğu

Çözücü uçuculuğunun düşük olması halinde çözeltinin akış hızı etkilenir ve düze ucu ile toplayıcı arasındaki mesafenin artırılmasına sebep olur. Bu mesafenin kısa olduğu durumda toplanan liflerin yeterince kurumadığı, birbirlerine yapıştığı görülür.

Çözücü uçuculuğunun aşırı yüksek olması durumunda polimer jeti düze ucundan ayrılmadan önce tamamen buharlaşarak düze ucunu tıkar ve kesintisiz lif oluşumunu engellenmiş olur.

Yapılan çalışmalarda aynı polimer türünün farklı derecede uçuculuğa sahip çözücüler ile birlikte kullanılması durumunda, yüksek derecede uçuculuğa sahip olan çözücüler kullanılarak üretilen liflerin daha gözenekli yapıda olduğu gözlenmiş olup bu durum, nanofiberlerin yüzey alanı / hacim oranını artırmıştır(ÇAYDAMLI, 2012).

İŞLEM PARAMETRELERİ

Uygulanan Voltaj

Uygulanan voltaj değerinin artırılması düze ucunda bulunan polimer çözeltisi damlasının Taylor konisine dönüşümünden sonra toplayıcı plakaya daha hızlı bir şekilde ilerlemesini ve üretilen fiberlerin daha ince olmasını sağlar. Voltajın artırılması belli bir noktaya kadar fiberde incelme sağlarken aşırı artırılması durumunda daha fazla polimerin çekilmesi nedeniyle kalın ve boncuklu bir yapının oluşacaktır. Bu durum istenmeyen bir durumdur (ÇAYDAMLI, 2012; Gilik ve Avcı, 2021). Yani belli bir değere kadar artan voltaj, boncuk oluşumunu azaltırken voltajın daha fazla artması sonucu boncuklu yapılar artacaktır. Bu nedenle etki eden voltaj değeri belirli bir kritik değere göre ayarlanmalı ve bu kritik değerin altında veya üzerinde olmamalıdır. Aynı zamanda uygulanan yüksek voltaj ile fiberlerin sadece fiziksel görüntüsü değil kristalinitesi de etkilenmektedir (Üstündağ, 2009).

İğne Ucu ile Toplayıcı Plaka Arası Mesafe

Toplayıcı ile iğne ucu arasındaki mesafenin azalması durumunda yeterince çözücünün buharlaşması için yeterli zaman oluşmayacağından boncuklu ve kalın çapta fiberler meydana gelir. Bu mesafenin artırıldığı durumda ise elektrik alan kuvveti artarak jetin

hızlanmasına neden olur ve polimer jetin toplayıcıya daha kısa sürede ulaşması sağlanır. Böylelikle elde edilen fiber çaplarında azalma görülecektir (Üstündağ, 2009; Gilik ve Avcı, 2021; Rahmati ve ark., 2021).

Buchko ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda mesafenin küçük değerlerde olmasının iğne ucu ile toplayıcı plaka arasında oluşan elektrik alan kuvvetine bağlı olarak boncuksu yapı oluşumuna neden olduğunu gözlediler. Mesafe artırıldığında jetin havada kalma süresi ve uzaması artarken ortalama fiber çapının azaldığı görülür. Mesafenin daha çok artırılması halinde ise fiber oluşumu gözlemlenmeyebilir. Fiber üretimi için mesafenin uygun değerlerde olması bu nedenle önemli bir etkidir (Süslü, 2009).

Çözelti Akış Hızı

Akış hızı, pürüzsüz nanofiberler elde edilmesi için önemli parametrelerden biridir (Patel ve Gundloori, 2023). Çözelti akış hızının düşük olduğu durumda Taylor konisinde bir takım bozulmalar meydana gelir. Çözelti akış hızının yüksek olduğu durumda ise düze ucunda oluşan damlanın kütlesi artar ve düze ucundan toplayıcı plakaya doğru giden çözücü tamamen uçmayabilir. Bu nedenle nanofiber yapıların çapında ve gözenek büyüklüğünde artış olarak boncuksu yapılar oluşur (ÇAYDAMLI, 2012; Gilik ve Avcı, 2021). Elektro-eğirme işlemi için uygun çözelti akış hızının kritik değeri Taylor konisinin kararlı hale gelmesini sağlayan değerdir. Akış hızı artışının fiber çaplarına etkisini inceleyen Megelski ve ekibi fiber çaplarının 90 nm'den 150 nm'ye çıkarak oluşan yapının daha fazla boncuklu bir şekilde olduğunu belirtmişlerdir (Süslü, 2009).

Toplayıcının Altlık Etkisi

Elektro-eğirme işleminde elektro çekimin başlayabilmesi için iğne ucu ile toplayıcı plaka arasında bir elektrik alan oluşturabilmek için toplayıcı plakaya yerleştirilen altlıkların iletken yapıda olması gerekir. Bu sebeple altlık olarak iletken özellik gösteren alüminyum folyo gibi malzemeler kullanılmaktadır. Alüminyum folyonun elektriksel olarak topraklanma özelliği sayesinde iğne ucu ile toplayıcı arasında düzgün bir potansiyel fark oluşur. Yalıtkan bir altlık kullanıldığında ise toplayıcı üzerinde daha az fiber birikimi gerçekleşecektir. Aynı zamanda toplayıcı malzemenin seçimi kadar toplayıcının şekli de elektro çekim ve oluşacak nanofiberlerin yapısını etkileyen diğer bir niceliktir (Süslü, 2009; Üstündağ, 2009).

Şırınga Çapı

İğne iç çapının azalması ile iğne ucundaki damlacık boyutu azalacağından damlacığın yüzey geriliminin artması sağlanır. Böylelikle aynı voltaj değerinde jetin oluşması için daha fazla coulomb itme kuvveti gerekirken jetin ivmesinin düştüğü görülür. İvmenin düşmesi ile jetin toplayıcı plakaya ulaşmadan önce havada ilerleme ve gerilme süresi artacağından üretilen fiberlerin çapı ve boncuk oluşumu da azalır. Şırınga çapının çok küçük olduğu durumda ise çözeltinin püskürtülmesi zorlaşmış olacağından tıkanmalar meydana gelerek boncuk oluşumu artar (Süslü, 2009; Üstündağ, 2009).

ÇEVRESEL PARAMETRELER

Sıcaklık

Sıcaklık çözücünün buharlaşma hızını etkilerken aynı zamanda çözeltinin viskozitesini de etkiler (Maliszewska ve Czapka, 2022). Elektro eğirme işleminin meydana geldiği ortamın sıcaklığı artırıldığında polimer çözeltisinin viskozitesi azalarak daha küçük çaplı fiberler üretilir. Ortam sıcaklığı düşürüldüğünde ise boncuk oluşumu gözlenmektedir (ÇAYDAMLI, 2012; Rahmati ve ark., 2021).

Nem

Bağıl nem artışı ile fiber üzerinde yoğunlaşan su molekülleri fiber yapısının gözenekli bir hal almasına sebep olur. Nem miktarındaki artış, oluşan fiber yapısında oluşan gözeneklerin boyutu ile derinliğinde artma meydana getirir. Nem miktarının azalması ise çözücünün buharlaşma hızı yüksek olacağından tamamen kurumasına sebep olabilmektedir (Süslü, 2009; Gilik ve Avcı, 2021; İNAN ve ŞEKER, 2021).

Basınç

Basıncın düşük olduğu ortamlarda gerçekleştirilen elektro-eğirme işleminde düze ucundaki polimer çözeltisi taylor konisi oluşturmadan toplayıcının üzerine düşer. Jet üzerindeki elektrik yüklerinin kolay boşalması sonucu kararsız jet oluşumu gözleneceğinden elektro-eğirme işlemi gerçekleşemez ve bu istenilen bir durum değildir (Süslü, 2009; Gilik ve Avcı, 2021).

Atmosfer cinsi

Atmosferde bulunan gazların elektrik alan varlığındaki hareketleri aynı değildir. Örneğin, helyum gazı elektrik alan altında parçalanarak elektro-eğirme işleminin gerçekleşmesini zorlaştırırken, Freon®-12 gibi yüksek oranda parçalanma voltajına sahip gaz ortamında üretilen fiberler benzer üretim şartlarında hava ortamında üretilen fiberlere göre iki kat büyüklükte çapa sahiptirler (Süslü, 2009).

ELEKTROEĞRİLMİŞ NANOFİBERLERİN DOKU MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANIMI

Tıp, biyoloji ve mühendislik alanlarının prensipleri ile ele alınan biyolojik bir dokunun fonksiyonlarının sürdürülebilmesi, geliştirilmesi ve iyileştirilmesine yönelik multidisipliner bir alan olarak tanımlanan doku mühendisliği; doğal ekstrasellüler matriksin (ESM) başarıyla taklit ederek yapay doku ve organlar elde edebilme amacı taşımaktadır (Çelik, 2019). Böylelikle uzun, karmaşık ve nadir olarak gerçekleştirilebilen organ nakillerinden kaçınmak hedeflenmektedir (Hosseini ve Mozafari, 2020).

Elektroeğirme, doku mühendisliği uygulamaları için nanofiber üretmek için kullanışlı ve çok yönlü bir tekniktir (Jiang ve ark., 2015). Doku mühendisliği uygulamalarında elektroeğirme işlemi fiberlerin ve fiber ağların kullanımı genellikle malzeme seçimi, fiber oryantasyonu, gözeneklilik, yüzey modifikasyonu ve doku uygulaması dahil olmak üzere çeşitli unsurları içermektedir. Malzeme seçenekleri arasında ise hem doğal hem de sentetik (biyolojik olarak parçalanabilen ve parçalanmayan) malzemeler yer alırken aynı zamanda mekanik ve biyomimetik özelliklerin optimal kombinasyonunu sağlayabilen bu ikisinin hibrit karışımları da yer almaktadır (Sill ve Von Recum, 2008).

Doku mühendisliği çalışmaları 3 aşamada gerçekleşir

- 1) Bir molekülün hasarlı doku veya organa enjekte edilmesi:

Enjekte edilen bu molekül tarafından sağlam hücrelerin yaralı bölgeye doğru hareketi sayesinde iyileşme sağlanmaktadır. Bu durum, az hasarlı dokularda daha işlevseldir.

- 2) İzole edilmiş hücrenin polimerik taşıyıcı yardımıyla hücreye verilmesi:

Bu aşamada dokunun onarılması sağlanır.

3) Hastadan alınan hücrelerin uygun ortamda bekletilerek çoğaltılması:

Bu aşamada çoğaltılan hücreler, biyosinyal moleküllerin yardımıyla doku iskelesi üzerine ekilerek hasar görmüş doku bölgesine yerleştirilir (Yırtmaz, 2022).

Biyolojik sistemlerle temas halinde olup, vücutta bulunan herhangi bir dokunun veya organın yerine geçmesi amacıyla kullanılan; bulunduğu ortamın normal etkinliğini tedavi eden, iyileştiren doğal ya da sentetik malzemelere biyomalzeme denilmektedir (Akdemir, 2009).

Bir biyomalzeden biyoyumluluk ve toksik özellik göstermemesi beklenilmektedir. Yeni bir biyomalzeme sentezi yapılırken öncelikle malzemenin biyolojik, tıbbî ve mühendislik özelliklerinin uygun olması ve birbirleri ile bütünleştirilebilir özelliklere sahip olmasına dikkat edilmelidir. Yaygın olarak kullanılan biyomalzemelerden olan polimerik malzemeler lif, film, jel, boncuk, küre, nanoparçacık gibi farklı şekillerde hazırlanabilmeleri nedeniyle geniş kullanım alanına sahip biyomalzemelerdendir (Akdemir, 2009).

Elektroeğirme işleminin; damar sistemi, kemik, nöral ve tendon/bağ gibi bir takım doku mühendisliği uygulamaları bulunmaktadır (Sill ve Von Recum, 2008).

POLİMERLER

Polimerler; birbirini tekrar eden bir çok monomer yapının diziliminden oluşmuş molekül topluluğu olup hafif ve ucuz olmaları, kolay şekillenebilmeleri ve birçok uygulama alanına sahip olmaları ile insan hayatında büyük bir önem teşkil eden malzemelerdir (Yoruç ve Uğraşkan, 2017; Gilik ve Avcı, 2021).

Polimerler sentetik polimerler ve doğal polimerler(yani biyopolimerler)olmak üzere ikiye ayrılır (Rodríguez-Tobías ve ark., 2019).

Biyopolimerler canlı organizmalar tarafından üretilen polimerler olup sentetik polimerlerin başarısız olduğu durumlarda hücreler arası malzemeye olan benzerlik ve mekanik gereklilikleri yerine getirebilme özelliğine sahiptirler. Ayrıca elektro-eğirme yöntemi ile nano boyutlarda üretimi yapılarak tıp alanında doku mühendisliği uygulamalarında büyük bir öneme sahiptirler (ÇAYDAMLI, 2012).

Doğal polimerler sıcaklığa karşı oldukça duyarlıdır ve karmaşık yapılarından dolayı elektroeğirme tekniği ile işlenmesi zordur. Doku mühendisliği uygulamaları için genellikle iki tip doğal polimer kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi kolajen ve jelatin

gibi proteinler olup ikincisi kitin , kitosan ve aljinat gibi polisakkaritler şeklindedir (Rodríguez-Tobías ve ark., 2019).

Sentetik polimer kolay uygulanabilirliği ile doku mühendisliğinde oldukça faydalıdır. Ayrıca bu polimerler doğal analoglarla karşılaştırıldığında genellikle daha ucuz olduğundan daha fazla miktarlarda üretilebilirler (Rodríguez-Tobías ve ark., 2019).

Elektroegirme yönteminde kullanılan polimerlerden biri de farklı uygulamalarda kullanılabilirliği ve üstün özelliklere sahip olduğundan üzerinde yoğun araştırma bulunan poliakrilonitril (PAN) polimeridir (Özek ve ark., 2015). PAN katkılı nanofiberlerin içerisine çeşitli NP'lar konularak aplikasyon çeşitliliği artırılmaktadır (AYKUT, 2013). Bu yönde önceden yapılan çalışmalarda (Liu ve ark., 2011) tarafından altın nanopartikül yüklenmiş PAN nanolifler üretilip nanoliflerin elektrokatalitik etkileri incelenmiştir.

Biyopolimerlere örnek olarak Proteinler, polisakkaritler, DNA ve RNA gösterilebilir (Mohanty ve ark., 2005). Doğal polimerlerden olan proteinler; kreatin, kolajen, jelatin, aktin, miyosin şeklindedir.

KOLLAJEN

Kollajen; suda çözünmeyen, yüksek mekanik güce sahip olan doğal bir protein olup lifli yapısı sayesinde doku hücreleri arasında bulunan boşlukları doldurarak deri dokusunun parlak, esnek ve yumuşak olmasını sağlamaktadır (Avcı, 2022). Kolajen derimizin %75'lik bölümünü meydana getirmekte olup vücudumuzdaki proteinlerin yaklaşık %25'lik kısmını oluşturan önemli bir proteindir (Sharma ve ark., 2008). Kollajenin yapısını ilk olarak 1938 yılında Astbury ortaya koymuştur (Houacine ve ark., 2018).

Birbiri üzerine sarılı üç zincirden meydana gelen kolajenini yapısındaki her bir zincirin uzunluğu 1400 amino asit uzunluğu kadardır. Üç tane aminoasidin tekrarından meydana gelerek iç kısımda kalan 3. amino asit glisin, dış kısımda kalanlar ise prolin ve hidroksiprolindir. Kolajenin ilk medikal olarak kullanımı 1970'lerde doku çevre kenar bozukluklarının co-reaksiyonunu sağlamak için gerçekleştirilmiştir (BAHAR; Sun ve ark., 2022).

En bol bulunan protein olan kolajen sığır derisinden, tendonlarından ve kemiğinden ekstrakte edilebilmektedir. Ayrıca kolajen, iyi biyoyumluluğu ve hücre yapışma özellikleri nedeniyle birçok uygulama alanına sahiptir (Spoiala ve ark., 2015).

Vücutta bulunan kolajenin sentezi sigara ve alkolün kullanımı, yaşlılık, vücuttaki oksijen miktarının azalması, beslenme eksiklikleri, güneş ışınları ve diğer dış faktörler nedeniyle 20'li yaşlardan itibaren azalır (SAGCAN ve ark., 2001). Kolajen sentezindeki bu azalmalar sonucu yorgunluk hissi, performans kaybı ve yaraların iyileşme süresinin artması gibi semptomlar görülmektedir (SAGCAN ve ark., 2001). Kolajenin farklı kullanım alanlarını sıralayacak olursak;

- Kemik, kırık ve cilde esneklik sağlama,
- Gerilme Direncini artırma,
- Homojenlik,
- Biyo-Uyumluluk sağlama,
- Biyo-Bozunabilirlik
- Doku ve organ gelişimine yardımcı olma,
- Toksinlerin ve patojenlerin emilimini engelleyerek cildi koruma (Fratzl, 2008),
- Hasarlı kemiklerin veya kan damarlarının iyileşmesine yardımcı olma

şeklinde (Buehler, 2006). Kolajenin lifli yapıda bir protein olması yönü, gerilme direncinin artmasını sağlamaktadır (Yoruç ve Uğraşkan, 2017). Kolajen ham formda kullanılabilirken aynı zamanda gözenekli süngerler, jeller ve tabakalar halinde de işlenilebilmektedir (ÜSTÜNDAĞ Doç. Dr. Cem Bülent, 2020). Kolajen, ekstraselüler matriksin yapısında, fiber formda olmasından dolayı, biyomedikal uygulamalar ve doku mühendisliği alanında kullanımı açısından bu formda üretimi önemli hale gelmiştir.

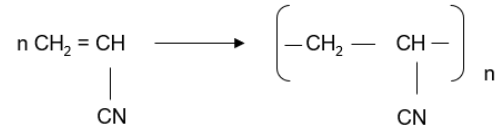
Kolajen biyomamalemlerin biyolojik olarak parçalanabilir olması toksik olması ve biyolojik olarak emilebilir olmasından dolayı biyouyumluluk gibi sorunları da yoktur. Kolajen nanofiberler yara iyileşmesi için de önemli bir doğal kaynaklı biyomaleme olup üretim yöntemi nedeniyle faydaları göz ardı edilmemelidir (Lo ve ark., 2023).

Diğer biyopolimerlerde olduğu gibi kolajen elektroeğirmede uygun çözücülerin seçimi önemlidir. Kolajen çözünmesi için en sık kullanılan çözücü yüksek uçuculuğu nedeniyle HFIP dir (Uddin ve ark., 2023).

POLİAKRİLONİTRİL (PAN)

PAN polimeri 1930 yılında sentezlenmiş olup 1930-1945 yılları arasında yapay kauçuk olarak kullanılmıştır. 1945 yılında ilk kez Fiber adı ile filament halinde piyasaya sürülen PAN, 1950 ve 1952 yıllarında Orlon adı ile filament ve kesikli elyaf

halinde üretilmiştir (Çunayev, 2021). Çok yönlü, insan yapımı bir polimer olan Poliakrilonitril (PAN), moleküler formülü $(C_3H_3N)_n$ olan bir karbon zincirinin diğer bir karbon zinciri ile bağlandığı lineer yapı gösteren bir polimerdir (Khayyam ve ark., 2020). Akrlonitril monomerlerinin radikal zincir polimerizasyonundan elde edilen, akrilik liflerini oluşturan PAN polimerlerinin polimerizasyonu aşağıda verilmiştir.



Şekil 1.7. PAN polimerinin polimerizasyonu(Çunayev, 2021)

PAN'den elde edilen polimerler iyonize haldeki çözücüler haricinde çözücülerde çözünmezler ve yüksek ergime sıcaklığına sahiptirler. PAN liflerinin eldesinde çözücü olarak N, N-dimetilformamid (DMF), dimetilsülfon, dimetilasetamid kullanılmaktadır. PAN lifleri, polimerin bu çözücülerden birinin içinde çözünmesiyle elde edilmektedir (Khayyam ve ark., 2020; Çunayev, 2021). Poliakrilonitril (PAN), tekstil, su arıtma, hava filtreleme, koruyucu giysi ve süper kapasitörler gibi çok sayıda uygulamada kullanılmaktadır (Khayyam ve ark., 2020). Ayrıca PAN'ın, geleneksel mikro boyutlu karbon fiberler için iyi bir öncü olduğu, orta derecede hidrofilikliği nedeniyle fibroblast ekimi için mükemmel sonuçlar gösterdiği bilinmektedir (Ma ve ark., 2009; Khan ve ark., 2023). Bununla birlikte PAN, genellikle solunum cihazları için bir filtre membranı olması, iyi filtrasyon özellikleri, biyouyumluluğu ve havadaki bakteri ve virüslerin etkili izolasyonu ile bir yara örtüsü olarak kullanılan tipik bir polar polimerdir, bu da onu bir yara örtüsü olarak uygun hale getirmektedir (Chen ve ark., 2022).

Poliakrolinitril nanofiberler tek başına kullanılabilirken karbon nanolif oluşumu içinde de kullanılabilir. Aynı şekilde enerji depolamak için kullanılan iyon pillerinin içerisinde de anot tabakası olarak kullanılabilirler. Kendisine karşı hareketsiz yapı gösterirken kimyasal ortamlarda filtrasyon amacıyla kullanılabilen PAN nanoliflerinin içerisine farklı nanoparçacıklar eklenerek uygulama çeşitliliği artırılabilir (AYKUT, 2013; Çunayev, 2021).

PAN'ın çok yönlülüğü ve elektroegirme kolaylığı, çalışmalar için ideal bir seçim haline getirmiştir (Khan ve ark., 2023).

NANOFİBER KARAKTERİZASYONU İÇİN KULLANILAN CİHAZLAR

TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM)

Nanofiberlerin; fiber çapı, fiber oryantasyonu, gözenek boyutları ve gözenek dağılımları gibi temel özelliklerini değerlendirmede kullanılan Taramalı elektron mikroskobu (SEM), ışık kullanmak yerine elektron kullanarak fiber görüntüsünün farklı oranlarda büyütülmesini sağlayan bir cihazdır (Bayğu, 2020; Odularu, 2022). Bu cihaz ile elektron ışını, bir elektron demetinin mikroskobun üstünde bir elektron demeti üretmesi ile vakum içinde bulunan mikroskop içinde dikey bir yol izler. Işın, merceklelerden geçip bir numuneye çarparak, elektronların ve X-ışınlarının numuneden dışarı atılmasını sağlar. Atılan bu X-ışınları dedektörler tarafından, geri saçılan elektronlar ile ikincil elektronların toplanmasıyla ekrana gönderilip sinyale dönüştürülerek yüzeyin son görüntüsünü oluştururlar. SEM de bir görüntü oluşturmak için elektron kullanıldığı için ve burada vakum koşullarından etkilendiğinden her numunenin kendi özelliklerine göre hazırlıklar yapılmalıdır.

Vakum içindeki su buharlaşacağından numune etrafında su olmamalıdır. Tüm metallerin iletken özelliğe sahip olması durumunda kullanım öncesinde herhangi bir ön hazırlık gerekmezken, metal olmayan tüm malzemelerin kullanım öncesinde ince bir iletken malzeme tabakası olan püskürtme kaplayıcı ile kaplanması gerekir (Bayğu, 2020). SEM in numune üzerine elektron ışınını bombardıman etmesi sonucunda elektronlar numunenin yüzeyindeki atomlardan çıkarak oluşan elektron boşluklarını daha yüksek enerjili elektronlar ile doldururlar. Elektronların bu iki farklı seviyedeki enerji değerlerinin dengelenmesi için numuneden bir X-ışını yayılır (Bayğu, 2020). Numuneden yayılan bu X ışınlarının enerjisi keV mertebesinde. Böylelikle numuneye çarpan elektron, numunedeki atomun iç yörüngesinde bulunan bir elektronu koparır ve bir üst yörüngede bulunan elektron bu seviyeye geçerken bir X ışını yayar. Bu ışın o numunenin karakteristik X ışını olarak adlandırılır. Her atoma özel enerji değerine sahip olarak ortaya çıkan karakteristik X ışını, SEM’ de incelenen numunenin element değerlerinin nitel ve nicel olarak tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylelikle SEM görüntüleri bize NP’ların şekil, büyüklük ve dağılımı hakkında net bilgi sağlamış olur.

Burada SEM görüntülerini yorumlarken görüntüleme tekniği ile ilişkili dikkat edilecek unsurlar olup bu unsurlar şu şekildedir;

*SEM de yapılan yüksek büyütme oranındaki incelemelerde parçacıkların etrafında bir ışık halkası olması nedeniyle parçacıklar olduğundan daha büyük görülebilir.

* 10 nm nin altındaki parçacıkların gözlenmesinin zor olmasından dolayı çoğu zaman bu küçük parçacıkları görüntülemek mümkün olmayabilir.

* Görüntüler, tüm alanını ölçülmesi yerine sadece belirli bir alanı temsil etmektedir(Sekmen, 2019).

Özetle, yüzey görüntüsünü gösteren sabit ekran boyutu ve numune üstündeki PE tarama alanının boyutu arasındaki oran bize SEM büyütme oranını verir. Bunun anlamı; daha düşük bir tarama ve demet çapının varlığında daha yüksek bir büyütme oranının elde edilmesi demektir. SEM ile yapılan büyütmelemlerin, optik mikroskoplar yardımıyla gözlenecek değerlerden daha yüksek olmasının sebebi elektronların dalga-parçacık ikiliği özelliği ile görünür ışığın dalga boyunun kırılma limitinin maksimum çözünürlük sınırını büyük ölçüde geçmesidir. Günümüzde SEM ile iyi yapılandırılmış elektron tabancası kaynağı, elektron optikleri ve algılayıcıları tarafından 1nm çözünürlüklü 10 kattan 1 milyon kata kadar beş adet büyütme derecesine ulaşılabilinmektedir (Ersöz ve ark., 2018b).

FTIR (Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi)

Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR), IR ışınların moleküllerle etkileşime girerek bu ışınları absorbe etmesi sonucu titreşim ve dönme enerji düzeylerindeki uyarılmaların ölçülmesini sağlayan bir cihazdır. Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisini üstün kılan özellikler; sinyal/görüntü oranlarının yüksek olması, bütün elementlerinin sinyallerinin dedektöre aynı zamanda gelmesi, ayırım güçlerinin büyük ve dalga boyu tekrarlanabilirliğinin etkili olmasıdır (Sekmen, 2019).

IR spektroskopisinin amacı herhangi bir bileşiğin yapısı ile ilgili fikir edinmek veya yapısındaki değişiklikleri izleyebilmektir. Bileşikten alınan IR spektrumu sayesinde yapıdaki bağların durumu ve bağlanma yerleri hakkında bilgi edinilebilmektedir (Bayğu, 2020).

ÇEKME DENEYİ

Çekme deneyi, kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde etkili bir yöntem olmakla birlikte deneyin gerçekleştirilmesinde kullanılan makina yardımıyla malzemedeki çekme uzaması, kopma uzaması, çekme ve kopma mukavemeti değerlerinin okunması ve hesaplanmasında tercih edilen bir tekniktir (Kurtuluş, 2010). Aynı zamanda çekme, ciddi şekilde deforme olabilen ancak yine de çekme sırasında ortaya çıkan gerilimlere dayanabilecek kadar yapışkan olan viskoelastik bir malzeme gerektiren işlemdir (Maliszewska ve Czapka, 2022).

Çekme testinin yapılabilmesi için öncelikle numune hazırlığı yapılmalıdır. Bunun için uygun bir numune hazırlandıktan sonra numune, genellikle standart boyutlarda ve belirli bir şekilde kesilir. Numunenin şekli ve boyutları, test standartlarına ve belirlenen gereksinimlere uygun biçimde olmalıdır. Sonrasında numune, çekme testi makinesinin kelepçelerine veya penslerine monte edilmektedir. Sabit bir tutma bölgesi ve test bölgesi arasında yerleştirilen numunenin doğru bir şekilde yerleştirilmesi ve tutturulması, güvenilir sonuçlar elde etmek açısından önemlidir. Bu esnada çekme testi makinesi, uygun yük aralığı ve hızıyla ayarlanır. Bu ayarlar, numunenin mekanik özelliklerini doğru bir şekilde değerlendirilmesinde önemlidir. Test hızı genellikle belirli bir oranda (örneğin, mm/dakika) kontrol edilmektedir. Test başladığında, çekme testi makinesi numuneye bir yük uygular. Uygulanan bu yük, numunenin uzama ve gerilme sürecini oluşturur. Numune, yavaş yavaş gerilmeye başlar ve yük arttıkça uzamaya devam eder. Numunenin bu gerilme davranışı, yük-uzama eğrisi olarak kaydedilmektedir. Çekme testi sırasında, numunenin üzerine uygulanan yükü ve numunenin uzama miktarını ölçen test makinesinin kaydettiği veriler, gerilme-uzama eğrisini çıkarmak için kullanılmaktadır. Bu eğri bize, numunenin gerilme, gerinim, elastik sınır, akma mukavemeti, kopma mukavemeti ve uzama gibi mekanik özelliklerini göstermektedir. Son olarak çekme testinin tamamlanmasının ardından, elde edilen veriler analiz edilerek sonuçlar çıkarılmaktadır. Böylelikle numunenin gerilme-uzama eğrisi, malzemenin mukavemet, esneklik, kırılma davranışı ve diğer mekanik özellikleri hakkında bilgi sağlamış olur. Çekme testi, malzeme mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olmakla birlikte malzemelerin tasarımı, kalite kontrolü ve performans değerlendirmesi için önemlidir. Ayrıca elde ettiğimiz eğrinin altında kalan alan bize malzemenin tokluk enerjisini verip, bu enerji miktarı darbe dayanımı için gerekli olan enerjidir (CAMCI, 2023).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

(Merugu ve ark., 2022) yılında NP'ların ve nano desenli yüzeylerin biyomedikal kullanımlarının yanı sıra, canlılarla temas halindeyken tepkilerini düzenleyen yüzey özellikleri ve değişimlerini araştırmaya yönelik çalışmada nanoparçacıklardan oluşan elektroëirilmiş nanofiberlerin ameliyat sonrasında cilt kanserini iyileştirme ve cilt dokusunu yenileme de kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir. Manyetik nanoparçacıklar, sağlıklı dokulara zarar vermeden tümör hücrelerini yok eden alternatif bir manyetik alanda tetiklendiğinde ısı üretmektedirler. NP'ların bir organizmanın hücre yüzeyi ile doğrudan teması, hücre zarına zarar verdiğinden güvenli kullanım için NP'ların toksisitesinin daha fazla araştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

(Franco-Molina ve ark., 2010) gümüşün meme kanseri hücreleri üzerindeki uygulamasını incelerken kolloidal gümüş NP'ların öldürücü bir etkiye sahip olup olmadığını görmek için MCF-7 kanser hücreleri kültürleyerek farklı dozlarda kullanmışlardır. Bulgular, kolloidal gümüşün bir insan meme kanseri hücre tipinde bulunan doza bağlı olarak sitotoksik etki sağladığını göstermiştir.

(May ve ark., 2022) gümüş pansuman kullanımının retrospektif inceleme çalışmasında toplam pansuman sayısını azaldığı ve enfeksiyon seviyesinin azalmasıyla daha hızlı iyileşme görülerek tedavi maliyetlerindeki azalmaya dikkat çekilmiştir.

(Ren ve ark., 2005) Ag Np' lerin biyosensörler üzerinde mevcut tepkisini araştırmışlar ve Ag Np'lerin elektron transferini hızlandırıcı etki gösterdiğini, bunun biyosensörün hassasiyetinde 3 kat daha artış sağladığını göstermişlerdir.

(Doğaroğlu ve Köleli, 2014) titanyum dioksit nanopartikülünün buğday çimlenmesine etkisi başlıklı çalışmada tohumlarda çimlenme, kök, gövde ve boy uzamasına etkilerini araştırmışlardır. Yapılan bu araştırmada düşük miktarda kullanılan titanyum dioksit nanopartiküllerinin buğdayın kök uzamasını artırıcı etki gösterirken daha yüksek miktardaki kullanımda ise gövde boyunda uzamanın artması şeklinde etki ettiği gözlenmiştir.

(Tilaki ve ark., 2006) Laser dalga boyunun etkisini ve gümüş parçacık üzerine etkileyen güç-boyut dağılımını incelemişlerdir. Yapılan incelede ortalama parçacık büyüklüğünün dalga boyunun artması ile laser gücünün belirleyici olduğu görülmüştür. Laser gücünün artırılması ile parçacıkların daha heterojen bir yapıya sahip olduğu ve daha küresel bir şekil aldığı gözlenmiştir.

(Bayram) sıvı içerisinde Darbeli Laser Ablasyonu yöntemi ile altın nano parçacıklar üretilip bunların optik ve yapısal özelliklerini incelemiştir. Nano saniye Darbeli Laser Ablasyon kullanılarak deiyonize su içinde bir buçuk saat sürede aynı şartlarda, tekrar üretim yapılmıştır. Üretilen nanomalzeme'nin nanotıp başta olmak üzere hastalıkların tedavi ve teşhislerinde kullanılabileceği, ayrıca bir çok farklı alanda kullanılabileceği kanısına varılmıştır.

(Zhou ve ark., 2017), fotokatalitik bozunmada kullanılan Ag/TiO₂ kompozit NP'ların üretiminde Darbeli laser ablasyonun başarılı bir yöntem olduğunu savunmuşlardır. Ag NP'larının TiO₂ fotokatalitik aktivitesini arttırdığını gözlemlemişlerdir. TiO₂ NP'larının sentezini, 1064 nm 100 ns parametrelerinde laser ablasyon ile gerçekleştirmişlerdir. Sentezlenen Ag/TiO₂'in mikroyapısı ve yüzey durumu incelendiğinde, TiO₂ NP'larının yüzeyinde biriken gümüş kümelerinin bulunduğunu düşündürmüştür.

(Boutinguiza ve ark., 2015) gümüş NP'ların üretimi ve bunları cam yüzeyler üzerinde toplamak amaçlı yapılan çalışmada açık hava koşullarında laser ablasyon yöntemi kullanılarak elde ettikleri NP'ların birkaç ila 50 nm arasında değişen, yuvarlak, dar boyutlu dağılıma sahip oldukları görmüşlerdir.

(Kim ve ark., 2014) yaptıkları çalışmada sıvı laser ablasyon yoluyla Paladyum NP'ları elde ettiler. Elde edilen NP'ların boyutunun ve morfolojisinin laserin dalga boyuna ve akıcılığına bağlı olduğunu saptayarak daha düşük dalga boyu ve akıcılıkta, daha küçük boyutlarda (3-6 nm) nanoparçacık oluştuğu sonucuna varmışlardır.

PLAL'in, çeşitli uygulamalar için kullanılabilecek NP'lerin boyutunu kontrolünün sağlanmasında etkili bir yöntem olduğunu savunan (Hasan ve ark., 2023) gümüş NP'larının (Ag NP'lar) başarılı bir şekilde sentezlemesinde sıvı (PLAL) tekniği ile darbeli laser ablasyonu kullanmışlardır. Laser akışının ve Ag NP konsantrasyonunun bakteriyel patojenik üzerindeki etkisi üzerine yapılan araştırmada G- ve G+ bakterileri için sırasıyla 21,66 mm ve 19,66 mm'lik inhibisyon bölgeleriyle Gram-negatif bakterilerin Gram-pozitif bakterilerden daha az etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

(Guisbiers ve ark., 2014) sıvılarda darbeli laser ablasyon (PLAL) yoluyla sentezi ve fotovoltaiik veya biyolojik uygulamalar için kullanılabilen çok saf selenyum nanopartiküllerinin ve kuantum noktalarının karakterizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada selenyum tozunu; 1064 nm'de yakın kızılötesi dalga boyu (temel ışın, λ), 532 nm'de görünür dalga boyu (ikinci harmonik ışın, $\lambda/2$) ve ultraviyole kullanarak üç farklı dalga boyunda ışınladılar. Çalışma sonucunda selenyum nanopartiküllerinin biyomedikal uygulamalar için kullanılabildiği ve selenyum kuantum noktalarının

ise örneğin kuantum nokta güneş pilleri gibi optoelektronik uygulamalar için kullanılabilir olduğu kanısına varmışlardır.

(Evcin ve ark., 2019) gümüş katkılı karbon nanofiberleri PAN polimerlerinden elektro-eğirmiştir. Elektro-eğirme parametrelerini 25 kV voltaj, 1 mL/sa akış hızı, 6 cm iğne-toplayıcı arasındaki mesafe olarak belirlemiş ve Ag katkılı PAN nanolifleri, 250 °C'de 1 saat stabilize etmiştir. Oluşan fiberlerin çap dağılımı ve morfolojilerini taramalı elektron mikroskop ile gözlemlemiştir. Elektro-eğirme yöntemiyle Ag katkılı PAN bazlı karbon nanoliflerin başarıyla üretilmesi sonucunda liflerin homojen çaplarda sürekli olduğu ve lif içerisinde homojen olarak dağıldığı SEM analizleriyle doğrulanmıştır. Karbonizasyon sonucu elde edilen kararlı fiberlerin ortalama çapının 174 nm olduğu tespit edilmiştir.

(Süslü, 2009) elektro-eğirme metodu ile üretilen PAN nanofiberlere ısı işlemleri uygulayarak karbon nanofiberler elde etmiştir. Yine elektro-eğirme yöntemi ile üretilen TiO₂ fiberlerin oluşumunda yalnızca titanyum ve oksijenin bulunduğu ve yapı incelemeleri sonucu anataz ve rutilden oluştuğu belirlenerek üretilen nanofiber çaplarının 50 ile 150nm boyutları arasında bir dağılım gösterdiği gözlenmiştir.

(Gilik ve Avcı, 2021) biyobozunur polimerden biri olan PLGA yı tarçınla enkapsüle edilmiş gümüş nanoparçacık (eAg NP) ilavesi ile nanofiber üretimi gerçekleştirmiştir. eAg NP'lerin üretilmesinde yeşil sentez yöntemini kullanıp elektro-eğirme cihazı ile üretilen nanofiberlerin morfolojik, mekanik, antibakteriyel, biyobozunurluk özelliklerini incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda ortalama 116 nm çap uzunluğuna sahip, katkısız PLGA'ya göre daha iyi mukavemet gösteren ve antibakteriyel etkinin fazla olduğu nanofiberler elde ederek , yara iyileştirme çalışmalarında umut vaat edici bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

(Doh ve ark., 2008) Elektrospinning yöntemini kullanarak organik kirleticilerin arıtımı için fotokatalitik TiO₂ nanolifleri geliştirerek elektrospinning koşullarının (elektrik alanı ve akış hızı) 0,9 kV cm⁻¹ ve 50 µL dk⁻¹ olduğunu bulmuşlardır . 550 °C'de 30 dakika sonrasında anataz kristal fazlı TiO₂ nanofiberleri (ortalama 236 nm kalınlıkta) üretilmiştir. Fotokatalitik aktivitenin artırılması ve etkin yüzey alanının artırılması amacıyla fotokatalitik TiO₂ parçacıklarını TiO₂ nanofiberleri üzerine sol-jel yöntemini kullanarak kaplamışlar ve nanolifler ve nanopartiküllerden oluşan kompozitinin organik kirleticilerin parçalanması için uygun olduğunu önermişlerdir.

(Rivera-Chaverra ve ark., 2020) laser ablasyon tekniği kullanılarak üretilen demir oksit nanopartikülleri, manyetik hipertermide olası uygulamalar için bu nanopartiküllerin

lazer enerjisinin bir fonksiyonu olarak özelliklerini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada 90, 173, 279 ve 370 mJ değerlerinde laserin gücünü değiştirerek nanopartiküller elde ettiler. Sonuçlar Demir oksit NP'lerin sıcaklık artışının, manyetik hipertermi ölçümlerindeki enerji değişiminden büyük ölçüde etkilenmediğini, hipertermi uygulamaları için düşük lazer enerjisinin daha iyi olduğunu göstermiştir.

(Giorgetti ve ark., 2012) 1064/532 nm dalga boylarında LAL tekniğini kullanarak saf asetonadaki kararlı Au NP'ların sentezini inceledikleri çalışmada parçacık boyutunun 532 nm'de ablasyon ile 2–3 nm olduğunu gözlemlemişlerdir.

(Hosseini ve Mozafari, 2020) seryum oksit nanopartiküllerinin (CeONP'ler; nanoserya), in vitro ve in vivo reaktif türleri temizleme, inflamasyonu baskılama, sitokin seviyelerini hafifletme yetenekleri nedeniyle tasarlanmış dokular üzerinde nasıl anti-inflamatuar etki gösterme potansiyeline sahip olduğuna dair bilgiler sağlamak amacıyla yaptıkları çalışmada CeONP'lerin reaktif türlerin neden olduğu farklı bozuklukların iyileştirilmesi için kullanılabileceğine ve CeONP'lerin doku mühendisliği açısından ümit verici olduğuna dikkat çekmişlerdir. Çünkü bu malzemelerin kök hücre farklılaşması ve anjiyogenez eylemlerinde sinyal yollarını tetikleyen başlatıcılar olarak hareket ettiğini belirtmişlerdir.

(Chen ve ark., 2022) yara iyileştirilmesinde kullanılması amacıyla elektroğirme yöntemiyle poliakrilonitril (PAN) yüklü AgNP'lerden oluşan nanofiberler ürettiriler PAN yüklü fiberlerin daha iyi hidrofilik antimikrobiyal özellikler sergilediğini gözlemlediler.

(Wang ve ark., 2020) elektroğirme yöntemi kullanılarak yüksek verimli PAN bazlı Ag/TiO₂ kompozit nanofiberler hazırladılar. Karakterizasyon çalışmaları sonucu, ortalama çapı 160 ila 260 nm arasında değişen tek biçimli ve pürüzsüz nano lifleri oluştuğunu gözlemlediler. Görünür ışık ışınlamı altında PAN/Ag/ TiO₂ nanofiberleri ile karşılaştırıldığında PAN /Ag/ TiO₂'nin artan fotokatalitik aktivitesinin, Ag varlığından dolayı yüksek arayüzey yük aktarımına ve düşük bant aralığına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

(Dell'Aglia ve ark., 2015) PLAL (Sıvıda Darbeli Lazer Ablasyonu) ile NP oluşumu sırasında meydana gelen temel süreçler, optik emisyon spektroskopisi, gölge grafiği, lazer saçılma görüntüleme ve DP-LAL (Çift Darbeli Lazer Ablasyonu) gibi farklı zamanla çözümlenen teşhis teknikleri uygulayarak yaptıkları çalışmada NP'ların PLAL işleminin ilk aşamasında, yani plazmanın soğutulması sırasında üretildiğini gözlemlemişlerdir.

(Liu ve ark., 2017) önceden hazırlanmış Ag nanopartikülleri (NP'lar) PVA çözeltisi içinde dağıttı ve bu nanofiber matların, Gram-pozitif *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ve Gram-negatif *Escherichia coli* (*E. coli*) mikroorganizmaların her ikisine karşı iyi antibakteriyel aktiviteler gösterdiğini rapor etmişlerdir.

(Ma ve ark., 2016) saf TiO_2 ve Ag/TiO_2 nanofiberlerini elektroğirme tekniği kullanarak sentezlediler. Ag ilavesi ile TiO_2 nanofiberlerinin morfolojisi ve kristal yapısı üzerindeki etkilerine yönelik araştırmada. Sonuçlar, Ag'nin varlığının, TiO_2 nanofiberlerinin morfolojisi ve kristal yapıları üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve anatazdan rutile faz dönüşümünü destekleyebileceğini gözlemlemişlerdir. Ag/TiO_2 nanofiberlerinin , saf TiO_2 nanofiberleriyle karşılaştırıldığında daha güçlü hassasiyet ve daha iyi seçicilik sergilediğini ortaya koymuşlardır.

(Tański ve ark., 2017) TiO_2 NP'larını sol-jel yöntemi kullanılarak elde edip parçacıkların yapısını analiz etmek için X-ışını kırınım analizi (XRD) ve enerji dağılımlı spektrometre (EDS) kullandılar. Üretilen NP'lar ve PAN/DMF/ TiO_2 çözeltisinin elektrospinning yöntemi kullanılarak nanolifli kompozit eşler ürettiler. Elde edilen kompozit nanofiberlerin morfolojisi ve kimyasal bileşiminin analizi içinde EDS'li bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullandılar. Çalışmanın sonunda TiO_2 NP'larının polimerik nanofiberlerin yüzeyinde biriktiğini ve Saf TiO_2 için 400 nm'den daha olan dalga boyuna sahip radyasyon kuantumu için absorpsiyonun keskin kenarı gözlemlendi.

(Gu ve ark., 2005) liflerin morfolojisi ve lif çapının dağılımını, çeşitli konsantrasyonlarda ve uygulanan voltajlara bağlılığına dayalı yaptıkları araştırmada PAN/DMF'nin elektroğirme işlemi gerçekleştirmiş ve elektroğirme koşuluna bağlı olarak üretilen fiber çaplarının 200 nm ile 1200 nm arasında değiştiği görüldü. Burada çözelti konsantrasyonunun fiber çapını etkileyen en önemli faktör olduğu ve uygulanan voltajın ortalama fiber çapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varmışlardır.

3.MALZEME VE YÖNTEM

3.1.Malzemeler

Bu çalışmada, polimer olarak poliakrilonitril, kolajen; metal olarak gümüş, titanyumdioksit ve çözücü olarak dimetilformamid seçilmiştir.

3.1.1.Poliakrilonitril (PAN)

PAN ısıl kararlılık, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve elastikiyet modülü içeren özelliklere sahip olan bir polimerdir. Termoplastik olan PAN normal şartlarda erimez. Bu ayırt edici özellikler sayesinde PAN yüksek teknoloji alanında öneme sahip bir polimer haline gelmiştir (Yiğitol, 2019).

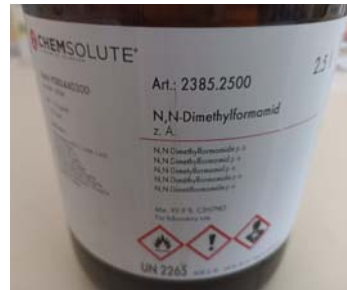
Çalışmada kullanılan Aldrich marka PAN (Poliakrilonitril) polimeri şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1 Çalışmada kullanılan Poliakrilonitril (PAN)

3.1.2.Dimetilformamid (DMF)

Bu tez çalışmasında CHEMSOLUTE firmasından alınan DMF ham malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin saflık değeri % 99.9 ve molekül ağırlığı 73.10 g/mol’dür.



Şekil 3. 2 Çalışmada kullanılan % 99.9 saflıktaki DMF

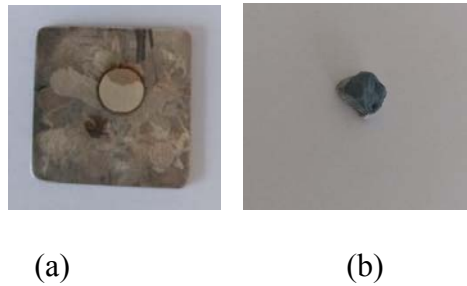
Dimetilformamit malzemesini tercih etmemizin başlıca sebebi çözücü özelliğinin yüksek değere sahip olmasıdır. Bu sayede elektroegirme yönteminde

sıklıkla kullanılan endüstriyel bir kimyasal olan DMF daha çok akrilik fiberler ve poliüretan ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır (Yiğitol, 2019).

3.1.3. Gümüş (Ag) ve Titanyumdioksit (TiO₂)

Bir tür yarı iletken olan nano-titanyum dioksit (nano-TiO₂), güçlü foto-indüklü oksidasyon ve indirgeme özellikleri sayesinde olağanüstü elektriksel, optik ve fotokatalitik davranışlar göstererek güneş ışınımının yalnızca %7'sinin kullanılmasına izin veren geniş bant aralığı (~3,2 eV) ve güneş enerjisiyle çalışan uygulamalar için düşük verimlilik sağlaması nedeni ile yaygın olarak kullanılmaktadır (Ryu ve ark., 2015; Sanzone ve ark., 2018). Bu özellikler sayesinde TiO₂ su ve havanın saflaştırılması, lekelerin önlenmesi ve sterilizasyon gibi çevresel iyileştirme süreçlerinde kullanımı ile fayda sağlamaktadır (Ryu ve ark., 2015). Nano-TiO₂, ultraviyole ışık altında mükemmel bir katalitik aktivite gösterirken, çevrenin iyileştirilmesi ve fotokatalitik enerji üretiminde stratejik öneme sahiptir. Fakat saf nano-TiO₂ uygulamaları ultraviyole uyarımın (<400 nm) durumuna bağlı olması nedeniyle, görünür ışığın kullanımını geliştirmek amacıyla gümüş NP'lar (Ag NP'lar) sıklıkla nano-TiO₂ (Ag/TiO₂ nanohibritleri) üzerine yüklenmektedir. Bu yükleme işlemi; kimyasal indirgeme, çökeltme, foto biriktirme ve hidrotermal gibi farklı yöntemlerle yapılmaktadır (Huang ve ark., 2024).

TiO₂ yaygın olarak düşük toksik bir metalik oksit olarak kabul edilse de gümüş yükleme sonrasında TiO₂ güvenliğine daha fazla dikkat edilmelidir çünkü Ag NP'ların genellikle nano TiO₂'den daha toksik olduğu bilinmektedir (Huang ve ark., 2023).



Şekil 3. 3 Çalışmada kullanılan (a) Ag, (b) TiO₂

3.1.4. Kolajen

“Biyolojik malzemelerin çeliği” olarak adlandırılan kolajen doğada birçok formda bulunmaktadır (Sherman ve ark., 2015). Kemik, deri ve bağ dokularında bulunan tip I kolajen; en bol bulunan kolajen olmakla birlikte, aynı zamanda doku bütünlüğü için de gereklidir. Toplam protein miktarının %80'ini ve toplam kollajen miktarının %95'ini oluşturan tip I kollajen,; kemikte bulunan kollajen açısından en zengin dokudur (Henriksen ve Karsdal, 2024).



Şekil 3. 4 Çalışmada kullanılan Kolajen

LASER ÇALIŞMA PRENSİBİ

Yoğun ışık demetinden oluşan laserlerin en önemli özelliği, elektromanyetik spektrumun görülebilen, kızılötesi veya morötesi bölgelerinde (Kars, 2022), ışığın yükseltgenmesi ile oluşan koherent (eş fazlı), tek frekanslı, yönlendirilebilir (tek renkli) ve yüksek şiddetli elektromanyetik foton demeti üretebilen aletler olmalarıdır (Gündoğdu ve ark., 2024). Oluşturulan optik yapıdaki malzemenin türüne göre (Kars, 2022) farklılık gösteren laser ile güneşten çok daha şidetli ve güncel olarak 10^{23} watt/cm² a kadar olan oranlarda optik şiddet üretebilmektedir (Akkan, 2009; Gündoğdu ve ark., 2014). Işığın üretildiği ortama göre katı, sıvı, gaz ve yarı iletken laserler olarak sınıflandırılan laserler, ışığın laserden çıkış şekline göre ise kenar veya yüzey ışımalı, çıkan ışığın sürekli veya puls formunda oluşuna göre de sürekli veya pulslu laserler olmak üzere gruplara ayrılmaktadırlar (Kars, 2022). Geçmişten günümüze kadar

uzanan farklı uygulamalar için geliştirilmiş çok çeşitli laser türü olmasına rağmen bunların tümünün temel çalışma prensibi aynıdır (Karanfil, 2023). Elektron yerleşim düzeni atom yapısına göre farklı olan her elementin atomları kendine has kararlı bir yörüngeye sahiptir. Bu yörüngelerde kararlı halde bulunan elektronların, dışarıdan bir enerji tarafından uyarılıp bir üst enerji seviyesine çıkarılması ve sonrasında tekrar eski kararlı konumuna dönmesi esnasında, verilen enerjinin tekrar dışarı verilmesi laserin çalışma prensibini açıklar (EKSİLMEZ, 2021). Bu işlem sonucunda tek bir dalga boyuna sahip, tek bir doğrultuda ilerleyen ve aynı fazda hareket eden yeni bir ışın demeti elde edilir (Kars, 2022). Laser ışınlarının elde edilmesi için; radyasyonun emisyon oluşumunu sağlayan aktif bir ortam(katı, sıvı, gaz), enerji kaynağı, rezonans aynalar ve fiber optik bir iletken gereklidir (Kars, 2022).

Laser demetinin hemen hemen paralel fotonlardan oluşması, yani yönlendirilebilir olması özelliği sayesinde aynalar aracılığıyla bir noktadan başka bir noktaya taşınması esnasında hiç bir değişikliğe veya formunda herhangi bir bozulmaya uğramamaktadır (Akkan, 2009).

Laboratuvar Ortamında Kullanılan Cihazlar

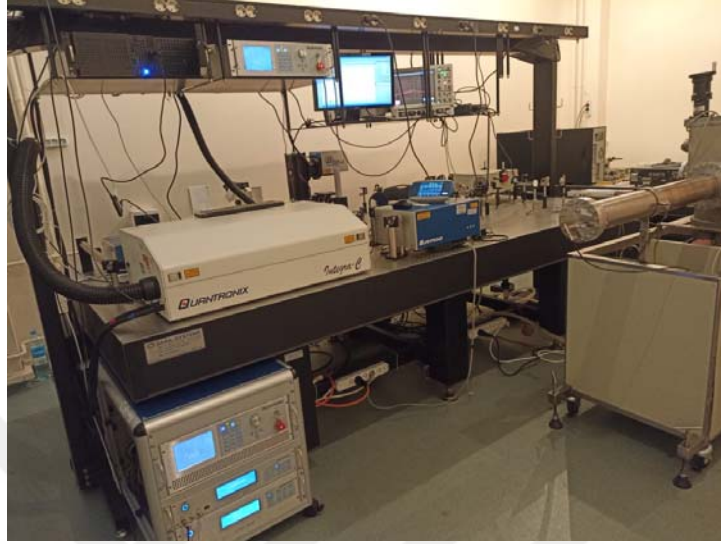
Femtosaniye Laser Sistemi

Çalışmada Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin hızlı laser laboratuvarında bulunan femtosaniye laser sistemi kullanılmıştır. Femtosaniye laser Ti-light laser (Quantronix) tarafından pompalanan, amplifier (Quntronix Integra-C) ile çıkışında 800 nm temel dalgaboyunda 90 fs süreli (FWHM) laser pulsları, puls başına 3,5 mJ enerji üretebilen ve bu 1-3 kHz oranında tekrarlama kabiliyetine sahip yüksek güçlü ve aşırı hızlı bir laser sistemidir. Laser sistemi tarafından üretilen laser demeti 8 mm çapına sahiptir.

Laserin puls enerjisi istenilen ölçekte kontrol edilebilmekte ve laser çıkış gücü/enerjisi, bir güç ölçer ve Gentec marka UP19K-30H-W5-D0 serisi bir güç dedektörü ile belirlenmektedir. Sistem kurulumunda yüksek güç laser demeti durumuna uygun optikler (lens, ayna) bulunmaktadır (Gündoğdu ve ark., 2014; Kiliç ve Durmuş, 2016).

Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği, bir optik masanın üzerine kurulu laser, optik dizayn (lens, ayna), osiloskop, dedektör, mikroişleme sistemi ve bilgisayardan

oluşmaktadır (Gündoğdu ve ark., 2014). Çalışmada kullanılan laser ablasyon deney düzeneği şekil 3.5 de verilmiştir.



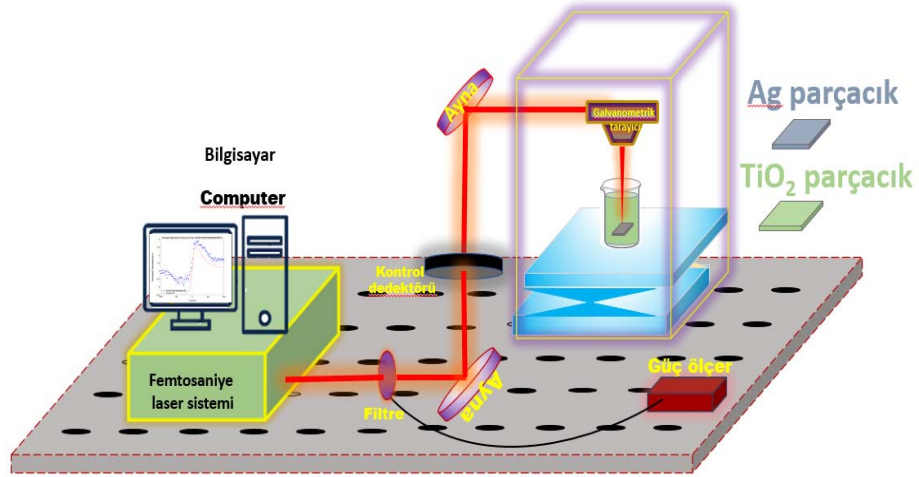
Şekil 3. 5 Femtosaniye laser sistemi

Malzeme üretimi

Laser ablasyon ile nanoparçacık üretimi

Üretim düzeneğinde bulunan kaba DMF konularak numuneler (gümüş ve TiO_2) sıvı içine ayrı ayrı bırakıldı. Gönderilen laser ışınları ile numune parçalanmaya başladı. Parçalara ayrılmış bu numuneler tekrar eden laser ışınları tarafından daha da küçük parçacıklar haline getirildi. Üretim düzeneğinde kullanılan deney sistemi şekil 3.6 da gösterilmiştir.

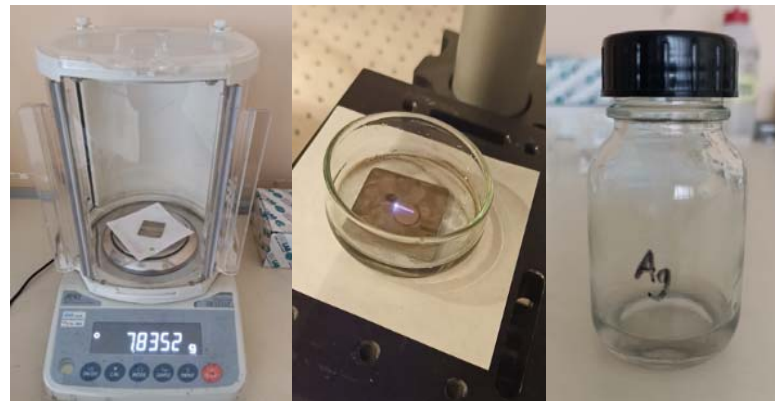
NP üretimin Darbeli Laser Ablasyonu tekniği kullanılarak yapıldığı ortam sıcaklığı 17°C de ölçülmüştür.



Şekil 3. 6 Gümüş ve TiO₂ NP'larının üretiminde kullanılan deney düzeneği

Ag Nanoparçacık

İlk olarak gümüş parçacık hassas teraziye konulup ölçüm alındı. Cam petri kabına şırınga yardımı ile 6 ml DMF ve içerisine tartılan gümüş tablet konuldu. Femtosaniye Laser sisteminin odak uzunluğu 11 cm olarak ayarlandı. 600 mW laser gücünde 0,8 cm çapında laser üretilip mekanizma içerisindeki aynalar ve mercek yardımıyla 70 mikrona kadar odaklandı ve 1 saat boyunca tablet üzerinden nanoparçacık üretildi. Laser ablasyon sonrasında yaklaşık 150 µg seviyesinde Ag nanoparçacık üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 7 Ag nanoparçacık üretimi

TiO₂ Nanoparçacık

Ag NP üretimi için takip edilen benzer işlemler TiO₂ için tekrarlandı. DMF çözeltisi içerisine konulan TiO₂, Ag ile aynı şartlardaki laser sistemde TiO₂ NP oluşumu gerçekleştirildi. Laser ablasyon sonrasında yaklaşık 154 µg seviyesinde TiO₂ nanoparçacık üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 8 TiO₂ nanoparçacık üretimi

PAN Çözeltilerinin Hazırlanması

PAN çözeltisi (ağırlıkça %5) 25 mL'lik bir beher kullanılarak ürettiğimiz Ag ve TiO₂ NP'ları 6 mL çözücü (DMF) içerisine ayrı ayrı 0.32 g PAN eklenerek 56 °C derecede 240 rpm hızında manyetik karıştırıcıda karıştırıldı ve bekletildi. Karıştırma işleminden sonra çözelti, hava kabarcıklarını önlemek amacıyla üzeri parafilm ile kapatılarak 1 gün stabilizasyon için bekletildi.



Şekil 3. 9 PAN çözeltisinin hazırlanması

Farklı bir 25 ml lik beherde 3.6854 gr DMF + Ag ve 3.6011 gr DMF + TiO₂ NP'ları karıştırılıp PAN çözeltisi (ağırlıkça %5) 0.36 gr ilave edilerek üzeri parafilm ile kapatılıp 56 °C derecede 240 rpm hızında manyetik karıştırıcıda homojen olana kadar karıştırıldı.



Şekil 3. 10 Hazırlanan Ag, TiO₂ NP'ları ve PAN karışımı

Kolajen etkisinin gözlemlenmesi amacıyla 6 ml DMF içerisine 0.0417 gr kolajen ve PAN çözeltisi (ağırlıkça %5) eklenerek 56 °C sıcaklık şartlarında 240 rpm hızında manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Homojen hale gelen karışım 1 gün bekletildi.

DMF içerisinde üretilmiş Ag, TiO₂ NP'ları ile Kolajenin ve PAN çözeltisi (ağırlıkça %5) eklendi. Burada dmf içerisinde Ag NP'ların kütlesi 3.4078 gr, TiO₂ NP'ların kütlesi 3.6668 gr, kolajenin kütlesi ise 0.0421 gr olarak ölçüldü. 56 °C ısı şartlarında 240 rpm hızında manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Homojen hale gelen karışım 1 gün bekletildi.

Üretmiş olduğumuz Ag, TiO₂, Kolajen, PAN ve DMF'li NP'larından nanofiber üretmek için elektroegirme yöntemi kullanıldı.

Elektroegirme Düzenegi

Elektro-eğirme için uygun polimer çözeltisi hazırlandıktan sonraki bir üst aşama bu çözeltiyi fiber formuna getirmek olacaktır. Nanofiber üretimi oda sıcaklığında, Selçuk Üniversitesi İL TEK B Blok Hızlı Laser Laboratuvarında tarafımızdan kurulan Elektroegirme düzeneginde gerçekleştirilmiştir. Era Pump Systems marka elektro-eğirme cihazı kullanılmış olup bu cihaz 0-10 mL/sa akış hızı ve 0-50 kV voltaj aralığı kapasiteye sahip bir cihazdır. Bu cihaz şırınga pompası, güç kaynağı, toplayıcı ve iğne ucu olmak üzere 4 kısımdan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan cihaz şekil 3.11 ile verilmiştir.



Şekil 3. 11 Polimer besleme ünitesi

Şekil 3.11’de gösterilen polimer besleme ünitesinin kullanım amacı çözeltiyi istenilen debide toplayıcıya iletmektir. Hazırlanmış polimer çözeltisinin toplayıcıya gönderilme debisi nanofiber çaplarının belirlenmesinde etkili olduğundan kullanılacak akışkan debi miktarı son derece önemli bir parametredir.

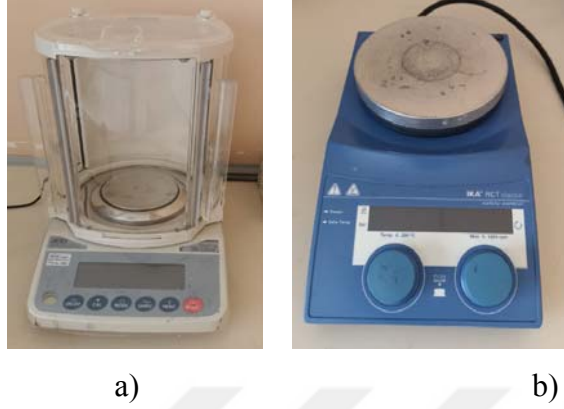
Elektroeğirme yöntemi ile elde edilecek nanofiberler dönen bir toplayıcı üzerinde dağınık ve rasgele bir şekilde konumlandırılmıştır. Dönen plaka üzerine plakanın ölçülerine uygun olarak kesilmiş alüminyum folyo yerleştirilerek oluşan nanofiberlerin bu yüzeyde toplanması sağlanmıştır. Burada alüminyum folyo tercih etme nedenimiz belirli bir mesafede şırınga ucunda bulunan iğne ile toplayıcı plaka arasında yüksek gerilim uygulandığı esnada, büyük bir elektrik alan (yaklaşık 50 000 V/m) oluşumunu sağlamak ve bunu iletmek için de iletken bir malzemeye duyulan ihtiyaçtan dolayıdır.



Şekil 3. 12 Deneyde kullanılan elektroeğirme düzeneği

Laser ablasyon için kullanılacak katı malzemelerin tartımı ile elektroeğirme işleminde kullanılacak polimer katkılı çözeltilerin belirlenen konsantrasyonlarda hazırlanabilmesi için AND HR-250AZ marka hassas terazi (a) kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltilerin manyetik alan etkisi altında homojen hale getirilmesi amacıyla

IKA RCT classic marka manyetik karıştırıcı (b) ve çözücü içindeki gümüş ve TiO_2 NP'ları çözmek için de BANDELIN Sonoplus marka ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 3. 13 Çözeltilerin oranlarının hesaplanmasında kullanılan araçlar

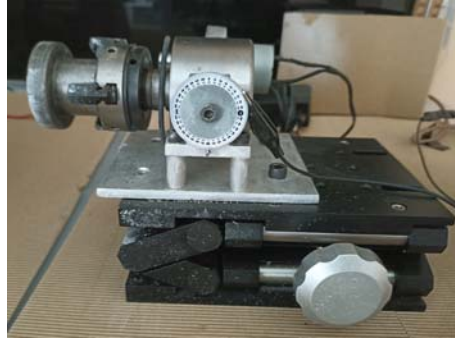
Hazırlanan Ag NP katkılı PAN çözeltisi 20 ml'lik bir şırıngaya (21G 0.80x38 mm 3P) alınmış ve besleme pompasına yerleştirilmiştir.

Elektro eğirme cihazının ana bileşenlerinden olan yüksek voltaj güç kaynağının olduğu kısım şekil 3.14 ile gösterilmektedir. Şırınganın ucunda bulunan düze ve toplayıcı plakaya GLASSMAN HIGH VOLTAGE SERIES EL marka güç kaynağının uçları bağlanarak ikisi arasında elektriksel alan oluşmasını sağlayacak şekilde düzenek kurulmuştur. Kullanılan güç kaynağı maksimum 50 kV'a kadar DC güç kaynağı uygulayabilmektedir.



Şekil 3. 14 Güç Kaynağı

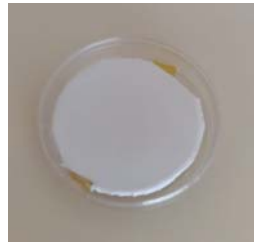
İğne ucu ile toplayıcı plaka arasında elektriksel alanın oluşmasını sağlamak için güç kaynağından gelen kablunun pozitif kutuplu ucu şırınganın iğne ucuna kablunun diğer negatif kutuplu ucu ise toplayıcı plakaya tutturulmuştur. Elektro eğirme cihazının temel bileşeninden olan silindirik forma sahip toplayıcı şekil 3.15'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 15 Silindirik nanofiber toplayıcı

Şekil 3.15 de gösterilen silindirik nanofiber toplayıcının işlevi üzerine yerleştirilen iletken altlığın yüzeyinde homojen dağılıma sahip nanofiber oluşumu sağlamaktır. Silindirik nanofiber toplayıcının işlevini yerine getirmesi için polimer besleme ünitesi ile arasındaki mesafenin uygun olması ve bu iki kısım arasındaki hizalamanın çok dikkatli yapılması gerekmektedir.

Hazırlanmış olan homojen çözelti 21.2° sıcaklığında, elektroğirme düzeneğinde kullanılacak şırıngaya çekilerek 18 kV voltaj, 15 cm mesafe, 0.50 mL/sa akış hız parametrelerinde şekil 3.15’de verilen silindirik döner toplayıcıya yerleştirilen alüminyum folyo üzerine toplanmıştır. İşleme 1 saat boyunca devam edilmiştir. Böylece PAN nanofiberler başarıyla üretilmiştir. Elde edilen fiberler şekil 3.16’da gösterildiği gibi petri kabına konularak stabilizasyon ve karbonizasyon işlemlerinden sonra karakterize edilmiştir.



Şekil 3. 16 Elektroğirme sonucu elde edilen nanofiber

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Analiz için Kullanılan Cihazlar

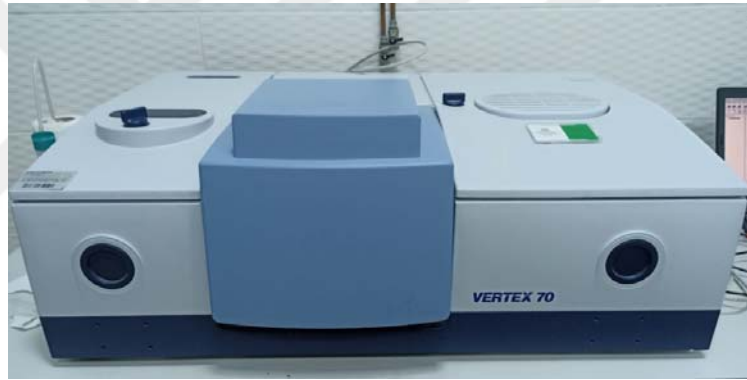
Üretimi yapılan nanofiberlerin yüzey morfolojisinin belirlenmesinde Zeiss Evo LS10 (İLTEK) marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), molekül yapısındaki bağların titreşim frekanslarının ölçümünün yapılarak bu yapıda bulunan fonksiyonel grupların

tespitinde BRUKER / VERTEX 70 marka Fourier Dönüşümlü Kızıl ötesi Spektrometresi (FTIR) cihazı , belirli bir çekme kuvveti altında malzemenin oluşturduğu gerilme mukavemetinin, şeklindeki değişimin ve elastiklik modülü gibi değerlerin tespiti için SHIMADZU AGS-X model çekme test cihazı kullanılmıştır.

4.2. Nanofiberlerin Karakterizasyon Analizleri

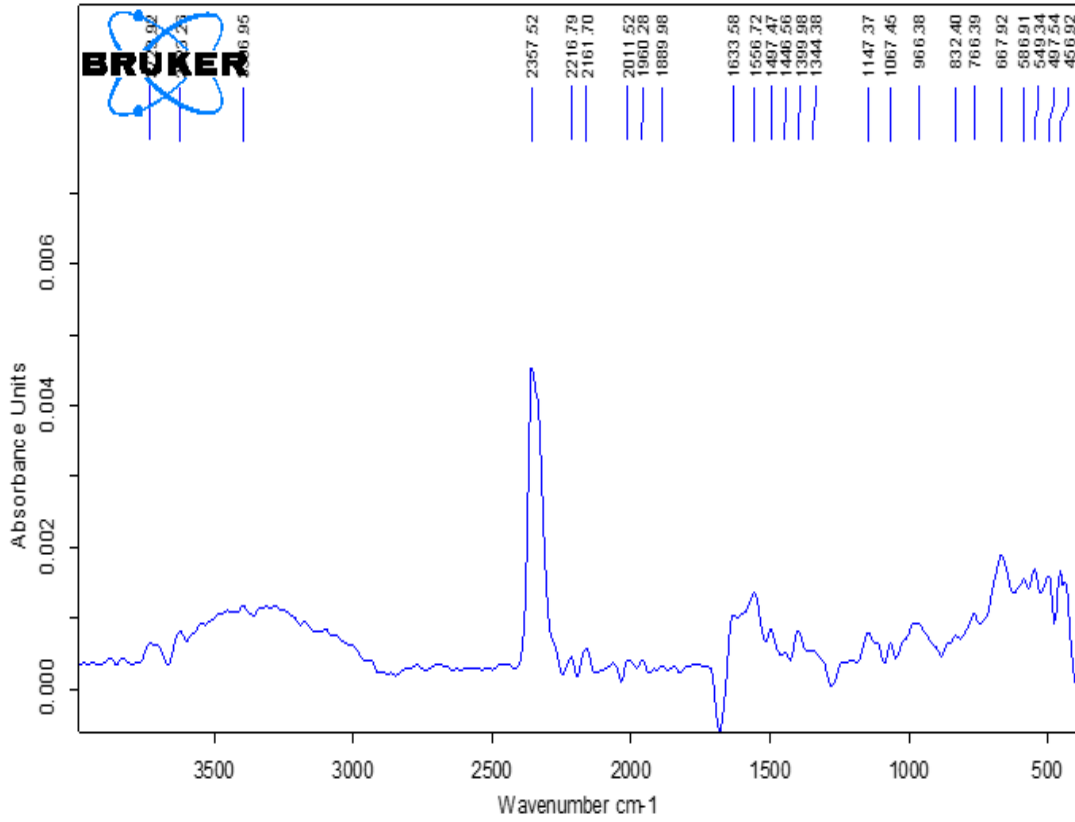
4.2.1. FTIR Görüntü ve Analizleri

Üretilen nanofiberlerin kimyasal yapısını saptamak için Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi'nde BRUKER / VERTEX 70 marka Fourier Dönüşümlü Kızıl ötesi Spektrometresi (FTIR) cihazı kullanılmıştır. Kullanılan bu cihaz şekil 4.1 de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Fourier Dönüşüm Spektrometresi (FTIR) BRUKER / VERTEX 70 Cihazı (SÜ, İLTEK laboratuvar)

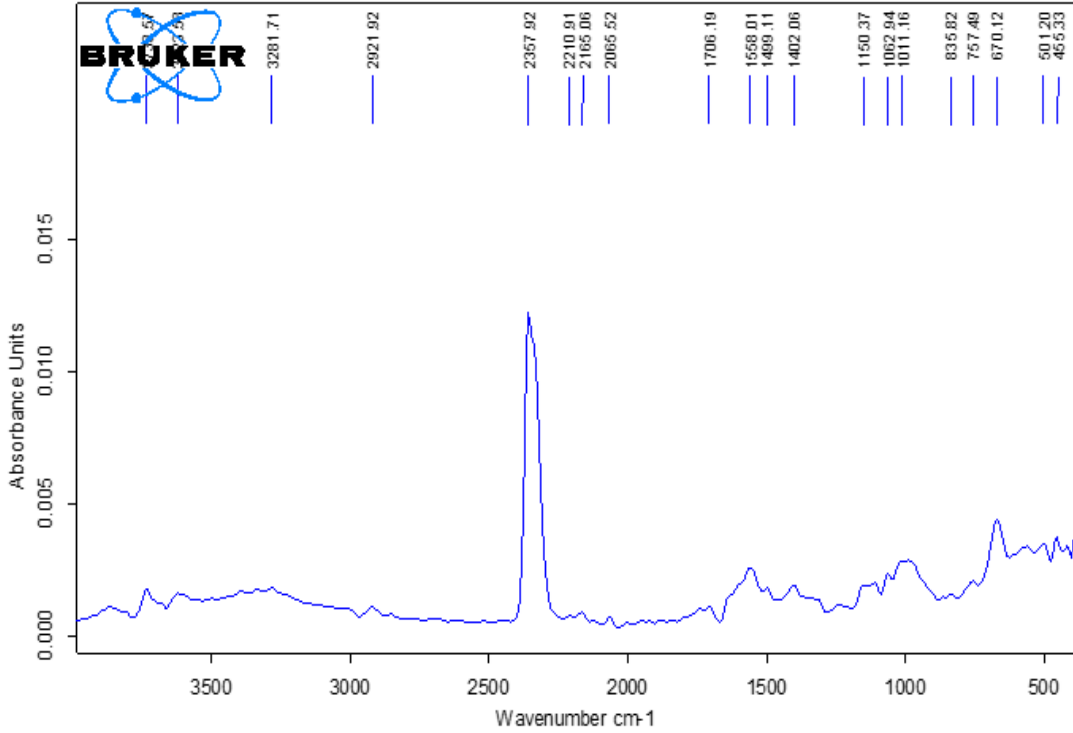
Tez çalışmasında üretilen nanofiber malzemeler için Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi'nde BRUKER / VERTEX 70 marka Fourier Dönüşümlü Kızıl ötesi Spektrometresi (FTIR) ile alınan sonuçlar şekil 4.2, şekil 4.3, şekil 4.4, şekil 4.5, şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.2. TiO₂ NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri

TiO₂ NP'larına %5 PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiberin 400 cm⁻¹ ile 800 cm⁻¹ dalga boyu aralığında ortaya çıkan esneme titreşimleri şekil 4.2. ile verilmektedir. Titanyum anafazını ve 586 cm⁻¹ dalga boyunda ortaya çıkan pikleri gösterirken 667 cm⁻¹ Ti-O'nun gerilme titreşimlerini gösterir. 766 cm⁻¹ dalga boyunda görülen tepe noktaları ise O-Ti-O'nun esneme titreşimlerine işaret etmektedir. 1344 cm⁻¹'de gözlemlenen tepe CH bükülmesinin titreşimlerine karşılık gelir. Bu değerler, safsızlıkların veya reaksiyona girmemiş başlangıç malzemesinin varlığıyla ilişkilidir. Ayrıca 1633 cm⁻¹'de ortaya çıkan esneme titreşimleri Ti-OH bükülmesine bağlanmaktadır. 3363 cm⁻¹'deki esneme titreşimleri, NP'ların yüzeyinde emilen suyun neden olduğu hidroksil grubu (OH) ile ilişkilidir (Akhlaghi Pirposhteh ve ark., 2024)

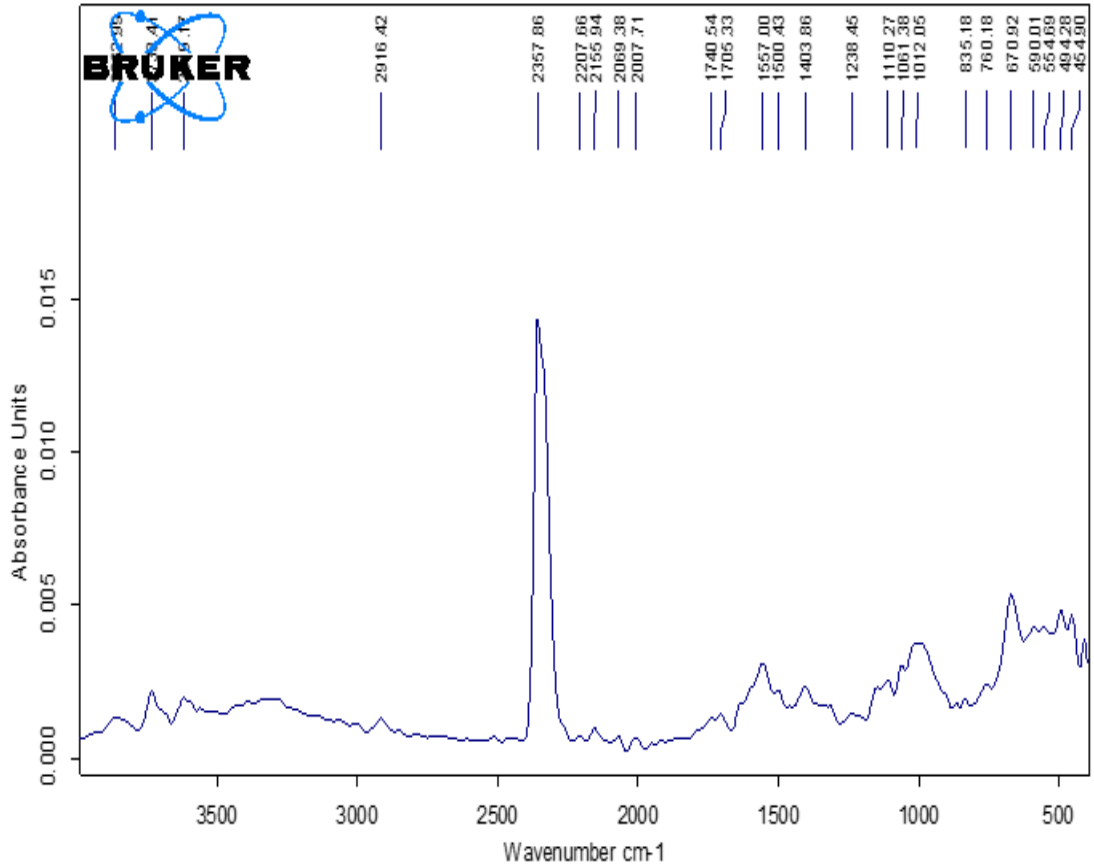
FTIR spektrumlarının yukarıdaki analizi TiO₂ - PAN ürünlerinin başarıyla elde edildiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.3. Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri

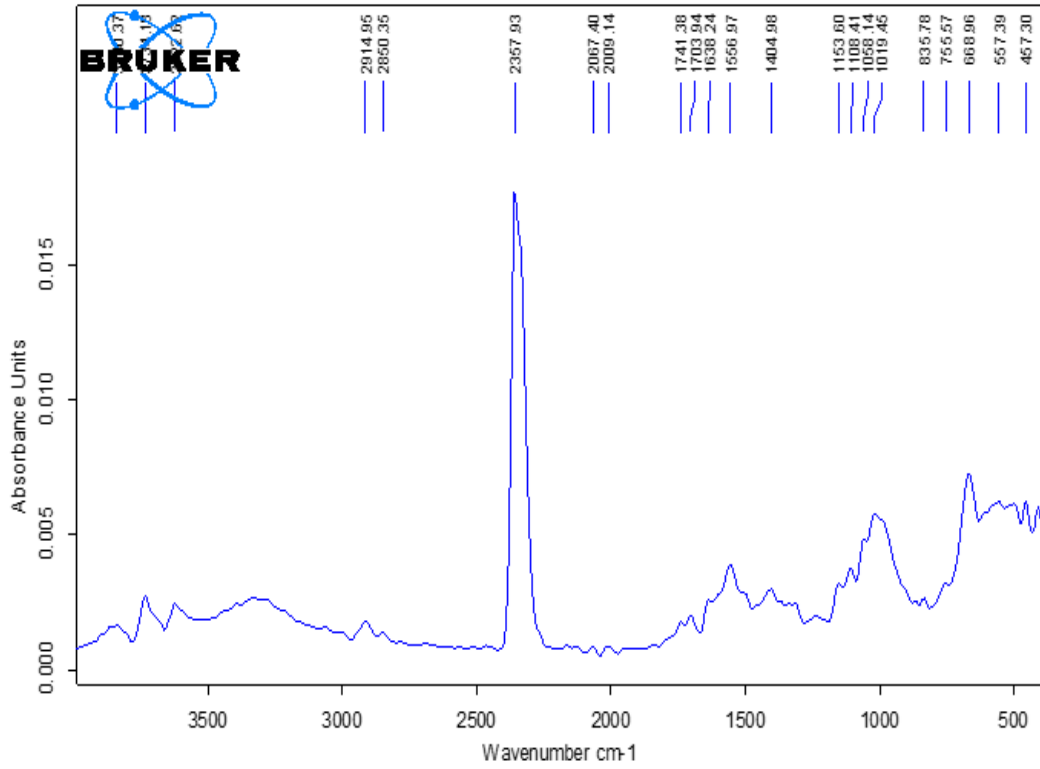
Ag NP'larına %5 PAN eklenmesiyle oluşan nanofiber kompozitin FTIR spektrumları şekil 4.3. de verilmiştir.

PAN ve Ag NP'ları arasında herhangi bir kimyasal bağlantı veya güçlü etkileşim olmadığı daha önce yapılan çalışmalarda doğrulanmıştır (Zhang ve ark., 2001; Sichani ve ark., 2010). AgNP'lerin nanofiberler üzerinde yerinde sentezi ile 2357 cm^{-1} ve 1062 cm^{-1} 'deki güçlü piklerin yoğunluğu önemli ölçüde azaldığı gözlemlendi. Bunun Ag iyonlarının NH ve CN grubu ile nanofiberler aracılığıyla reaksiyonu nedeniyle ortaya çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte, NH ve CN gruplarının varlığı, negatif yüklü Ag iyonlarını ve PAN nanofiber matrisinin varlığında Ag iyonlarının indirgenmesiyle sentezlenen AgO'yu absorbe etmek için aktif bölgeleri oluşturmuştur. Bununla birlikte, CH₂ gerilmesi, C≡N ve CH₂ titreşimlerinin varlığı nedeniyle sırasıyla 2921 cm^{-1} , 2357 cm^{-1} ve 1499 cm^{-1} 'deki PAN nanolifleriyle ilgili fonksiyonel gruplar herhangi bir değişiklik olmaksızın ortaya çıkmıştır. Ag NP'ların çeşitli miktarlarda bulunması ve Ag NP'ların varlığının PAN nanoliflerinin kimyasal yapısını değiştirmede herhangi bir etkisinin olmadığı ve piklerin genişlediği yerlerde küçük gümüş parçacıkların var olduğu görülmektedir (Zhang ve ark., 2001; Kharaghani ve ark., 2018).



Şekil 4.4. TiO₂ ve Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri

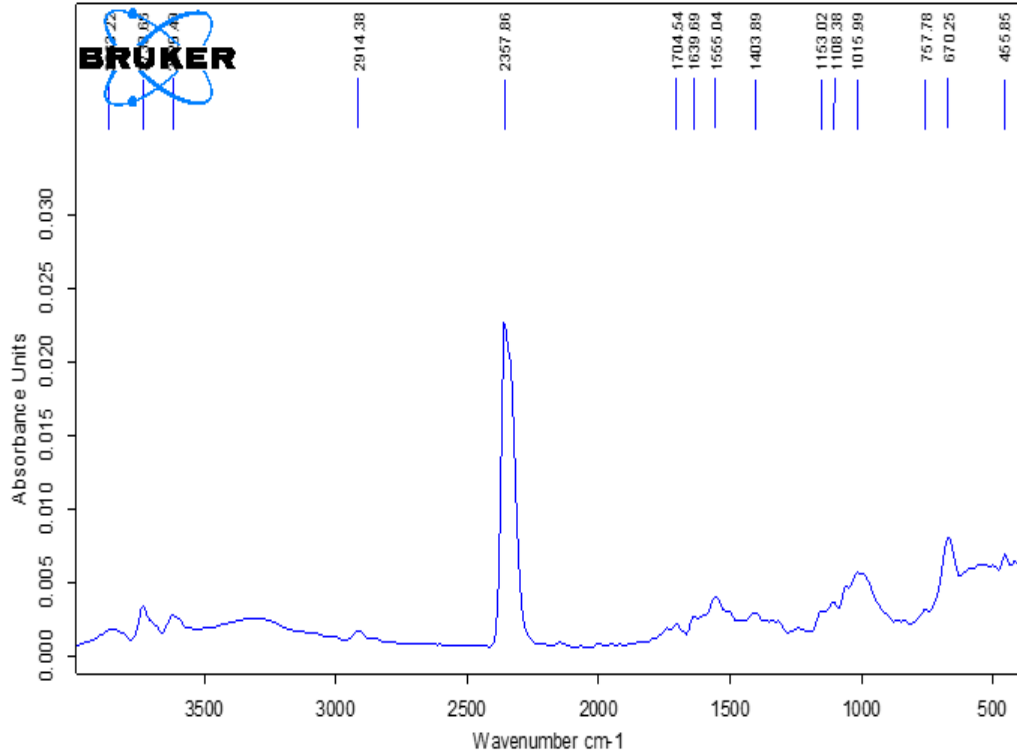
Şekil 4.4. de TiO₂ ve Ag NP'larına %5 PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiberlerin FTIR spektrumları (absorbans) gösterilmektedir. PAN / TiO₂ /Ag nanofiber numunenin üzerindeki 500 ile 1000 cm⁻¹ arasındaki pikler TiO₂'den kaynaklanmaktadır. TiO₂ ve Ag varlığında, TiO₂'in kafes titreşimiyle ilgili (Ti-O gerilmesi) 670 cm⁻¹'de iki yeni tepe noktası da dahil olmak üzere önemli değişiklikler vardır. 2357 cm⁻¹'deki geniş tepe, TiO₂ –Ag bağlanmasını gösterir ve bu, Ag ve TiO₂'nin PAN nanofiber membranında başarılı bir şekilde biriktirildiğini gösterir. PAN/TiO₂/Ag üzerinde 1061 cm⁻¹'deki yeni geniş pik, su moleküllerinin ve CO₂'nin havadan emilmesinden dolayı –OH'nin gerilme titreşimini göstermektedir. DMF için bilinen pik değerler (1677, 1388, 1092 ve 659 cm⁻¹), PAN/ TiO₂ /Ag nanofiber numunede görülmediğinden, numunenin kalıntı çözücü içermediğini söyleyebiliriz (Hartati ve ark., 2022).



Şekil 4.5. Kolajen ‘e %5’lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri

Şekil 4.5’te Amid A bandı esas olarak N–H gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır ve absorpsiyon pik tepesi $3400\text{--}3440\text{ cm}^{-1}$ aralığında görünür. Bir peptidin NH grubu bir hidrojen bağına dahil olduğunda pik tepe daha düşük bir frekansa kayar. Burada bu değer 2914.95 cm^{-1} olup normal değer 2914.95 cm^{-1} altında olduğu görülür. Amid B bandı 2850.35 cm^{-1} bulunmuştur ve bu CH_2 ’nin asimetrik uzamasını göstermektedir.

Kolajenin içerisinde üçlü sarmal yapıdan kaynaklı Amid I, Amid II ve Amid III band yapıları vardır. Amid I bandı, karakteristik absorpsiyon frekansı $1600\text{ ile }1700\text{ cm}^{-1}$ arasında olup protein polipeptit omurgasının $\text{C}=\text{O}$ gerilme titreşimi ile oluşturulur. Burada bu değer 1638.24 cm^{-1} dir. Amid II bandı, C–N gerilme titreşimleriyle birleştirilmiş N–H bükülme titreşimlerini temsil etmekte olup normal absorpsiyon aralığı $1500\text{ ila }1600\text{ cm}^{-1}$ arasındadır. Burada bu değer 1556.97 cm^{-1} dir. Amid III pik tepesi ($1200\text{--}1360\text{ cm}^{-1}$), C–N gerilmesi ve amid bağlantılarından N–H’nin düzlemi bükülmesinden oluşan bileşenlerden oluşan kollajenin moleküller arası etkileşimleri vermektedir. Burada bu değer 1153.60 cm^{-1} dir. Genel olarak 1 oranı üçlü sarmal yapıyı ifade eder (Chi ve ark., 2014; Chen ve ark., 2016; Riaz ve ark., 2018; He ve ark., 2019).



Şekil 4.6. TiO₂ ve Ag NP'larına Kolajen ve %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait FTIR görüntüleri

FTIR görüntüleri elde edilen farklı yapıdaki TiO₂ ve Ag NP katkılı nanofiberlerden sonra bu NP'ların aynı anda eklenerek kolajen+PAN polimer yapısının içerisine eklenmesiyle elde edilen titreşim frekansının 2357.86 cm⁻¹'de belirgin bir pik yapmasıyla şekil 4.6'da ortaya konulmuştur.

4.2.2. SEM Görüntü ve Analizleri

Yapılan birçok araştırma sonucu insan gözünün yapısından dolayı çok küçük detayları görme yeteneğinin sınırlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle küçük detayların gözlenmesi ve yorumlanması için farklı teknolojik cihazlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu cihazlardan biri olan Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek enerji yoğunluğuna sahip elektronlardan oluşan elektron demeti kullanılarak numunenin yüzeyini detaylı olarak incelememizi sağlarken elektron ile numunenin etkileşime başladığı anda oluşan sinyaller ile dış doku, kimyasal bileşimini ve numunenin yapısını gözlememize yardımcı olur.

Çalışmalarımız sonucunda elde ettiğimiz nano malzemelerin yapısını, boncuklu yapıların oluşup oluşmadığını ve üretilen nanofiberlerin ortalama nanofiber çapının ölçülmesi için Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezinin (İLTEK) taramalı elektron mikroskobu (SEM, Zeiss Evo LS10) kullanıldı.

Kullanılan bu cihaz şekil 4.7 de gösterilmiştir.



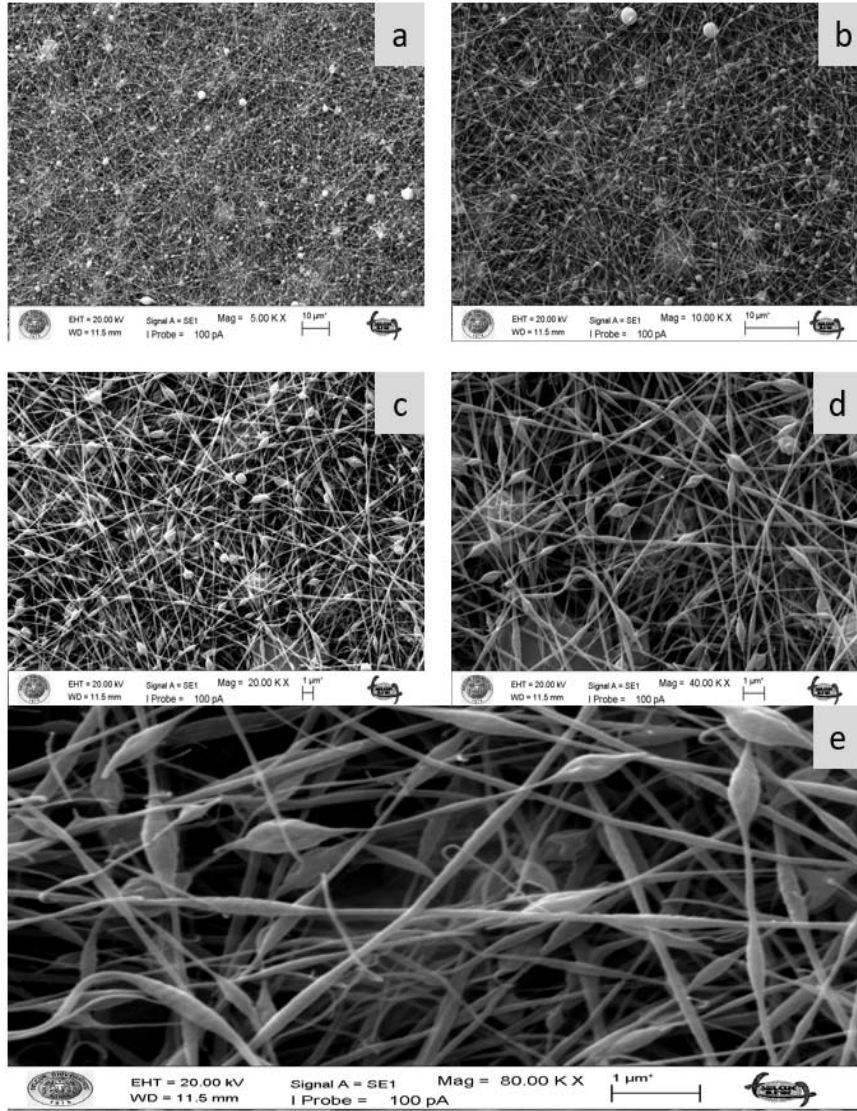
Şekil 4.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Zeiss Evo LS10 Cihazı (SÜ, İLTEK laboratuvar)

Ürettiğimiz nanofiberlerin görüntüsünü daha iyi alabilmek için çekimden önce altın kaplama cihazı ile nanofiberlerin yüzeyini altınla kapladık. Kullanılan altın kaplama cihazı şekil 4.8’de gösterilmiştir. Böylelikle nano malzemelerin morfolojik karakterizasyonu yapıldı.



Şekil 4 8 MTM-10 yüksek çözünürlüklü kalınlık izleme sistemi (İLTEK)

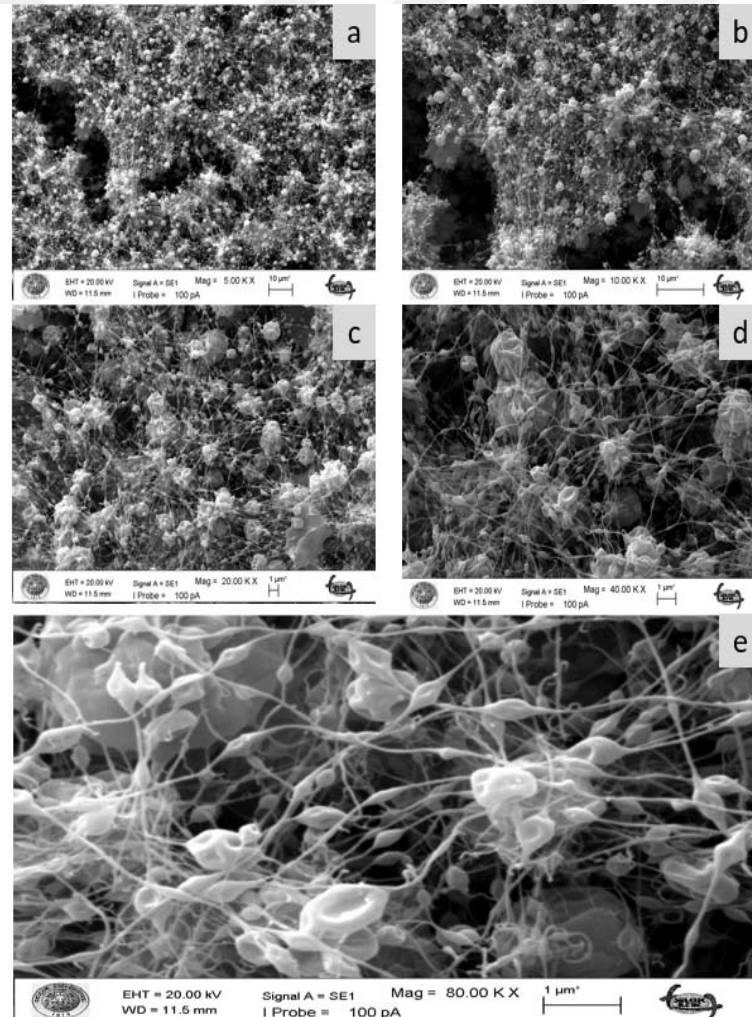
Tez çalışmasında kullanılan nanofiber malzemeler için Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi'nde Zeiss Evo LS10 marka cihazla 5.00 KX, 10.00 KX, 20.00 KX, 40.00 KX ve 80.00 KX büyütme değerlerinde SEM görüntüleri alınmıştır. Bu numunelerin kesitlerinden alınan farklı büyütme oranındaki SEM görüntüleri şekil 4.9, şekil 4.10, şekil 4.11, şekil 4.12 ve şekil 4.13'de verilmektedir.



Şekil 4.9. TiO_2 NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b) 10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)

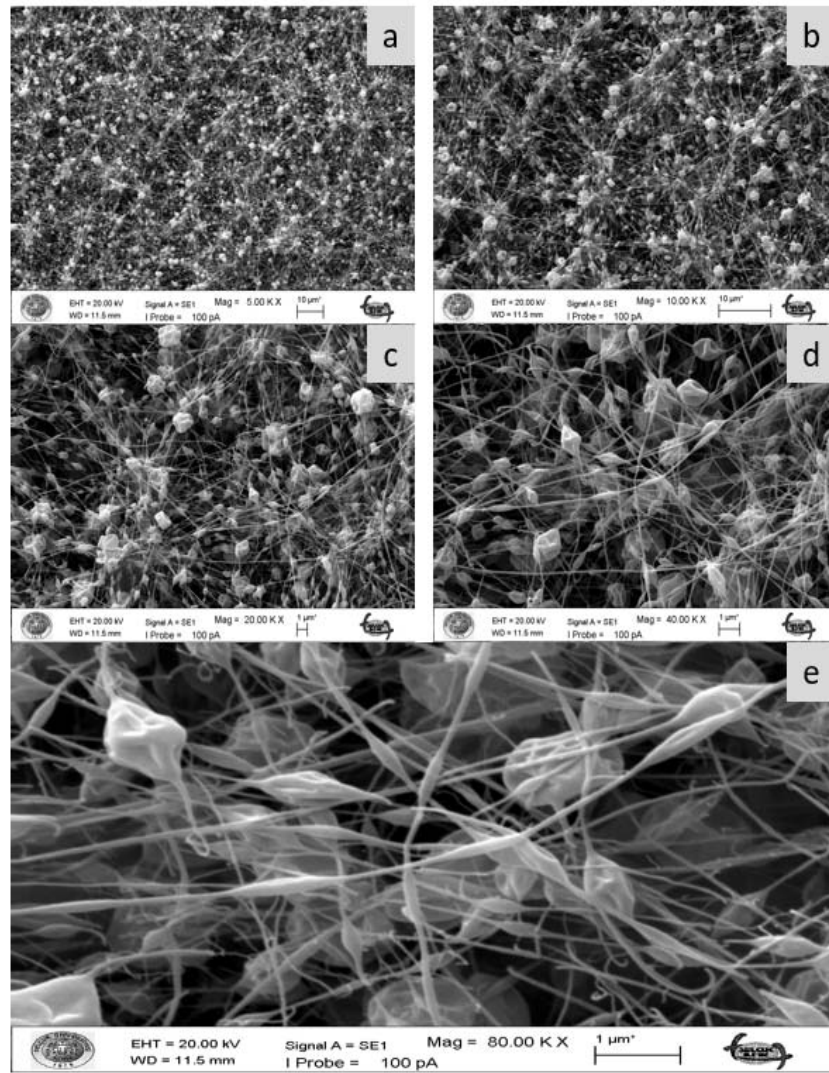
Polimer çözeltisinden elektrospınleme yöntemiyle elde edilen kompozit PAN/ TiO_2 nanoliflerinin morfolojisini ve yapısını analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yüzey topografisi görüntülemeleri Şekil 4.9. de PAN/ TiO_2 NP'larının (a) 5 000; (b) 10 000 kat; (c) 20 000 kat; (d) 40 000 kat; (e) 80 000 kat büyütülmüş olarak

gerçekleştirilen morfolojik görüntüleri gösterilmektedir. Homojen olarak hazırlanmış PAN /TiO₂ elektroegirme düzeneğinde kullanılacak olan şırıngaya çekilerek 18 kV voltaj, 15 cm mesafe, 0.5 mL/sa akış hız parametrelerinde silindirik döner bir toplayıcıda toplanmasıyla elde edilen kompozit nanofiberlerin uzunlukları boyunca sabit çap değeriyle karakterize edildiği görülmüştür. Aynı zamanda TiO₂ içeren fiberlerin, TiO₂ içeren yerlerde pürüzlü ve düzgün olmayan bir yüzeye sahip olduğu ancak bunun dışında yüzeylerin pürüzsüz yüzeyler olduğu ve çapların yaklaşık 60 nm civarında tekdüze olduğu görülebilmektedir. Pozitif yüklü TiO₂ parçacıkları, liflerin yüzeyindeki pozitif yükler tarafından itilerek elektrostatik itme nedeniyle liflerin ortasında toplanmıştır. Bu durum daha önce yapılan çalışmaları doğrulamaktadır (Im ve ark., 2008; Tański ve ark., 2017).



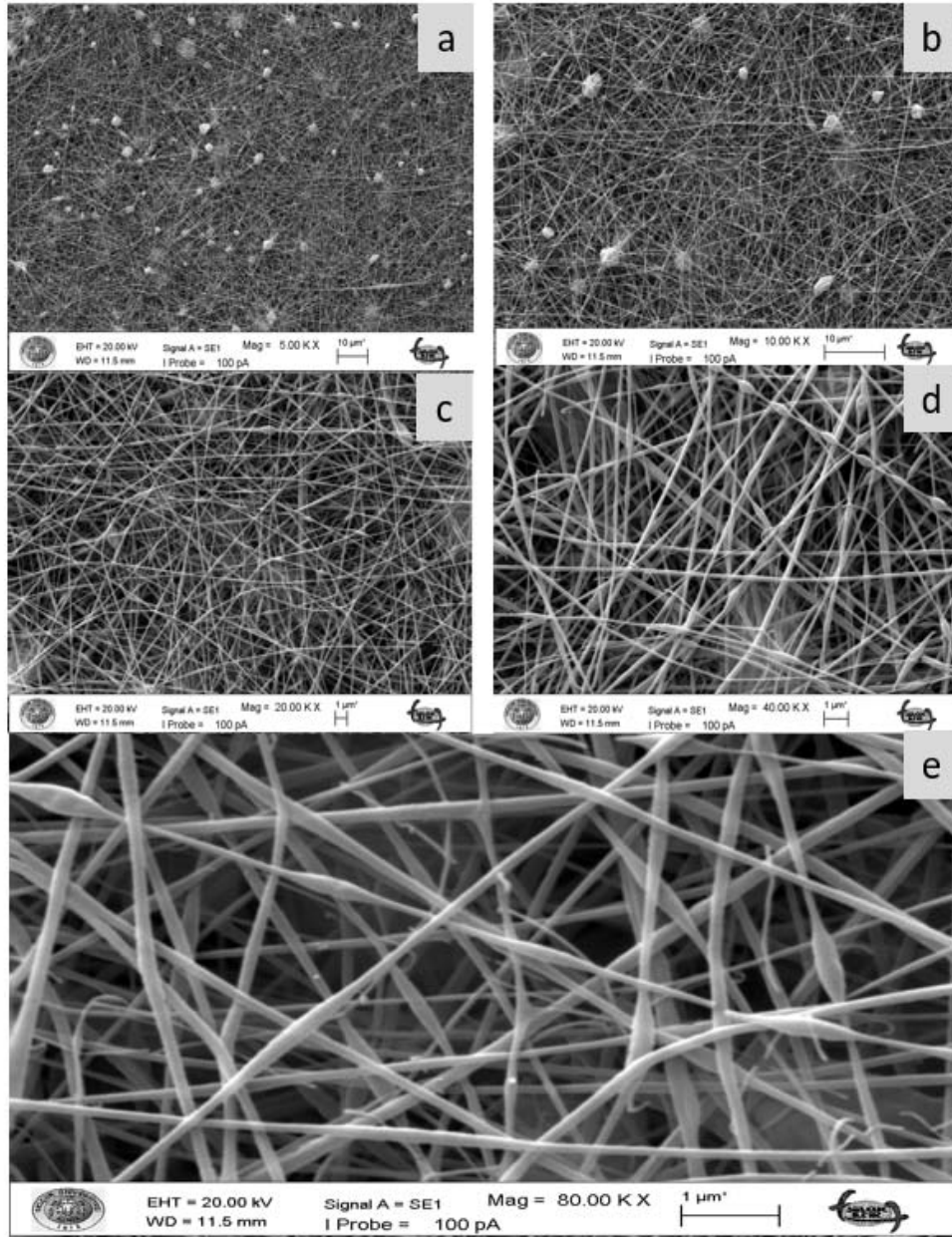
Şekil 4.10. Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)

Homojen olarak hazırlanmış PAN /Ag elektroeğirme düzeneğinde kullanılacak olan şırıngaya çekilerek 18 kV voltaj, 15 cm mesafe, 0.5 mL/sa akış hız parametrelerinde silindirik döner bir toplayıcıda toplanmasıyla elde edilen kompozit nanofiberlerin Şekil 4.10 da verilen SEM görüntüsünde Ag'nin varlığı fiberdeki tane benzeri yapılar ile gösterilmektedir. Ag NP'larının çekirdeklenmesi ve daha fazla büyümesinin yanında boncuklu yapıların da oluştuğu gözlenmiştir. Ag içeren fiberlerin çapların yaklaşık 50 nm civarında olduğu görülmüştür (Lee ve ark., 2005) yaptıkları çalışmada PAN konsantrasyonunun artırılmasıyla Ag NP'larının üretim sürecinin konsantre PAN tarafından geciktirildiğini belirtmiştir.



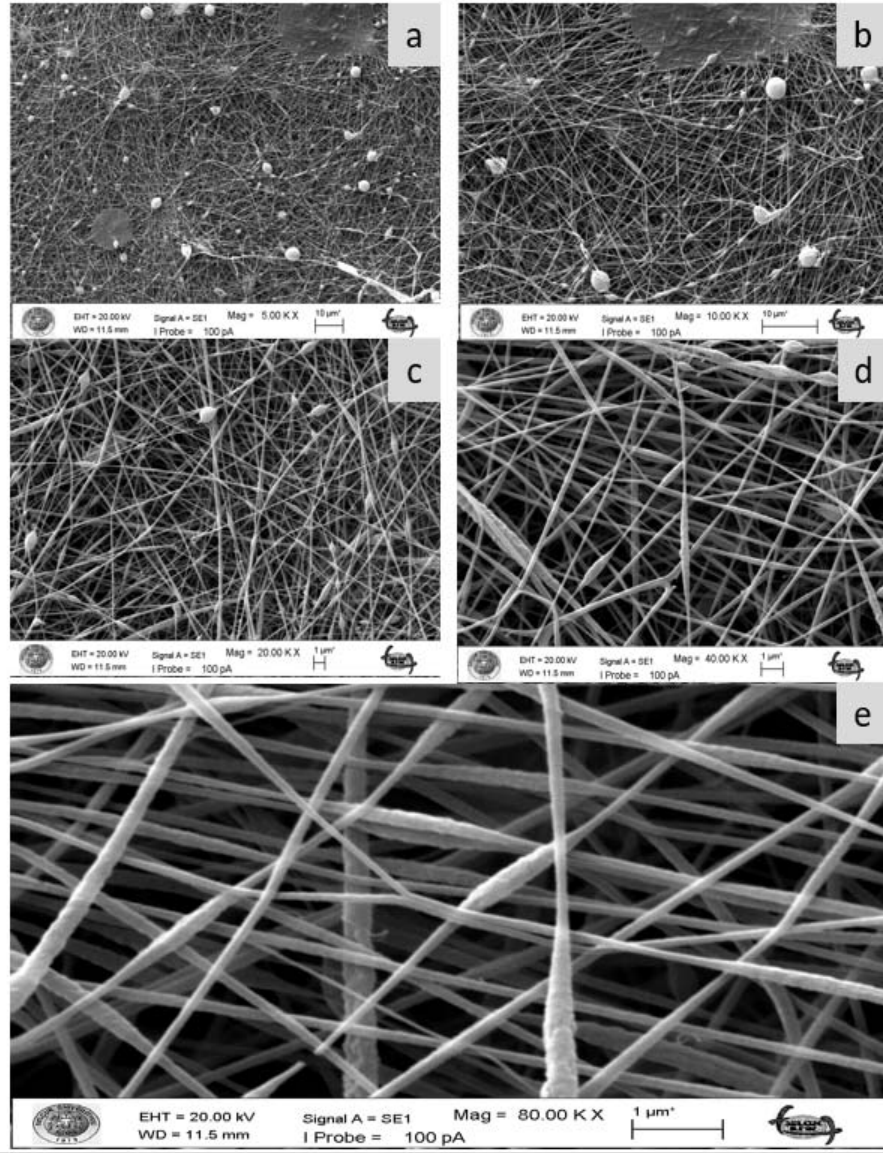
Şekil 4.11. TiO₂ ve Ag NP'larına %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)

Homojen olarak hazırlanmış PAN/Ag/TiO₂ elektroegirme düzeneğinde kullanılacak olan şırıngaya çekilerek 18 kV voltaj, 15 cm mesafe, 0.5 mL/sa akış hız parametrelerinde silindirik döner bir toplayıcıda toplanmasıyla elde edilen kompozit nanofiberlerin karakterizasyonunu incelendiğinde kompozit Ag nanoliflerin çapında bir miktar artış olduğu ve bu artışın TiO₂ nanoparçacıkların varlığı ile ilgili olduğu düşünülmüştür. Daha önce (Wang ve ark., 2020) çeşitli TiO₂ konsantrasyonlarının etkisine bağlı yaptıkları çalışma, TiO₂ nanoparçacıkların fiber çapındaki değişime etkisini incelemişlerdir.



Şekil 4.12.Kolajen ‘e %5’lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)

Homojen olarak hazırlanmış PAN /kolajen elektroegirme düzeneğinde kullanılacak olan şırıngaya çekilerek 18 kV voltaj, 15 cm mesafe, 0.5 mL/sa akış hız parametrelerinde silindirik döner bir toplayıcıda toplanmasıyla elde edilen kompozit nanofiberlerin Şekil 4.12 de verilen SEM görüntüsünde üçlü sarmal yapıdaki kolajenin dönüşümlü katmanlarıyla elektro-eğirilmiş bir lif ağının katman katman kaplanmasının, homolog kolajen kaplamaları üretmek için etkili bir yöntem sağladığı gösterilmiştir (Truong ve ark., 2012). Ayrıca kolajenin doğal üçlü sarmal yapısını koruduğunu ve jelatine dönüşmediği görülmüştür. Şekil 4.11 'e bakıldığında nanofiberlerin düzgün, tipik olarak uzun bir morfoloji gösterdiği ve PAN liflerinin NaOH işlemiyle tanıtılan topolojik değişikliklere uyduğunu görülmektedir. Üretilen kolajen kaplı fiberin sem görüntülerinin (Truong ve ark., 2012) çalışmasını destekler nitelikte olup, boyutsal kararlılığı korurken hücre yapışması ve yayılması için iyi bir substrat sağladığı gözlenmiştir.



Şekil 4.13. TiO_2 ve Ag NP'larına Kolajen ve %5'lik PAN eklenmesiyle elde edilen nanofiber yüzeye ait SEM görüntüleri (büyütme oranları; a) 5.00 KX, b)10.00 KX, c) 20.00 KX, d) 40.00 KX, e) 80.00 KX)

%5'lik PAN çözeltisinin içerisinde homojen olarak karıştırılmış TiO_2 ve Ag NP'larına ilaveten kolajen varlığında elektroegirme düzeneğinde kullanılacak olan şırıngaya çekilerek 18 kV voltaj, 15 cm mesafe, 0.5 mL/sa akış hız parametrelerinde silindirik döner bir toplayıcıda toplanmasıyla elde edilen kompozit nanofiberlerin elde edilen SEM görüntüleri şekil 4.13'de verilmiştir. TiO_2 konsantrasyonu arttığında kompozit nanoliflerin çapında bir miktar artış olmasının yanında kolajen ilavesi ile boyutsal bir kararlılık olduğu ve oluşan fiberlerin daha düzgün ve tipik olarak daha uzun bir morfolojide olduğu gözlenmiştir.

4.2.3. Çekme cihazı Görüntü ve Analizleri

Çekme deneyleri kullanmış olduğumuz çekme cihazı ile 5 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Nanofiber numunelerin boyutu 1x5 cm dikdörtgen şeklinde kesilmiştir. Numuneleri cihaza monte etmek için kulplar arasındaki mesafenin 10 mm olarak ayarlanması sağlanmıştır. Nanofiber numunelerin kalınlığı mikrometre kullanılarak ortalama 0,025 mm olarak ölçülmüştür. Kalınlık ölçümleri fiberlerin mekanik özelliklerini etkilemektedir.



Şekil 4.14. Çekme cihazı

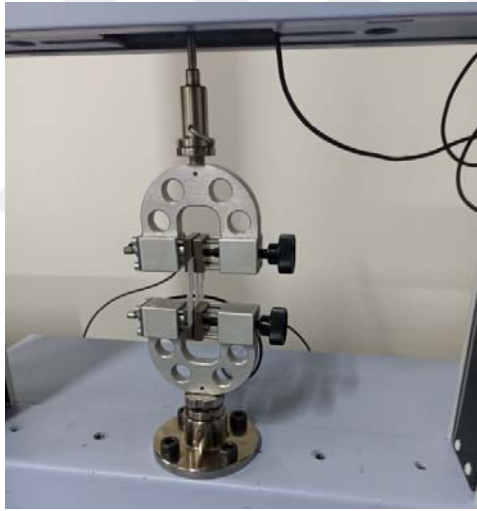
Hazırlanan fiberlerin kopma anında üzerine etkiyen en büyük kuvvetin (F_{max}), fiberin kesit alanına (A) bölünmesiyle fiberin sahip olduğu çekme mukavemeti (MPa) hesaplanmıştır (Eşitlik 4.1).

$$\text{Çekme mukavemeti } (\sigma) = F_{\max}/A \quad (\text{Eşitlik 4.1})$$

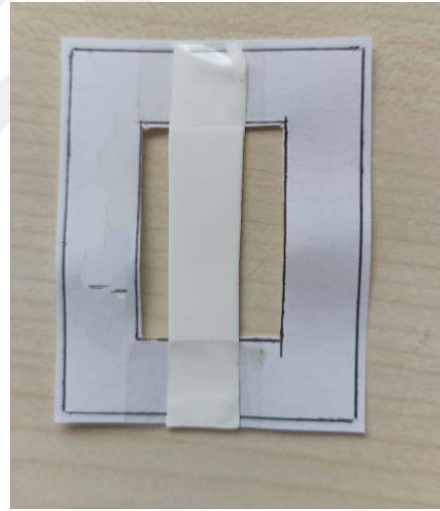
Elde edilen fiberlerin yüzde uzaması fiberin boyundaki değişimin ($\Delta L = L - L_0$), ilk boyuna (L_0) oranına bölünerek hesaplanmıştır (Eşitlik 4.2).

$$\text{Yüzde uzama } (\epsilon) = \Delta L / L_0 \text{ ile hesaplanmıştır} \quad (\text{Eşitlik 4.2})$$

Hazırlanan fiberlerin çekme deneyleri sırasında, cihazdan alınan kuvvet değerleri, numunelerin kesit alanına bölünerek gerilme değerleri hesaplanmış olup, elde edilen sonuçlara göre numunelerin σ - ϵ grafikleri çizilmiştir (Kurtuluş, 2010).



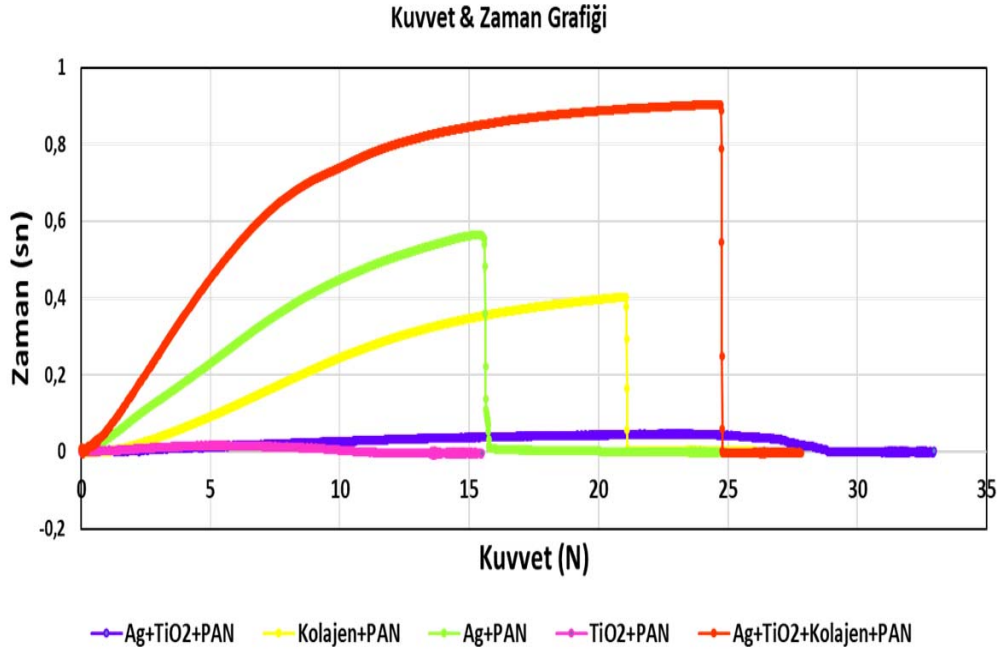
(a)



(b)

Şekil 4.15. (a) Çekme testi esnasında numune görüntüsü, (b) çekme cihazına yerleştirmeye hazır numunenin görüntüsü

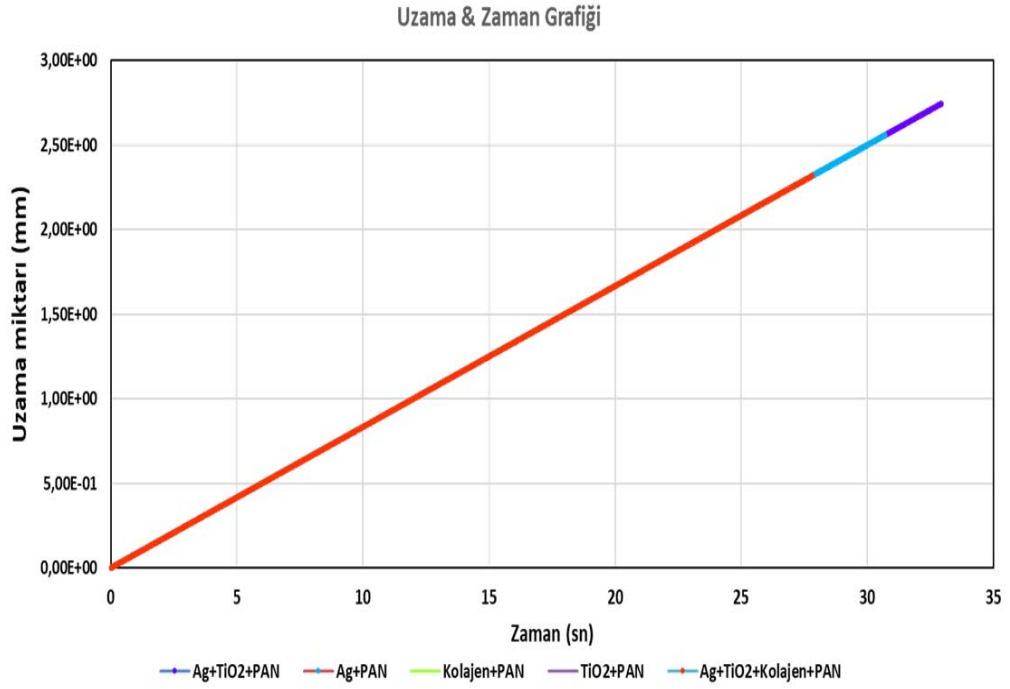
Kullanmış olduğumuz çekme cihazı ile çekme hızını 5 mm/dk olarak ayarlayıp çekme deneylerini gerçekleştirdiğimiz nanofiber numunelerin kuvvet-zaman ve uzama- zaman grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.16. Kuvvet - zaman grafiği

Şekil 4.15 de üretilen Ag+TiO₂+PAN, Kolajen+PAN, Ag+PAN, TiO₂ +PAN ve Ag+TiO₂+Kolajen+PAN nanofiber numunelerine ait kuvvet- zaman grafiği verilmiştir.

Ag+TiO₂+PAN, Kolajen+PAN, Ag+PAN, TiO₂+PAN ve Ag+TiO₂+Kolajen+PAN nanofiberlere ayrı ayrı germe çekme uygulandığında bu tez çalışmasının ana hedeflerinden olan kolajen ve PAN polimerlerine Ag ve TiO₂ NP eklenmesi elde edilen nanofiberin farklı kuvvet değerleri uygulanması ile en dayanıklı olduğu şekil 4.15'te görülmüştür. Bu sonuçlara göre Ag+TiO₂+Kolajen+PAN karışımından elde edilen fiberin uygulanan kuvvet karşısında dayanıklılığının en yüksek olduğu açıktır. Aynı zamanda Ag+TiO₂+PAN nanofiberinin dikkat çekici bir şekilde uygulanan kuvvete dayanım gösterdiği görülmektedir, ancak burada dayanım süresinin oldukça kısa olması Ag+TiO₂+PAN nanofiberin zamana bağlı kuvvet ölçümünde minimum düzeyde olmasına sebep olmuştur. Kolajen+PAN karışımın uygulanan kuvvete gösterdiği dayanıklılık literatürden bilinen bir durumdur. Zamana bağlı kuvvet uygulandığında dayanım sürecinin önemi görülmektedir. Ag+PAN ve TiO₂+PAN karşılaştırmalı olarak bakıldığında Ag NP'ların önemli derecede kuvvet dayanımına katkıda bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4.17.Uzama – zaman grafiği

Şekil 4.16. da üretilen Ag+TiO₂+PAN, Kolajen+PAN, Ag+PAN, TiO₂ +PAN ve Ag+TiO₂+Kolajen+PAN nanofiber numunelerine ait uzama - zaman grafiği verilmiştir. Poliakrilonitril (PAN) bazlı fiberlerin, yüksek mukavemetleri, üstün sertlikleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle büyük yük taşıyan kompozitlerin imalatında tercih edilen malzeme olduğu bilinmektedir (Zhou ve ark., 2010). Grafikte uzama oranının zamanla doğrusal olarak değiştiği gözlenmiştir. Burada nanofiberlerin esnek yapıda olduğu ve bu esnek yapının PAN polimeri kaynaklı olduğu söylenebilir. Yapılan bir araştırmada pan konsantrasyonundaki artışın çekme mukavemetini artırdığını böylelikle uzamanında arttığı sonucuna varmıştır (Khan ve ark., 2015).

5.SONUÇLAR

Bu çalışmada Laser Ablasyon Yöntemiyle TiO₂@Ag metal nanoparçacık üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan nanoparçacıklar için femtosaniye laser sistemi kullanılmıştır. 6 ml'lik DMF çözeltisindeki Ag tablet üzerine 800 nm dalga boyunda 600 mW laser gücü altında 1 saat boyunca laser ışınları gönderilerek Ag nanoparçacıklı çözelti elde edilmiştir. Aynı şekilde 6 ml'lik DMF çözeltisine TiO₂ parçacık üzerine 800

nm dalga boyunda 600 mW laser gücü altında 1 saat boyunca laser ışınları gönderilerek de TiO₂ nanoparçacıklı çözelti elde edilmiştir.

Laser ablasyon ile elde edilen nanoparçacıkların fibere katkılanması işleminde elektro eğirme yöntemi kullanılmıştır. Bunun için Ag ve TiO₂ nanoparçacık içeren DMF çözeltilerine ayrı ayrı %5 lik PAN ilave edilerek nanofiber üretiminde kullanılacak yeni çözeltiler elde edilmiştir. Kolajen etkisinin gözlemlenmesi amacıyla 6 ml DMF içerisine %5 lik PAN eklenip homojen olarak karıştırılmıştır. Üretilen Ag, TiO₂, Kolajen, PAN ve DMF'li NP'larından nanofiber üretimine geçilmiştir. Hazırlanmış olan homojen çözeltiler 21.2° sıcaklığında, elektro eğirme düzeneğinde kullanılacak şırıngaya çekilerek 18 kV voltaj, 15 cm mesafe, 1 mL/sa akış hız parametrelerinde silindirik döner toplayıcıya yerleştirilen alüminyum folyo üzerine toplanmıştır. İşleme 1 saat boyunca devam edilmiştir. Böylece PAN katkılı nanofiberler başarıyla üretilmiştir.

Elde edilen nanofiberler için FTIR ve SEM görüntü analizleri yapılmıştır. SEM görüntülerine göre TiO₂ nanofiber çaplarının Ag nanofiber çaplarına göre daha kalın olduğu ve Ag NP'lara TiO₂ nanoparçacıklar eklenmesiyle elde edilen nanofiber yapıların çaplarında artış olduğu görülmüştür. Bu iki farklı metal nanoparçacığa kolajen polimeri ilavesi ile elde edilen kompozit nanofiberlerin ise boyutsal bir kararlılık gösterdiği ve oluşan fiberlerin daha düzgün ve tipik olarak daha uzun bir morfolojide olduğu gözlenmiştir.

Üretilen nanofiberleri daha iyi karakterize edebilmek için germe çekme deneyi uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda fiberlerin kuvvet – zaman ve uzama – zaman grafikleri çizilmiştir. Ag+TiO₂+PAN nanofiberlerin 28 N a kadar dayanıklılık gösterse de bu sürenin yaklaşık 0.1 saniye kadar çok kısa olduğu görülmüştür. Kolajen+PAN karışımdan elde edilen fiberin yaklaşık 0.4 saniye gibi bir sürede 21 N a kadar dayanıklılık gösterdiği görülmüştür. Ag+PAN nanofiber yaklaşık 0.6 saniyede yaklaşık 15.2 N, TiO₂+PAN nanofiber yaklaşık 15.2 N kadar bir değere çok kısa bir süre dayanıklılık gösterebilmiştir. Ag ve TiO₂ NP'lara kolajen ve PAN polimerleri ekleyerek elde ettiğimiz nanofiberlerin yaklaşık 25 N a, yaklaşık 0.9 saniye kadar süre dayanıklılık göstererek diğer ürettiğimiz nanofiberlere göre en dayanıklı olduğu görülmüştür. Bu beklenen ve istenilen bir sonuçtur. Ag+TiO₂+PAN, Kolajen+PAN, Ag+PAN, TiO₂ +PAN ve Ag+TiO₂+Kolajen+PAN nanofiber numunelerine ait uzama - zaman grafiğine bakıldığında ise bu nanofiberlerin yapısında bulunan PAN polimerinin esnek yapı göstermesine bağlı olarak uzama oranının zamanla doğrusal olarak değiştiği gözlenmiştir.

Üretilen nanofiberlerden elde edilen sonuçlar yapay doku çalışmalarında kullanılmak üzere dayanıklı ve yüksek verimli antibakteriyel malzemelerin hazırlanmasında yararlı bilgiler sağlayabilir.

5.1 Öneriler

Bu çalışmada laser ablasyon yöntemi ile üretilen metal nanoparçacıklara PAN ve kolajen ilavesi ile elde edilen fiberlerin özellikleri geliştirilerek yapay doku üretim çalışmalarında kullanılabilir. Doğal polimer olan kolajenin çalışmada gösterdiği dayanıklılık performansının yapay doku üretimi çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Üretilen fiberlerin canlı doku uygulamalarına bakılabilir. Bakteri ve sitotoksik hücre çalışmaları da yapılabilir.

ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı
Uyruğu

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise		

Üniversite

Yüksek Lisans :
Doktora :

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
------------	--------------	---------------

UZMANLIK ALANI**YABANCI DİLLER****BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER****ÖZELLİKLER YAYINLAR**

24/08/2022

KAYNAKLAR

- Afşar, O., 2023, Titanyum dioksit nanopartiküllerinin insan embriyonik akciğer hücrelerinde DNA hasarı üzerine etkisinin araştırılması, *Trakya Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*.
- Akdemir, Z. S., 2009, Doku mühendisliğinde kullanılacak yeni polimerik biyomalzemelerin geliştirilmesi, *Marmara Üniversitesi (Turkey)*.
- Akhlaghi Pirposhteh, E., Mortazavi, S. B., Farhang Dehghan, S., Khaloo, S. S. ve Montazer, M., 2024, Optimization and development of workwear fabric coated with TiO₂ nanoparticles in order to improve thermal insulation properties and air permeability, *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241258169.
- Akkan, C., 2009, Diyot lazer ile etkileşen biyolojik hücrelerin incelenmesi için lazer taramalı konfokal mikroskop dizaynı (Yüksek Lisans Tezi), *Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*.
- Akman, E., 2006, Ti6Al4V titanyum alaşımlarının atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Al-Khayri, J. M., Rashmi, R., Surya Ulhas, R., Sudheer, W. N., Banadka, A., Nagella, P., Aldaej, M. I., Rezk, A. A.-S., Shehata, W. F. ve Almaghasla, M. I., 2023, The role of nanoparticles in response of plants to abiotic stress at physiological, biochemical, and molecular levels, *Plants*, 12 (2), 292.
- Amsellem, W., Sarvestani, H. Y., Pankov, V., Martinez-Rubi, Y., Gholipour, J. ve Ashrafi, B., 2023, Deep precision machining of SiC ceramics by picosecond laser ablation, *Ceramics International*, 49 (6), 9592-9606.
- Angammana, C. J. ve Jayaram, S. H., 2016, Fundamentals of electrospinning and processing technologies, *Particulate Science and Technology*, 34 (1), 72-82.
- Attallah, A. H., Abdulwahid, F. S., Ali, Y. A. ve Haider, A. J., 2023, Effect of Liquid and Laser Parameters on Fabrication of Nanoparticles via Pulsed Laser Ablation in Liquid with Their Applications: A Review, *Plasmonics*, 1-17.
- Avcı, C., 2022, Kolajenin Fonksiyonel Özellikleri ve Kullanımı Üzerine Tüketici Algısının Değerlendirilmesi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- AYKUT, Y., 2013, Poliakrilonitril nanolifler içerisinde altıgen kobalt sülfür nanoplaka sentezi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 18 (2), 47-54.
- BAHAR, D. U., Yara İyileştirme Özellikli Polimerlerin Yara Örtülerinde Kullanımı, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi* (13), 157-181.
- Balachandran, A., Sreenilayam, S. P., Madanan, K., Thomas, S. ve Brabazon, D., 2022, Nanoparticle production via laser ablation synthesis in solution method and printed electronic application-A brief review, *Results in Engineering*, 100646.
- Balling, P. ve Schou, J., 2013, Femtosecond-laser ablation dynamics of dielectrics: basics and applications for thin films, *Reports on progress in physics*, 76 (3), 036502.
- Bao, H., Yu, X., Xu, C., Li, X., Li, Z., Wei, D. ve Liu, Y., 2015, New toxicity mechanism of silver nanoparticles: promoting apoptosis and inhibiting proliferation, *PLoS One*, 10 (3), e0122535.
- Bayğu, G., 2020, Cimin üzümü yaprağı kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle elde edilen gümüş nanopartikülünün genotoksik etkisinin kanat benek testi ile belirlenmesi, *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi*.

- BAYIR, S., BULK MALZEMELERİN VE İNCE FİLMLEİN LAZER ABLASYON EŞİK ENERJİ YOĞUNLUKLARININ D-SCAN YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ.
- Bayram, B., Lazer ablasyon tekniği ile üretilen au nanoparçacıklarının sentezi ve karakterizasyonu, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Benettayeb, A., Seihoub, F. Z., Pal, P., Ghosh, S., Usman, M., Chia, C. H., Usman, M. ve Sillanpää, M., 2023, Chitosan Nanoparticles as Potential Nano-Sorbent for Removal of Toxic Environmental Pollutants, *Nanomaterials*, 13 (3), 447.
- BEYKAYA, M. ve ÇAĞLAR, A., 2016, Bitkisel özütler kullanılarak gümüş-nanopartikül (AgNP) sentezlenmesi ve antimikrobiyal etkinlikleri üzerine bir araştırma, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (3), 631-641.
- Bhardwaj, N. ve Kundu, S. C., 2010, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology advances*, 28 (3), 325-347.
- Boutinguiza, M., Comesaña, R., Lusquiños, F., Riveiro, A., Del Val, J. ve Pou, J., 2015, Production of silver nanoparticles by laser ablation in open air, *Applied Surface Science*, 336, 108-111.
- Boyras, İ. ve Yıldız, A., 2017, Lazer Çeşitleri ve yüksek yoğunluklu lazer kullanımı, *Çağdaş Tıp Dergisi*, 6 (1-Ek (Olgu Sunumları)), 104-109.
- Buehler, M. J., 2006, Nature designs tough collagen: explaining the nanostructure of collagen fibrils, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103 (33), 12285-12290.
- Byram, C., Moram, S. S. B., Banerjee, D., Beeram, R., Rathod, J. ve Soma, V. R., 2023, Review of ultrafast laser ablation for sensing and photonic applications, *Journal of Optics*.
- Calderón-Jiménez, B., Johnson, M. E., Montoro Bustos, A. R., Murphy, K. E., Winchester, M. R. ve Vega Baudrit, J. R., 2017, Silver nanoparticles: Technological advances, societal impacts, and metrological challenges, *Frontiers in chemistry*, 5, 6.
- CAMCI, E., 2023, Terminal balistikte 7, 62mm çaplı mermilere karşıv-ara geometrili ve tabakalı yapıların enerji absorpsiyon performansının incelenmesi.
- Candan, L., 2008, Karbon-fiber takviyeli kompozitler ve polikarbonat malzemelerin lazerle delme parametrelerinin belirlenmesi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Celep, Ş. ve Koç, E., 2007, Nanoteknoloji ve tekstilde uygulama alanları, Institute of Science Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova
- Cevizlidere, S., 2020, Dermatolojik Etkili İlaç Salınım Sistemleri Olarak Nanofiber Uygulamaları Ve İlaç Salınım Parametrelerinin İncelenmesi, *Anadolu University (Turkey)*.
- Chen, J., Li, L., Yi, R., Xu, N., Gao, R. ve Hong, B., 2016, Extraction and characterization of acid-soluble collagen from scales and skin of tilapia (*Oreochromis niloticus*), *LWT-Food Science and Technology*, 66, 453-459.
- Chen, P., Chai, M., Mai, Z., Liao, M., Xie, X., Lu, Z., Zhang, W., Zhao, H., Dong, X. ve Fu, X., 2022, Electrospinning polyacrylonitrile (PAN) based nanofibrous membranes synergic with plant antibacterial agent and silver nanoparticles (AgNPs) for potential wound dressing, *Materials Today Communications*, 31, 103336.
- Chi, C. F., Wang, B., Li, Z. R., Luo, H. Y., Ding, G. F. ve Wu, C. W., 2014, Characterization of Acid-soluble Collagen from the Skin of Hammerhead Shark (*Sphyrna lewini*), *Journal of food biochemistry*, 38 (2), 236-247.

- Çakmakçı, E., 2009, Elektrosinning yöntemi ile yeni polimerik malzemelerin sentezi ve karakterizasyonu, *Marmara Üniversitesi (Turkey)*.
- ÇAYDAMLI, Y., 2012, Elektrosinning yöntemi ile biyopolimer esaslı nanoyapıların hazırlanması ve karakterizasyonu, *DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Çelik, B., 2011, Nanosaniye lazer kullanarak PVC malzeme üzerinde mikro ölçekli deliklerin optimum parametrelerinin Taguchi metodu ile belirlenmesi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Çelik, R. H., 2019, Grafen oksit temelli polimerik nanofibröz doku iskelelerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu, *İstanbul Medeniyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve*
- Çolpan, M. H., 2008, Lazer gücünün fonksiyonu olarak lazer yüzey işleme üzerine bir çalışma, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Çorman, M. E., 2010, Moleküler baskılanmış nanopartiküllerin hazırlanması, karakterizasyonu ve lizozim saflaştırılmasında kullanılması, *Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Çunayev, Ş., 2021, Elektro Çekim (Elektrosinning) Yöntemi İle Karbon Siyahı Katkılı İletken ve Saydam Nanolifli Yüzey Üretimi ve Karakterizasyonu, *Bursa Uludağ University (Turkey)*.
- Dell'Aglio, M., Gaudioso, R., De Pascale, O. ve De Giacomo, A., 2015, Mechanisms and processes of pulsed laser ablation in liquids during nanoparticle production, *Applied Surface Science*, 348, 4-9.
- Demirel, R. B., 2018, Elektroçekim yöntemi ile nanofiber üretimi ve uygulamaları, *Anadolu University (Turkey)*.
- Diebold, U., 2003, The surface science of titanium dioxide, *Surface science reports*, 48 (5-8), 53-229.
- Ding, B., Wang, X. ve Yu, J., 2018, Electrospinning: nanofabrication and applications, William Andrew, p.
- Doğaroğlu, G. ve Köleli, N., 2014, Titanyum dioksit nanopartikülünün buğday çimlenmesine etkisi, *Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1283-1288.
- Doh, S. J., Kim, C., Lee, S. G., Lee, S. J. ve Kim, H., 2008, Development of photocatalytic TiO₂ nanofibers by electrospinning and its application to degradation of dye pollutants, *Journal of hazardous materials*, 154 (1-3), 118-127.
- Duygulu, N. E., 2020, Elektro Eğirme Yöntemiyle Nano Boyutlu TiO₂ Parçacık katkılı PLA Nano Fiber Üretimi, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10 (1), 7-18.
- Düzyer, Ş., 2009, Nanoliflerin yüzey özelliklerinin incelenmesi, *Bursa Uludağ University (Turkey)*.
- Ehtesabi, H., Fayaz, M., Hosseini-Doabi, F. ve Rezaei, P., 2023, The application of green synthesis nanoparticles in wound healing: A review, *Materials Today Sustainability*, 21, 100272.
- Ekrami, E., Khodabandeh Shahraky, M., Mahmoudifard, M., Mirtaleb, M. S. ve Shariati, P., 2023, Biomedical applications of electrospun nanofibers in industrial world: a review, *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 72 (7), 561-575.
- EKSİLMEZ, N., 2021, HARDOX 500 ÇELİĞİNİN LAZERLE KESİLMESİNDE KESME GEOMETRİSİNİN VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KESİM KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.
- EREM, A. D. ve ÖZCAN, G., 2015, Polipropilen/Titanyum Dioksit nanokompozit liflerin üretimi ve karakterizasyonu, *Tekstil ve Mühendis*, 22 (99), 1-6.

- ERGÜL, V. ve ÇAKIR, S., 2023, Nanoteknoloji'nin Sektörel Uygulamaları, *Journal of Defense Sciences/Savunma Bilimleri Dergisi*, 1 (43).
- Ersöz, M., Işıtan, A. ve Balaban, M., 2018a, Nanoteknoloji 1, *BilalOfest Basım-Yayın &Matbaacılık*.
- Ersöz, M., Sulak, M., Bersani, M., Işıtan, A., Balaban, M., Yakar, Z., Ünlü, C. G. ve Onar, V., 2018b, Nanoteknoloji 2: karakterizasyon ve uygulamalar, Pamukkale Üniversitesi Yayınları.
- Esterkin, C., Negro, A., Alfano, O. ve Cassano, A., 2005, Air pollution remediation in a fixed bed photocatalytic reactor coated with TiO₂, *AIChE Journal*, 51 (8), 2298-2310.
- Evcin, A., Ersoy, B. ve Bezir, N. Ç., 2019, Elektroeğirme yöntemiyle Ag katkılı karbon nanoliflerin sentezi, *Nevşehir bilim ve Teknoloji dergisi*, 8, 88-97.
- Fathi-Achachelouei, M., Knopf-Marques, H., Ribeiro da Silva, C. E., Barthès, J., Bat, E., Tezcaner, A. ve Vrana, N. E., 2019, Use of nanoparticles in tissue engineering and regenerative medicine, *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 113.
- Fazio, E., Gökce, B., De Giacomo, A., Meneghetti, M., Compagnini, G., Tommasini, M., Waag, F., Lucotti, A., Zanchi, C. G. ve Ossi, P. M., 2020, Nanoparticles engineering by pulsed laser ablation in liquids: Concepts and applications, *Nanomaterials*, 10 (11), 2317.
- Feynman, R. P., 2006, QED: The strange theory of light and matter, Princeton University Press, p.
- Franco-Molina, M. A., Mendoza-Gamboa, E., Sierra-Rivera, C. A., Gómez-Flores, R. A., Zapata-Benavides, P., Castillo-Tello, P., Alcocer-González, J. M., Miranda-Hernández, D. F., Tamez-Guerra, R. S. ve Rodríguez-Padilla, C., 2010, Antitumor activity of colloidal silver on MCF-7 human breast cancer cells, *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*, 29 (1), 1-7.
- Fratzl, P., 2008, Collagen: structure and mechanics, an introduction, In: Collagen: structure and mechanics, Eds: Springer, p. 1-13.
- Ghosal, K., Agatemor, C., Špitálský, Z., Thomas, S. ve Kny, E., 2019, Electrospinning tissue engineering and wound dressing scaffolds from polymer-titanium dioxide nanocomposites, *Chemical Engineering Journal*, 358, 1262-1278.
- Gilik, Ç. ve Avcı, A., 2021, Tarçın özütü ile enkapsüle gümüş nanopartiküllü plga nanofiber yara örtüsü.
- Giorgetti, E., Muniz-Miranda, M., Marsili, P., Scarpellini, D. ve Giammanco, F., 2012, Stable gold nanoparticles obtained in pure acetone by laser ablation with different wavelengths, *Journal of nanoparticle research*, 14, 1-13.
- Göppert-Mayer, M., 1931, Über elementarakte mit zwei quantensprüngen, *Annalen der Physik*, 401 (3), 273-294.
- Gu, S., Ren, J. ve Vancso, G., 2005, Process optimization and empirical modeling for electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber precursor of carbon nanofibers, *European polymer journal*, 41 (11), 2559-2568.
- Guisbiers, G., Wang, Q., Khachatryan, E., Arellano-Jimenez, M., Webster, T., Larese-Casanova, P. ve Nash, K., 2014, Anti-bacterial selenium nanoparticles produced by UV/VIS/NIR pulsed nanosecond laser ablation in liquids, *Laser Physics Letters*, 12 (1), 016003.
- Guleria, G., Thakur, S., Shandilya, M., Sharma, S., Thakur, S. ve Kalia, S., 2023, Nanotechnology for sustainable agro-food systems: The need and role of nanoparticles in protecting plants and improving crop productivity, *Plant Physiology and Biochemistry*, 194, 533-549.

- Gündoğdu, Y., Kepçeoğlu, A., KILIÇ, H. Ş., Akbaş, M., Doğan, M. ve Ledingham, K. W., 2014, Femtosaniye Laser Pulsları Yardımıyla Cn^+ ($n=1 \dots 60$) Topak İyonlarının Hem C60 Hemde Grafit Hedefler Kullanılarak Ayır Ayır Üretimi ve Ölçümü (021101)(1-9), *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2), 1-9.
- Gündoğdu, Y., Dursun, S., Gezgin, S. Y. ve Kiliç, H. Ş., 2024, Femtosecond laser-induced production of ZnO@ Ag nanocomposites for an improvement in photocatalytic efficiency in the degradation of organic pollutants, *Optics & Laser Technology*, 170, 110291.
- Günerhan, A., 2021, Havacılıkta kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımının lazer ile yüzey özelliklerinin değiştirilmesi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Gürmen, S., Ebin, B. ve İtü, M., 2008, Nanopartiküller ve üretim yöntemleri-1, *Metallurji Dergisi*, 150, 31-38.
- HAMAMCI, B., 2018, Yeşil kompozitlerde biyopolimerlerin kullanımının önemi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 12-24.
- Han, T., 2007, Electrospinning and nanofibers, *University of Akron*.
- Hartati, S., Zulfi, A., Maulida, P. Y. D., Yudhowijoyo, A., Dioktyanto, M., Saputro, K. E., Noviyanto, A. ve Rochman, N. T., 2022, Synthesis of electrospun PAN/TiO₂/Ag nanofibers membrane as potential air filtration media with photocatalytic activity, *ACS omega*, 7 (12), 10516-10525.
- Hasan, A., Morshed, M., Memic, A., Hassan, S., Webster, T. J. ve Marei, H. E.-S., 2018, Nanoparticles in tissue engineering: Applications, challenges and prospects, *International journal of nanomedicine*, 5637-5655.
- Hasan, S., Khashan, K. S. ve Hadi, A. A., 2023, Antibacterial activity of silver nanoparticles created by one step nanosecond Nd: YAG laser ablation in water, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 14 (2), 025013.
- Havva, A. ve ÇÖLGEÇEN, H., Gümüş Nanopartiküllerinin Biyosentezi ve Biyosensör Materyali Olarak Kullanımı, *Commagene Journal of Biology*, 5 (2), 214-221.
- He, L., Lan, W., Wang, Y., Ahmed, S. ve Liu, Y., 2019, Extraction and characterization of self-assembled collagen isolated from grass carp and crucian carp, *Foods*, 8 (9), 396.
- Henriksen, K. ve Karsdal, M., 2024, Type I collagen, In: Biochemistry of collagens, laminins and elastin, Eds: Elsevier, p. 1-11.
- Hosseini, M. ve Mozafari, M., 2020, Cerium oxide nanoparticles: Recent advances in tissue engineering, *Materials*, 13 (14), 3072.
- Houacine, C., Yousaf, S. S., Khan, I., Khurana, R. K. ve Singh, K. K., 2018, Potential of natural biomaterials in nano-scale drug delivery, *Current Pharmaceutical Design*, 24 (43), 5188-5206.
- Howe, P. D., Dobson, S. ve Organization, W. H., 2002, Silver and silver compounds: environmental aspects, World Health Organization, p.
- Huang, X., Li, C., Wei, T., Liu, N., Zou, L., Bai, C., Yao, Y., Wang, Z., Xue, Y. ve Wu, T., 2023, Ag/TiO₂ nanohybrids induce fibrosis-related epithelial-mesenchymal transition in lung epithelial cells and the influences of silver content and silver particle size, *Science of The Total Environment*, 901, 165875.
- Huang, X., Li, C., Wei, T., Liu, N., Yao, Y., Wang, Z., Hu, Y., Fang, Q., Guan, S. ve Xue, Y., 2024, Oropharyngeal aspirated Ag/TiO₂ nanohybrids: Transformation, distribution and toxicity, *Science of The Total Environment*, 908, 168309.

- Im, J. S., Kim, M. I. ve Lee, Y.-S., 2008, Preparation of PAN-based electrospun nanofiber webs containing TiO₂ for photocatalytic degradation, *Materials Letters*, 62 (21-22), 3652-3655.
- İNAN, A. T. ve ŞEKER, M. M., 2021, Elektrosinning yöntemiyle üretilmiş farklı çaplardaki yapay damarların mekanik özelliklerinin incelenmesi, *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33 (4), 687-693.
- Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S. V. ve Zolfaghari, B., 2014, Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods, *Research in pharmaceutical sciences*, 9 (6), 385.
- Jiang, T., Carbone, E. J., Lo, K. W.-H. ve Laurencin, C. T., 2015, Electrospinning of polymer nanofibers for tissue regeneration, *Progress in polymer Science*, 46, 1-24.
- Juma, M. W., Nancy, M. M., Birech, Z., Ondieki, A. M., Maaza, M. ve Mkhoshtwa, D., 2023, Using laser ablation in liquid (LASIS) method to synthesize silver nanoparticles for SERS applications, *Materials Today: Proceedings*.
- Kan, B., 2011, Düşük yoğunluklu lazer uygulamasının distraksiyon osteogenezisi üzerine etkilerinin histomorfometrik ve radyolojik olarak karşılaştırmalı incelenmesi: Deneysel araştırma.
- Karahan, G., 2017, Elektrosinleme yöntemi ile poliakrilik asit/polietilenimin (PAA/PEI) nanoliflerin hazırlanması ve çeşitli termal spektroskopik ve mikroskopik özelliklerinin incelenmesi, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- KARAHAN, H. ve ÇÖLGEÇEN, H., 2021, The Biosynthesis of Silver Nanoparticles and their Use as a Biosensor Material, *Commagene Journal of Biology*, 5 (2).
- Karanfil, U., 2023, Yüksek Güçlü Fiber Lazer Sistemlerinin Gerçek Zamanlı Analizi İle Verimliliği Artıran Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi, *Bursa Uludag University (Turkey)*.
- Kars, E., 2022, Doğrudan Diyot Lazer Sistemi, *Bursa Uludag University (Turkey)*.
- Kavitha, A., Doss, A., Pole, R. P., Rani, T. K. P., Prasad, R. ve Satheesh, S., 2023, A mini review on plant-mediated zinc oxide nanoparticles and their antibacterial potency, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 102654.
- KAYMAK, N., LASER ABLASYON VE.
- Keirouz, A., Wang, Z., Reddy, V. S., Nagy, Z. K., Vass, P., Buzgo, M., Ramakrishna, S. ve Radacsi, N., 2023, The History of Electrospinning: Past, Present, and Future Developments, *Advanced Materials Technologies*, 2201723.
- Khairani, I. Y., Mínguez-Vega, G., Doñate-Buendía, C. ve Gökce, B., 2023, Green nanoparticle synthesis at scale: a perspective on overcoming the limits of pulsed laser ablation in liquids for high-throughput production, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25 (29), 19380-19408.
- Khan, R., Haider, S., Khan, M. U. A., Haider, A., Abd Razak, S. I., Hasan, A., Khan, R. ve Wahit, M. U., 2023, Fabrication of amine-functionalized and multi-layered PAN-(TiO₂)-gelatin nanofibrous wound dressing: In-vitro evaluation, *International journal of biological macromolecules*, 253, 127169.
- Khan, Z., Kafiah, F., Shafi, H. Z., Nufaiei, F., Furquan, S. A. ve Matin, A., 2015, Morphology, mechanical properties and surface characteristics of electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber mats, *Int. J. Adv. Eng. Nano Technol*, 2, 15-22.
- Kharaghani, D., Khan, M. Q., Shahzad, A., Inoue, Y., Yamamoto, T., Rozet, S., Tamada, Y. ve Kim, I. S., 2018, Preparation and in-vitro assessment of

- hierarchical organized antibacterial breath mask based on polyacrylonitrile/silver (PAN/AgNPs) nanofiber, *Nanomaterials*, 8 (7), 461.
- Khayyam, H., Jazar, R. N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii, K., Fakhrhoseini, S. M., Kumar, S. ve Naebe, M., 2020, PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling, *Progress in Materials Science*, 107, 100575.
- Kiliç, H. Ş. ve Durmuş, H., 2016, YENİ BİR PULS LASER DEPOZİSYON (PLD) SİSTEMİ TASARIMI, ÜRETİMİ VE UYGULAMALARI, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 15 (1), 24-43.
- Kim, H., Tarakeshwar, P., Meneghetti, M., Buseck, P. R. ve Sayres, S. G., 2023, Formation of Au-pseudocarbonynes by self-assembly of carbon chains and gold clusters, *Carbon*, 205, 546-551.
- Kim, J., Reddy, D. A., Ma, R. ve Kim, T. K., 2014, The influence of laser wavelength and fluence on palladium nanoparticles produced by pulsed laser ablation in deionized water, *Solid state sciences*, 37, 96-102.
- Kiyak, Y. E. ve Cakmak, E., 2014, Nanofiber Production Methods, *Electronic Journal of Vehicle Technologies/Tasit Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8 (3).
- Korkusuz, O. B., 2021, Polimer matrisli kompozitlerin lazer ile işlenmesi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kurtuluş, E., 2010, Bazı termoplastik kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi (Turkey)*.
- Kutucu, B., 2010, Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Lee, H. K., Jeong, E. H., Baek, C. K. ve Youk, J. H., 2005, One-step preparation of ultrafine poly (acrylonitrile) fibers containing silver nanoparticles, *Materials Letters*, 59 (23), 2977-2980.
- Lévy, A., de Anda Villa, M., Laurens, G., Blanchet, V., Bozek, J., Gaudin, J., Lamour, E., Macé, S., Mignon, P. ve Milosavljevic, A. R., 2021, Surface chemistry of gold nanoparticles produced by laser ablation in pure and saline water, *Langmuir*, 37 (19), 5783-5794.
- Lim, S. K., Lee, S. K., Hwang, S. H. ve Kim, H., 2006, Photocatalytic deposition of silver nanoparticles onto organic/inorganic composite nanofibers, *Macromolecular Materials and Engineering*, 291 (10), 1265-1270.
- Liu, M., Duan, X.-P., Li, Y.-M., Yang, D.-P. ve Long, Y.-Z., 2017, Electrospun nanofibers for wound healing, *Materials Science and Engineering: C*, 76, 1413-1423.
- Liu, Y., Liu, C.-y., Rong, Q.-h. ve Zhang, Z., 2003, Characteristics of the silver-doped TiO₂ nanoparticles, *Applied Surface Science*, 220 (1-4), 7-11.
- Liveri, V. T., 2006, Controlled synthesis of nanoparticles in microheterogeneous systems, Springer Science & Business Media, p.
- Lo, S., Mahmoudi, E. ve Fauzi, M. B., 2023, Applications of drug delivery systems, organic, and inorganic nanomaterials in wound healing, *Discover Nano*, 18 (1), 104.
- Lukáš, D., Sarkar, A., Martinova, L., Vodsed'áková, K., Lubasová, D., Chaloupek, J., Pokorný, P., Mikeš, P., Chvojka, J. ve Komárek, M., 2009, Physical principles of electrospinning (electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century), *Textile progress*, 41 (2), 59-140.
- Ma, G., Yang, D. ve Nie, J., 2009, Preparation of porous ultrafine polyacrylonitrile (PAN) fibers by electrospinning, *Polymers for Advanced Technologies*, 20 (2), 147-150.

- Ma, S., Jia, J., Tian, Y., Cao, L., Shi, S., Li, X. ve Wang, X., 2016, Improved H₂S sensing properties of Ag/TiO₂ nanofibers, *Ceramics International*, 42 (1), 2041-2044.
- Mahdieh, M. H. ve Fattahi, B., 2015, Size properties of colloidal nanoparticles produced by nanosecond pulsed laser ablation and studying the effects of liquid medium and laser fluence, *Applied Surface Science*, 329, 47-57.
- Maiyalagan, T., Viswanathan, B. ve Varadaraju, U., 2006, Fabrication and characterization of uniform TiO₂ nanotube arrays by sol-gel template method, *Bulletin of Materials Science*, 29 (7).
- Maliszewska, I. ve Czapka, T., 2022, Electrospun polymer nanofibers with antimicrobial activity, *Polymers*, 14 (9), 1661.
- Maneerung, T., Tokura, S. ve Rujiravanit, R., 2008, Impregnation of silver nanoparticles into bacterial cellulose for antimicrobial wound dressing, *Carbohydrate polymers*, 72 (1), 43-51.
- May, A., Kopecki, Z., Carney, B. ve Cowin, A., 2022, Antimicrobial silver dressings: a review of emerging issues for modern wound care, *ANZ Journal of Surgery*, 92 (3), 379-384.
- Merugu, R., Sharma, S. ve Rastogi, M., 2022, An overview of nanotechnological applications in biomedical engineering, *Materials Today: Proceedings*.
- Mohanpuria, P., Rana, N. K. ve Yadav, S. K., 2008, Biosynthesis of nanoparticles: technological concepts and future applications, *Journal of nanoparticle research*, 10, 507-517.
- Mohanty, A. K., Misra, M. ve Drzal, L. T., 2005, Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, CRC press, p.
- Navalakhe, R. M. ve Nandedkar, T. D., 2007, Application of nanotechnology in biomedicine.
- Nirwan, V. P., Kowalczyk, T., Bar, J., Buzgo, M., Filová, E. ve Fahmi, A., 2022, Advances in electrospun hybrid nanofibers for biomedical applications, *Nanomaterials*, 12 (11), 1829.
- Nyabadza, A., Vazquez, M. ve Brabazon, D., 2023, A review of bimetallic and monometallic nanoparticle synthesis via laser ablation in liquid, *Crystals*, 13 (2), 253.
- Odularu, A. T., 2022, Basic principles of electrospinning, mechanisms, nanofibre production, and anticancer drug delivery, *Journal of Chemistry*, 2022.
- Oflaz, K., 2016, Manyetik nanofiber membranlar, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Otari, K., Galave, V., Nadaf, K., Mahadik, S., Mandhare, T., Kulkarni, M., Nangare, P., Vyavahare, R. ve Kashid, P., Nanotechnology: Future Progression of Science and Practice.
- Özdoğan, E., Demir, A. ve Seventekin, N., 2006, Nanoteknoloji ve tekstil uygulamaları, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 16 (3), 160-168.
- Özek, S., Çiftci, Ş., Göde, F., Aksoy, K. ve Aksoy, S. A., 2015, Nanokil Katkılı PAN Nanolif Sentezi ve Karakterizasyonu, *SDU Journal of Science (E-Journal)*, 10 (1), 107-117.
- Özen, A., 2019, Yeşil, kırmızı ve mavi renkli floresans protein katkılı nanofiberlerin üretimi ve karakterizasyonu, *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi*.
- Patel, P. R. ve Gundloori, R. V. N., 2023, A review on electrospun nanofibers for multiple biomedical applications, *Polymers for Advanced Technologies*, 34 (1), 44-63.

- Rahmati, M., Mills, D. K., Urbanska, A. M., Saeb, M. R., Venugopal, J. R., Ramakrishna, S. ve Mozafari, M., 2021, Electrospinning for tissue engineering applications, *Progress in Materials Science*, 117, 100721.
- Rai, M., Yadav, A. ve Gade, A., 2009, Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials, *Biotechnology advances*, 27 (1), 76-83.
- Ramaswamy, U., Mukundan, D., Sreekumar, A. ve Mani, V., 2015, Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using aqueous whole plant extract of *Vernonia cinerea* L. and its biological activities, *Materials Today: Proceedings*, 2 (9), 4600-4608.
- Rao, C. N. R., Müller, A. ve Cheetham, A. K., 2006, The chemistry of nanomaterials: synthesis, properties and applications, John Wiley & Sons, p.
- Ren, X., Meng, X., Chen, D., Tang, F. ve Jiao, J., 2005, Using silver nanoparticle to enhance current response of biosensor, *Biosensors and Bioelectronics*, 21 (3), 433-437.
- Riaz, T., Zeeshan, R., Zarif, F., Ilyas, K., Muhammad, N., Safi, S. Z., Rahim, A., Rizvi, S. A. ve Rehman, I. U., 2018, FTIR analysis of natural and synthetic collagen, *Applied Spectroscopy Reviews*, 53 (9), 703-746.
- Rivera-Chaverra, M. J., Restrepo-Parra, E., Acosta-Medina, C. D., Mello, A. ve Ospina, R., 2020, Synthesis of oxide iron nanoparticles using laser ablation for possible hyperthermia applications, *Nanomaterials*, 10 (11), 2099.
- Rodríguez-Tobías, H., Morales, G. ve Grande, D., 2019, Comprehensive review on electrospinning techniques as versatile approaches toward antimicrobial biopolymeric composite fibers, *Materials Science and Engineering: C*, 101, 306-322.
- Rosenfeld, A., Lorenz, M., Stoian, R. ve Ashkenasi, D., 1999, Ultrashort-laser-pulse damage threshold of transparent materials and the role of incubation, *Applied Physics A*, 69, S373-S376.
- Roy, S., Hasan, I. ve Guo, B., 2023, Recent advances in nanoparticle-mediated antibacterial applications, *Coordination Chemistry Reviews*, 482, 215075.
- Ryu, S.-Y., Chung, J. W. ve Kwak, S.-Y., 2015, Dependence of photocatalytic and antimicrobial activity of electrospun polymeric nanofiber composites on the positioning of Ag-TiO₂ nanoparticles, *Composites Science and Technology*, 117, 9-17.
- Sabancı, A., 2019, Nanofiber kaplı filtre malzemelerinin kalite standartlarının belirlenmesinde veri madenciliği, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- SAGCAN, U. D. A., OMA, S. B. ve Mustafa, A., 2001, Kronik Sigara İçen Koroner Arter Hastalarında.. Agonistlerle İndüklenmiş In-vitro Trombosit Agregasyon Yanıtı, *Türk Kardiyol Dern Arş*, 29, 488-492.
- Salleh, A., Naomi, R., Utami, N. D., Mohammad, A. W., Mahmoudi, E., Mustafa, N. ve Fauzi, M. B., 2020, The potential of silver nanoparticles for antiviral and antibacterial applications: A mechanism of action, *Nanomaterials*, 10 (8), 1566.
- Sanzone, G., Zimbone, M., Cacciato, G., Ruffino, F., Carles, R., Privitera, V. ve Grimaldi, M., 2018, Ag/TiO₂ nanocomposite for visible light-driven photocatalysis, *Superlattices and Microstructures*, 123, 394-402.
- Sekmen, E., 2019, Bazı metal nanopartiküllerin çeşitli biyoelekstreler ile yeşil sentezi, karakterizasyonu ve grafit elektrot modifikasyonunda kullanımı, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Semaltianos, N., 2010, Nanoparticles by laser ablation, *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 35 (2), 105-124.

- Senthamizhan, A., Balusamy, B. ve Uyar, T., 2017, Electrospinning: A versatile processing technology for producing nanofibrous materials for biomedical and tissue-engineering applications, In: *Electrospun materials for tissue engineering and biomedical applications*, Eds: Elsevier, p. 3-41.
- Sethuram, L. ve Thomas, J., 2023, Therapeutic applications of electrospun nanofibers impregnated with various biological macromolecules for effective wound healing strategy—A review, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 157, 113996.
- Shankar, S. S., Rai, A., Ahmad, A. ve Sastry, M., 2004, Rapid synthesis of Au, Ag, and bimetallic Au core–Ag shell nanoparticles using Neem (*Azadirachta indica*) leaf broth, *Journal of colloid and interface science*, 275 (2), 496-502.
- Sharma, S., Poddar, R., Sen, P. ve Andrews, J., 2008, Effect of vitamin C on collagen biosynthesis and degree of birefringence in polarization sensitive optical coherence tomography (PS-OCT), *African Journal of Biotechnology*, 7 (12).
- Sherman, V. R., Yang, W. ve Meyers, M. A., 2015, The materials science of collagen, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 52, 22-50.
- Shi, Y., Yang, D., Li, Y., Qu, J. ve Yu, Z.-Z., 2017, Fabrication of PAN@ TiO₂/Ag nanofibrous membrane with high visible light response and satisfactory recyclability for dye photocatalytic degradation, *Applied Surface Science*, 426, 622-629.
- Shin, Y., Hohman, M., Brenner, M. P. ve Rutledge, G., 2001, Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers, *Applied physics letters*, 78 (8), 1149-1151.
- Sichani, G. N., Morshed, M., Amirnasr, M. ve Abedi, D., 2010, In situ preparation, electrospinning, and characterization of polyacrylonitrile nanofibers containing silver nanoparticles, *Journal of applied polymer science*, 116 (2), 1021-1029.
- Sill, T. J. ve Von Recum, H. A., 2008, Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering, *Biomaterials*, 29 (13), 1989-2006.
- Singh, A., Dubey, S. ve Dubey, H. K., 2019, Nanotechnology: The future engineering, *Nanotechnology*, 6 (2), 230-233.
- Singh, T. D., Singh, T. G. ve Henam, S. D., 2017, Green synthesis, growth and catalytic activity of silver nanoparticles, *Green Materials*, 5 (4), 165-172.
- Sofi, M. A., Sunitha, S., Sofi, M. A., Pasha, S. K. ve Choi, D., 2022, An overview of antimicrobial and anticancer potential of silver nanoparticles, *Journal of King Saud University-Science*, 34 (2), 101791.
- Soylu, B., Femtosaniye Lazer İle İnce Metal Filmler Üzerinde Nano Boyutta Yapılar Oluşturma, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Söylemez, E., 2016, Polivinil alkol/polietilenimin (PVA/PEI) kompozit nanoliflerinin elektrospinning yöntemi ile üretimi, karakterizasyonu ve çeşitli kullanım alanlarına uygulanması, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Spoiala, A., Voicu, G., Ficai, D., Ungureanu, C., Albu, M. G., Vasile, B. S., Ficai, A. ve Andronescu, E., 2015, Collagen/TiO₂-Ag composite nanomaterials for antimicrobial applications, *UPB Sci. Bull. Ser. B*, 77, 275-290.
- Subhan, A., Mourad, A.-H. I. ve Al-Douri, Y., 2022, Influence of laser process parameters, liquid medium, and external field on the synthesis of colloidal metal nanoparticles using pulsed laser ablation in liquid: a review, *Nanomaterials*, 12 (13), 2144.
- Sun, S., Gao, Y., Chen, J. ve Liu, R., 2022, Identification and release kinetics of peptides from tilapia skin collagen during alcalase hydrolysis, *Food Chemistry*, 378, 132089.

- Sunar, B. S. ve Hasçiçek, C., 2017, Elektroeğrilmiş nanoliflerin ilaç taşıyıcı sistem olarak ve doku mühendisliğinde kullanımı, *Marmara Pharmaceutical Journal*, 21 (3), 425-435.
- Süslü, A., 2009, Elektro-eğirme yöntemi ile nanofiber ve nanotüp üretimi, *DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Tański, T., Matysiak, W. ve Krzemiński, Ł., 2017, Analysis of optical properties of TiO₂ nanoparticles and PAN/TiO₂ composite nanofibers, *Materials and Manufacturing Processes*, 32 (11), 1218-1224.
- Tekmen, C., Suslu, A. ve Cocen, U., 2008, Titania nanofibers prepared by electrospinning, *Materials Letters*, 62 (29), 4470-4472.
- Tilaki, R., Iraj Zad, A. ve Mahdavi, S., 2006, Stability, size and optical properties of silver nanoparticles prepared by laser ablation in different carrier media, *Applied Physics A*, 84, 215-219.
- Truong, Y. B., Glattauer, V., Briggs, K. L., Zappe, S. ve Ramshaw, J. A., 2012, Collagen-based layer-by-layer coating on electrospun polymer scaffolds, *Biomaterials*, 33 (36), 9198-9204.
- Tunay, T., Silindirik Odaklı Lazer Hüzmeleri İle Yüzey Temizleme Ve Cam İşleme Çalışmaları, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Uddin, M. N., Jobaer, M., Mahedi, S. I. ve Ali, A., 2023, Protein-based electrospun nanofibers: electrospinning conditions, biomedical applications, prospects, and challenges, *The Journal of The Textile Institute*, 114 (10), 1592-1617.
- Ulusoy, G., 2022, Elektro lif çekimi yöntemi ile balık jelatini/gümüş/PLA'dan nanolifli yüzey üretimi ve karakterizasyonu, *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi*.
- Umair Wani, T., Hamid Rather, A., Saleem Khan, R., Macossay, J., Jadhav, A. H., Srinivasappa, P. M., Abdal-hay, A., Rather, S.-u. ve Sheikh, F. A., 2023, Titanium dioxide functionalized multi-walled carbon nanotubes, and silver nanoparticles reinforced polyurethane nanofibers as a novel scaffold for tissue engineering applications, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 121, 200-214.
- ÜSTÜNDAĞ Doç. Dr. Cem Bülent, S. B., ARSLAN Tutku, AY Buse, ERGÜN Ayşe Seda, TÜRK Mücahit, KORKMAZ Narin, 2020.
- Üstündağ, G. Ç., 2009, Elektrosponning yöntemi ile biyomedikal kullanıma yönelik nanolif yüzey üretimi ve uygulaması, *Bursa Uludag University (Turkey)*.
- Wang, L., Ali, J., Zhang, C., Mailhot, G. ve Pan, G., 2020, Simultaneously enhanced photocatalytic and antibacterial activities of TiO₂/Ag composite nanofibers for wastewater purification, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8 (1), 102104.
- Xia, K., Yamaguchi, K. ve Suzuki, K., 2023, Recent advances in hybrid materials of metal nanoparticles and polyoxometalates, *Angewandte Chemie International Edition*, 62 (1), e202214506.
- Yiğitöl, Z., 2019, Elektro-eğirme metoduyla üretilen silika nanopartiküllü pan nanofiberlerin hidrofobik/hidrofilik özelliklerinin incelenmesi, *Konya Teknik Üniversitesi*.
- Yırtmaz, T., 2022, Kemik Doku Rejenerasyonu İçin Ballıbaba Ekstraktı İle Kaplanmış Gümüş Nanopartikül Katkılı Kitosan/pcl Nanofiber Üretimi ve Karakterizasyonu, *Necmettin Erbakan University (Turkey)*.
- Yokesh Babu, M., Janaki Devi, V., Ramakritinan, C., Umarani, R., Nagarani, N. ve Kumaraguru, A., 2013, Biosynthesis of silver nanoparticles from seaweed associated marine bacterium and its antimicrobial activity against UTI pathogens, *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci*, 2 (8), 155-168.

- Yoruç, A. B. H. ve Uğraşkan, V., 2017, Yeşil Polimerler ve Uygulamaları, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17 (1), 318-337.
- Yusuf, A., Almotairy, A. R. Z., Henidi, H., Alshehri, O. Y. ve Aldughaim, M. S., 2023, Nanoparticles as Drug Delivery Systems: A Review of the implication of nanoparticles' physicochemical properties on responses in biological systems, *Polymers*, 15 (7), 1596.
- Zamel, D. ve Khan, A. U., 2021, New trends in nanofibers functionalization and recent applications in wastewater treatment, *Polymers for Advanced Technologies*, 32 (12), 4587-4597.
- Zarzycki, A., 2014, At source of nanotechnology, *Tecnológicas*, 17 (32), 09-10.
- Zhang, Z., Zhang, L., Wang, S., Chen, W. ve Lei, Y., 2001, A convenient route to polyacrylonitrile/silver nanoparticle composite by simultaneous polymerization–reduction approach, *Polymer*, 42 (19), 8315-8318.
- Zhou, R., Lin, S., Zong, H., Huang, T., Li, F., Pan, J. ve Cui, J., 2017, Continuous synthesis of Ag/TiO₂ nanoparticles with enhanced photocatalytic activity by pulsed laser ablation, *Journal of Nanomaterials*, 2017.
- Zhou, Z., Liu, K., Lai, C., Zhang, L., Li, J., Hou, H., Reneker, D. H. ve Fong, H., 2010, Graphitic carbon nanofibers developed from bundles of aligned electrospun polyacrylonitrile nanofibers containing phosphoric acid, *Polymer*, 51 (11), 2360-2367.