



ANKARA

HACI BAYRAM VELİ ÜNİVERSİTESİ

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİYOJENİK GÜMÜŞ NANOPARÇACIK İÇEREN  
POLİSÜLFON NANOFİBERLERİN MARİN ORTAMDA  
NİKEL VE KOBALT METALLERİNİ MİKROBİYAL  
KOROZYONDAN KORUMA ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

**Furkan DENİZ**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Nalan Oya SAN KESKİN**

**YÜKSEK LİSANS  
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI  
BİYOLOJİ BİLİM DALI**

**HAZİRAN 2022**



**BİYOJENİK GÜMÜŞ NANOPARÇACIK İÇEREN POLİSÜLFON  
NANOFİBERLERİN MARİN ORTAMDA NİKEL VE KOBALT  
METALLERİNİ MİKROBİYAL KOROZYONDAN KORUMA  
ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

**Furkan DENİZ**

**YÜKSEK LİSANS  
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI  
BİYOLOJİ BİLİM DALI**

**ANKARA HACI BAYRAM VELİ ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2022**

## ETİK BEYAN

Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Furkan DENİZ

27/06/2022

Biyojenik Gümüş Nanoparçacık İçeren Polisülfon Nanofiberlerin Marin Ortamda  
Nikel ve Kobalt Metallerini Mikrobiyal Korozyondan Koruma Etkinliğinin

Belirlenmesi

(Yüksek Lisans)

Furkan Deniz

ANKARA HACI BAYRAM VELİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Korozyon birçok endüstri alanında sıklıkla karşılaşılan ciddi bir sorun olup korozyonun önlenmesi önemlidir. Korozyon önleme yöntemleri arasında sıklıkla yüzey kaplama yöntemi kullanılmaktadır. Bu kaplamaların uygulama maliyetlerinin yüksek olması ve özellikle çevre için toksik yan ürünler içermeleri sebebiyle farklı kaplama yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda nanoteknoloji ile üretilen malzemelerin metal ya da alaşımları korozyondan koruma potansiyelleri çalışmalar ile gösterilmiştir. Özellikle, nanoparçacıklar ile yüklenmiş nanofiberlerin (Nf) kullanım potansiyeli yüksektir. Tez çalışmasında, bakteri süpernatantı kullanılarak biyojenik gümüş nanoparçacık (AgNP) üretilmiş, üretilen AgNP içeren Polisülfon (PSU) polimerinden elektro eğirme yöntemi ile eş zamanlı olarak, Nikel (Ni) ve Kobalt (Co) yüzeyleri nanofiber ile kaplanmıştır. Nanoparçacık ve nanofiberler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), Enerji Dağılım X ışını spektrometresi (EDX) ve Zayıflatılmış Toplam Yansıma – Fourier Dönüşümlü Kırmızı Ötesi Spektrometresi (ATR-FTIR) ve Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) ile karakterize edilmiştir. Mikrometre kalınlığında nanofiber ile kaplanan yüzeyler, Ni için yapay deniz suyu ortamında model biyofilm bakterisi olan *Pseudomonas aeruginosa*, Co metali için mineral tuzlu su ortamında *Aeromonas eucrenophila* bakterisine karşı korozyon ölçümleri elektrokimyasal yöntemler ve ağırlık kaybı yöntemleri ile araştırılmıştır. Korozyon sonrası yüzeyler ve nanofiberdeki morfolojik değişim SEM analizi ile görüntülenmiştir. Elektrokimyasal ve yüzey analizleri sonucunda, üretilen ve antibakteriyel özellik gösteren AgNP taşıyan PSU-Nf kaplamaların Ni ve Co metallerini korozyon ve mikrobiyal korozyondan koruduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, üretilen gümüş nanoparçacık içeren polisülfon nanofiberlerin metalleri korozyon ve mikrobiyal korozyondan korunmasında kullanım potansiyeli taşımaktadır.

Bilim Kodu : 20309  
Anahtar Kelimeler : Gümüş nanoparçacık, mikrobiyal korozyon, nanofiber  
Sayfa Adedi : 108  
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nalan Oya SAN KESKİN

Microbial corrosion protection properties of electrospun polysulfone nanofibers containing biogenic silver nanoparticles on Nickel and Cobalt metals in the Marine

Environment

(M.Sc.)

Furkan DENİZ

ANKARA HACI BAYRAM VELİ UNIVERSITY

THE INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

June 2022

### ABSTRACT

Corrosion is a serious problem frequently encountered in many industries; as such, it is important to prevent corrosion. The surface coating method is frequently used among corrosion prevention methods. Due to the high application costs of these coatings and the fact that they contain toxic by-products for the environment, different protection methods are needed. In recent years, the corrosion protection potential of metals or alloys of materials produced with nanotechnology has been demonstrated in studies. In particular, nanofibers (Nf) loaded with nanoparticles have a high potential for use. In the thesis study, biogenic silver nanoparticle (AgNP) was produced using bacterial supernatant. Nickel (Ni) and Cobalt (Co) surfaces were coated with nanofibers from the produced AgNP-containing Polysulfone (PSU) polymer simultaneously with the electrospinning method. Nanoparticles and nanofibers were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), Energy Dispersion X-ray spectrometry (EDX) and Attenuated Total Reflection – Fourier Transform Infrared Spectrometer (ATR-FTIR) and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). Surfaces covered with micrometer-thick nanofibers were investigated for Ni for corrosion measurements against the model biofilm bacteria *Pseudomonas aeruginosa* in an artificial seawater environment, and for Cobalt metal against *Aeromonas eucrenophila* bacteria in a mineral saltwater environment using electrochemical and weight loss methods. The surfaces after corrosion as well as morphological changes in the nanofiber were visualized by SEM analysis. As a result of electrochemical and surface analysis, it was determined that PSU-Nf coatings with AgNP showed antibacterial properties and protected Ni and Co metals from both corrosion and microbial corrosion. As a result, the produced silver nanoparticle-containing polysulfone nanofibers has the potential to be used in the protection of metals from corrosion and microbial corrosion.

Science Code : 20309

Key Words : Silver nanoparticle, microbial corrosion, nanofiber

Page Number : 108

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nalan Oya SAN KESKİN

## TEŞEKKÜR

Gerek sosyal gerek akademik hayatta bana ışık olan, tez çalışmamın belirlenmesinde ve tezin her aşamasında yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Nalan Oya San Keskin'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamda korozyon ve elektrokimyasal analizlerde yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Hasan Nazır hocama teşekkür ederim.

Tez süresi boyunca beni destekleyen TÜBİTAK-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programına teşekkür ederim.

Hayatıma varlıkları ile neşe ve renk katan bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Doğduğum günden bugüne dek her zaman yanımda olan, destekleriyle beni hiç yalnız bırakmayan sevgili aileme teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
2.1. Korozyon.....	5
2.1.1. Korozyon Çeşitleri.....	6
2.1.1.1. Genel korozyon.....	6
2.1.1.2. Elektrokimyasal (galvanik) korozyon.....	6
2.1.1.3. Çukurcuk korozyonu.....	6
2.1.1.4. Çatlak korozyonu.....	7
2.1.1.5. Taneler arası korozyon.....	7
2.1.1.6. Filiform korozyon.....	7
2.1.1.7. Mikrobiyal korozyon.....	7
2.2. Mikrobiyal Korozyon Oluşum Mekanizmaları.....	8
2.2.1. Sülfat İndirgeyen Bakteriler.....	9
2.2.2. Metanojenik Bakteriler.....	9
2.2.3. Demir ve Mangan Oksitleyici Bakteriler.....	9
2.2.4. Kükürt Oksitleyen Bakteriler.....	10
2.2.5. <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....	10

2.3. Biyofilm.....	10
2.4. Mikrobiyal Korozyonun Kazaları.....	12
2.5. Korozyonun Önlenmesinde Kullanılan Yöntemler .....	12
2.6. Nanoteknoloji .....	14
2.7. Nanoparçacıklar.....	14
2.7.1. Metalik Nanoparçacık.....	15
2.7.1.2. Gümüş nanoparçacık.....	15
2.8. Nanofiber .....	16
2.8.1. Nanofiber Üretim Yöntemleri.....	17
2.8.1.1. Fibrilasyon yöntemi ile nanofiber üretimi.....	17
2.8.1.2. Eriyik üfleme (meltblown) yöntemi ile nanofiber üretimi.....	17
2.8.1.3. Bikomponent yöntemi ile nanofiber üretimi .....	18
2.8.1.4. Faz ayırma yöntemi ile nanofiber üretimi .....	18
2.8.1.5. Spunbond yöntemi ile nanofiber üretimi .....	19
2.8.1.6. Kendiliğinden montaj yöntemi ile nanofiber üretimi.....	19
2.8.1.7. Elektroegirme yöntemi ile nanofiber üretimi .....	19
2.9. Kaynak Özetleri.....	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	27
3.1. Materyal.....	27
3.1.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Mikroorganizmalar .....	27
3.1.2. Kullanılan Kimyasal Malzemeler .....	27
3.1.3. Kullanılan Cihazlar .....	28
3.2. Yöntem .....	30
3.2.1. Bakteri İnkübasyonunda Kullanılan Besiyerlerinin Hazırlanması .....	30
3.2.2. Gümüş Nanoparçacıkların Biyosentezi .....	30
3.2.3. %20 AgNP Solüsyon Hazırlanması.....	31

3.2.4. Boncuksuz Nanofiber Üretimi İçin Elektroğirme Parametrelerinin Belirlenmesi .....	31
3.2.5. Gümüş Nanoparçacık İçeren PSU Nanofiberlerin Elektroğirme Yöntemi ile Üretilmesi.....	32
3.2.6. Nanofiber ve AgNp'lerin Karakterizasyonu.....	32
3.2.6.1. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) .....	32
3.2.6.2. Geçirmeli elektron mikroskopu (TEM) .....	32
3.2.6.3. Nanofiberlerin taşıdığı gümüş nanoparçacık miktarının belirlenmesi .....	32
3.2.6.4. Gümüş nanoparçacık boyut belirlenmesi ve zeta potansiyel analizleri .....	33
3.2.6.5. ATR-FTIR analizi .....	33
3.2.7. Kaplama Banyolarının Hazırlanması.....	33
3.2.7.1. Nikel kaplama banyosu .....	33
3.2.7.2. Kobalt kaplama banyosu .....	33
3.2.8. Disklerin Kronoamperometrik Kaplanması.....	33
3.2.9. Korozyon Çalışmasında Kullanılan Hücre ve Elektrotlar .....	33
3.2.10. Metal Disklerin Nanofiber ile Kaplanması.....	34
3.2.11. Sentetik Deniz Suyu Hazırlanması .....	34
3.2.12. Mineral Tuzlu Su Hazırlanması .....	34
3.2.13. Bakterilerin Korozyon Deneyleri İçin Hazırlanması .....	34
3.2.14. Elektrokimyasal Korozyon Analizi .....	35
3.2.15. Korozyon ve Mikrobiyal Korozyon Ortamlarının pH Değerlerinin Takibi .....	36
3.2.16. Kütle Kaybı Deneyleri .....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	37
4.1. Gümüş Nanoparçacık Biyosentezi .....	37
4.2. Disklerin Co ve Ni ile Kaplanması.....	41

4.3. Polisülfon Nanofiber Optimizasyon Çalışması .....	42
4.4. Nanofiberlerin Metal Diskler Üzerine Kaplanması.....	46
4.5. PSU Nanofiberin AgNP İçeriğinin Belirlenmesi .....	48
4.6. Ni ve PSU Nf ile Kaplanmış Ni Disklerin Karakterizasyonu .....	50
4.7. Ni ve PSU Nf ile Kaplanmış Disklerin Korozyon Çalışmaları .....	52
4.8. Co Diskin PSU Nf ile Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu .....	60
4.9. Co ve AgNP PSU Nf ile Kaplanmış Disklerin Korozyon Deneyleri .....	62
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	73
KAYNAKLAR .....	77

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1. Uygulama ve ortam parametrelerinin fiber morfolojisi üzerine etkileri...	21
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan kimyasal malzemeler ve kullanım amaçları.....	27
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları.....	28
Çizelge 4.1. Farklı inkübasyon zamanlarında oluşan gümüş nanoparçacıkların Zeta Potansiyel değerleri (6 h, 8 h, 24 h, 48 h ve 72 h) .....	39
Çizelge 4.2. Düzgün yapıda ve boncuksuz PSU nanofiber üretimi için optimize edilen nanofiber parametreleri (Sıcaklık; 23 °C ± 2, Nem; %35 ± 3) .....	44
Çizelge 4.3. Artan konsantrasyonda gümüş nanoparçacık içeren polisülfon nanofiberlerde bulunan AgNP miktarları.....	49
Çizelge 4.4. Korozyon süresi sonunda disk yüzeyine tutunan bakteri sayıları.....	54
Çizelge 4.5. Sentetik deniz suyu, bakteri inoküle edilmiş ASW ve bakteri + AgNP inoküle edilmiş ASW ortamında bekletilen nikel metalinin ağırlık kaybı (g) ve bu değerlerden hesaplanmış korozyon oranları (mm y <sup>-1</sup> ) .....	55
Çizelge 4.6. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenen korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ), korozyon akım yoğunluğu ( $i_{kor}$ ), anodik ( $\beta_a$ ) ve katodik ( $\beta_c$ ) Tafel değerleri .....	56
Çizelge 4.7. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP1d ve PSU-Nf-AgNP7d immersiyon süresi sonunda Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenen korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ), korozyon akım yoğunluğu ( $i_{kor}$ ), anodik ( $\beta_a$ ) ve katodik ( $\beta_c$ ) Tafel değerleri .....	65
Çizelge 4.8. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP1d ve PSU-Nf-AgNP7d kaplanmış kobalt yüzeylerin eşdeğer devre üzerinden hesaplanan empedans verileri .....	67

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 1.1. Tez çalışmasının şematik özeti.....	3
Şekil 2.1. Mikrobiyal korozyonun oluşması için gereken üç temel unsur.....	8
Şekil 2.2. Biyofilm oluşum basamakları.....	12
Şekil 4.1. <i>Lysinibacillus</i> sp. bakterisi a) mikroskop görüntüsü b) SEM mikrografı.....	37
Şekil 4.2. AgNO <sub>3</sub> solüsyonu- <i>Lysinibacillus</i> sp. NOSK süpernatantın zamana karşı takip edilen UV-Vis absorpsiyon spektrumu ve zaman karşı renkteki değişim.....	38
Şekil 4.3. Gümüş nanoparçacık boyut dağılım histogramı .....	39
Şekil 4.4. Gümüş nanoparçacıkların TEM mikrografları (a-c) ve (d) SAED analizi .....	40
Şekil 4.5. Gümüş nanoparçacık üretiminde kullanılan ekstrasellüler biyomoleküllerin ATR-FTIR spektrumu .....	41
Şekil 4.6. Kobalt disk yüzeyinin SEM mikrografı ve EDX analizi .....	41
Şekil 4.7. Nikel disk yüzeyinin SEM mikrografı ve EDX analizi .....	42
Şekil 4.8. ai-ii) 10 cm bi-bii) 11 cm ve ci-cii) 12 cm iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafenin PSU nanofiberin çapına etkisinin belirlenmesi amacıyla SEM analizi ile elde edilen mikrograflar.....	45
Şekil 4.9. Üretilen polisülfon nanofiberlerinin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikrografları (a-d).....	46
Şekil 4.10. Nikel yüzeylere PSU-Nf ile kaplama yapılması için en uygun toplayıcının seçilmesi.....	47
Şekil 4.11. Nikel disk yüzeylerin 5 ve 10 dk polisülfon nanofiber ile kaplanması sonrasında kaplama kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla çekilmiş upright mikroskop görüntüleri .....	47
Şekil 4.12. %1, %3 ve %5 AgNP içeren polimerlerin renk değişimleri (ai, bi, ci), %1 (aii, aiii, aIV), %3 (bii, biii, bIV) ve %5 (cii, ciii, cIV) AgNP içeren Nf'lerin SEM mikrografları, ve EDX haritalaması (aVI, bV <sub>1</sub> , cVI) .....	49
Şekil 4.13. Artan konsantrasyonda gümüş nanoparçacık içeren polisülfon nanofiberlerin TEM mikrografları.....	50
Şekil 4.14. Nikel disk, PSU polimer, PSU-Nf ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf'lerin ATR-FTIR analiz sonuçları .....	51
Şekil 4.15. Nikel disk, PSU-Nf ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanan yüzeylerin (a) temas açıcı fotoğrafları (b) temas açısı değerleri.....	52

Şekil 4.16. Sadece nikel, PSU-Nf ile kaplanmış nikel ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanmış nikel metalinin abiyotik ve <i>Pseudomonas aeruginosa</i> içeren ASW ortamında 3 gün süresi sonunda korozyon analiz ortamında görüntüleri.....	53
Şekil 4.17. Sadece nikel, PSU-Nf ile kaplanmış nikel ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanmış nikel metalinin biyotik ve abiyotik ASW ortamında ölçülen pH değerleri .....	53
Şekil 4.18. (a) abiyotik ve (b) biyotik ASW ortamında bekletilen Ni disk, PSU-Nf ve AgNp eklenmiş PSU-Nf ile kaplanmış disklerin Tafel polarizasyon eğrileri .....	55
Şekil 4.19. Biyotik ve Abiyotik koşullarda ASW ortamında bekletilen Ni disk, PSU-Nf ve AgNp eklenmiş PSU-Nf ile kaplanmış disklerin (a) Nyquist (b,c) Bode diyagramları.....	57
Şekil 4.20. Biyotik ve Abiyotik koşullarda ASW ortamında bekletilen Ni disk, PSU-Nf ve AgNp eklenmiş PSU-Nf ile kaplanmış disklerin eş değer devresi ve modeli .....	58
Şekil 4.21. Nyquist eğrilerinden hesaplanan yük transfer direnci değerleri.....	59
Şekil 4.22. Korozyon analizleri sonrası yüzeyde meydana gelen değişimleri gösteren SEM mikrografları .....	60
Şekil 4.23. Sabit kollektör ile Co metal yüzeyinin PSU-Nf kaplanması sonucu disklerin yüzey fotoğrafları.....	61
Şekil 4.24. Döner kollektör ile Co metal yüzeyinin PSU-Nf kaplanması sonucu disklerin yüzey fotoğrafları.....	61
Şekil 4.25. Sadece Co, PSU-Nf ile kaplanmış yüzey ve %20 AgNP ile yüzeyi modifiye edilmiş PSU-Nf'in temas açısı değerleri .....	62
Şekil 4.26. (a) Sadece kobalt, PSU-Nf ile kaplanmış kobalt ve %20AgNP ile fonksiyonelleştirilen PSU-Nf ile kaplanmış kobalt metalinin abiyotik ve <i>Aeromonas eucrenophila</i> içeren MSM ortamında t = 0 ve t = 24 saat süresi sonunda disklerin görüntüleri .....	63
Şekil 4.27. Abiyotik ve biyotik korozyon ortamlarında pH değişimleri.....	63
Şekil 4.28. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf, PSU-Nf-AgNP1d ve PSU-Nf-AgNP 7d yüzeylerin polarizasyon eğrileri .....	64
Şekil 4.29. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP1d ve PSU-Nf-AgNP7d kaplanmış kobalt yüzeylerin abiyotik (a) ve (b) biyotik ortamlarda elde edilen Nyquist eğrileri .....	66

Şekil 4.30. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP1d ve PSU-Nf-AgNP7d kaplanmış kobalt yüzeylerin eş değer devresi ve modeli .....	66
Şekil 4.31. %20 AgNP solüsyonu içerisinde 1 gün süresi ile bekletilen PSU-Nf kaplı yüzeyin SEM mikrografları .....	68
Şekil 4.32. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP kobalt yüzeylerin abiyotik ortamlarda korozyon immersiyonları sonrasında yüzeydeki değişimler .....	69
Şekil 4.33. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP kaplanmış kobalt yüzeylerin biyotik ortamlarda korozyon immersiyonları sonrasında yüzeydeki değişimler.....	70
Şekil 4.34. PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP ile kaplanmış kobalt yüzeylerin şematik deney özeti .....	71

## RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 2.1. Elektroğirne cihazı.....20



## KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>AgNP</b>	Gümüş Nanoparçacık
<b>EIS</b>	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
<b>FT-IR</b>	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>ICP-MS</b>	Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi
<b>LSV</b>	Lineer Taramalı Voltametri
<b>NA</b>	Nutrient Agar
<b>NB</b>	Nutrient Broth
<b>OCP</b>	Açık Devre Potansiyeli
<b>OD</b>	Optik Yoğunluk
<b>PSU</b>	Polisülfon
<b>SAED</b>	Seçilmiş Elektron Kırınımı
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>TEM</b>	Geçirimli Elektron Mikroskobu

## 1. GİRİŞ

Korozyon; ulaşım, petrol sahaları, inşaat, gemicilik, sağlık ve güvenlik gibi birçok endüstri alanında sıklıkla karşılaşılan ve hizmetleri etkileyen bir sorundur (Videla vd., 2005). Korozyonun kabul gören birçok tanımı bulunmaktadır. Yaygın olarak kabul gören korozyon tanımına göre metal ve alaşımların buldukları çevre ile girdiği etkileşimler sonucu fiziksel, kimyasal ve elektrokimyasal olarak özelliklerini yitirerek kullanım dışı kalmasıdır. Korozyonun çeşitlerinden biri olan Mikrobiyal Korozyon ise mikroorganizmaların yaşamsal aktiviteleri veya açığa çıkan metabolitleri sonucu metal ve alaşımlarda görülen korozyon olarak tanımlanmaktadır (Liu vd., 2020). Mikrobiyal korozyon sıklıkla biyofilm varlığı ile ilişkilidir. Biyofilm, mikroorganizmaların yüzeylere tutunarak meydana getirdikleri dış etmenlere karşı koruma sağlayan yapılardır (Chen vd., 2018). Biyofilm oluşan yüzeylerde sıklıkla korozyonun hızlandığı bilinmektedir (Hou vd., 2019).

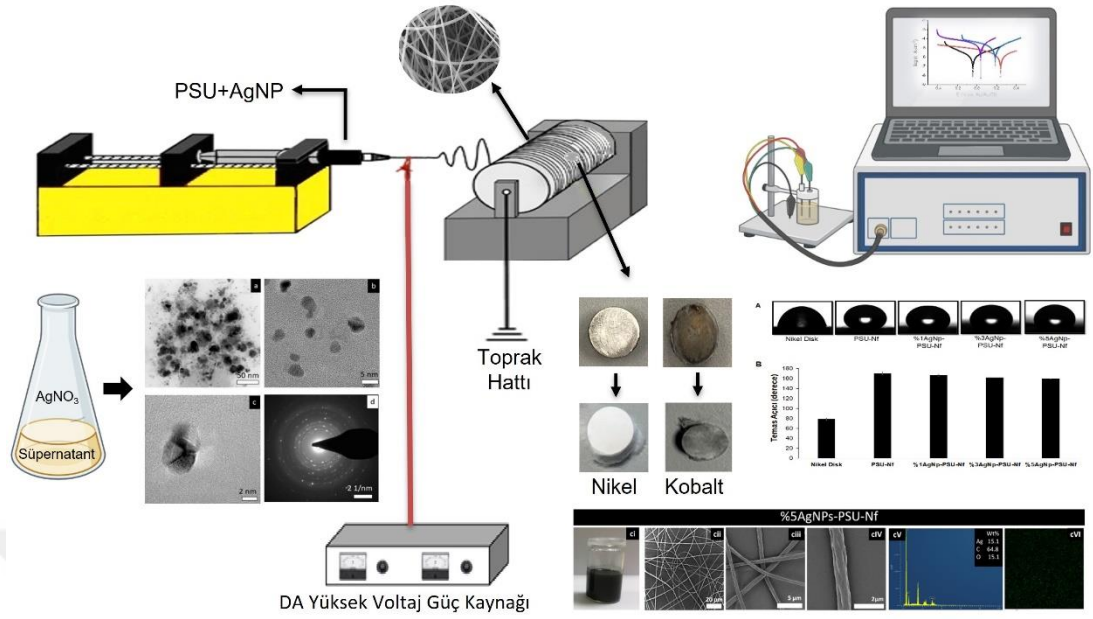
Korozyon, Dünya’da ve Ülkemizde her yıl milyarlarca doları bulan zarara neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar ile Dünya genelinde 2021 yılında korozyonun maliyetinin 2,5 trilyon dolar olduğu belirlenmiştir (<https://www.rcinet.ca/en/2021/04/24/corrosion-costs-the-world-an-estimated-2-5-trillion-usd>). Buna ek olarak korozyondan koruma çalışmaları ile korozyon maliyetlerinden %15 ile %35 tasarruf sağlayabileceği tahmin edilmektedir (<http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>). Ekonomik maliyetinin dışında korozyon, hizmet sektöründe aksamalara, kullanılan inhibitörlerden dolayı çevre kirlenmesine ve sınırlı olan metal kaynaklarının hızla tükenmesine yol açmaktadır. Dünyada üretilen toplam metal miktarının %10’nun korozyon nedeniyle yok olduğu tahmin edilmektedir.

Ciddi ekonomik ve hizmet sorunlarına yol açan korozyondan metal ve alaşımlarının korunması için kimyasal yöntemler, korozyon inhibitörleri, biyositler, elektrokimyasal yöntemler ve sıklıkla kaplamalar kullanılmaktadır (Yadav vd., 2018). Klasik yöntemlerin, uygulama zorluğu, maliyet, bakım ve çevreye zararlı kimyasal kullanımı sebebiyle kullanımları sınırlıdır. Bu nedenle, araştırmalar, sürdürülebilir, çevre dostu yöntem ve ürünler üzerine yoğunlaşmıştır. Son yıllarda artmakta olan çevresel problemlerin önüne geçebilmek için kullanım potansiyeli yüksek olan nano teknolojik proses ve üretilen malzemelerin üstün özellikleri dikkat çekmektedir. Nano malzeme

üretim teknolojilerinden biri olan elektroğirme yöntemi ile nano ölçekte fiberler üretilebilmektedir. Bu yöntemin kurulum kolaylığı, düşük uygulama maliyeti, üretim kolaylığı ve kullanılan polimerin çok çeşitli olması gibi avantajları bulunmaktadır. Elektroğirme yöntemi ile üretilen nanofiberler, geniş yüzey alanı, gözenekli yapısı, hafif olmaları ve fonksiyonelleştirilebilmesi gibi avantajlar sunmaktadır. Metal ve alaşımları korozyondan korumak amacıyla nanofiber kaplamaların kullanım potansiyelleri mevcuttur. Nanofiber kaplamalar yüzey ile malzemenin bulunduğu ortam arasında bir ara yüzey oluşturarak malzemeleri korozyondan korumaktadır (Makhlouf vd., 2011). Bununla birlikte, antimikrobiyal etkili nanoparçacık taşıyan nanofiberler üretilmektedir. Özellikle, gümüş nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı/hacim oranı özellikleri sayesinde hem gram negatif hem de gram pozitif bakterilere karşı yüksek antimikrobiyal etki göstermektedir. Yüzeylerin AgNP içeren kaplama ile kaplanması sayesinde bakteri tutunmasının engellendiği ve biyofilm oluşumu karşı etkili olduğu bildirilmiştir (Gurunathan vd., 2014; Jiang vd., 2004).

Endüstride birçok alanda farklı metal ve alaşımlar kullanılmaktadır. Kullanılan malzemeler ürünün ve ortamın özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Bu metallere, Ni metali hem doğada tek başına bulunabilen hem de yüzlerce alışımda bileşen olarak kullanılan korozyona dayanıklı bir metal ve kaplama ürünüdür (Hihara vd., 2013). Co metali yüksek erime sıcaklığı, yüksek sıcaklıklardaki sağlamlığı ile paslanmaz çelik üretimi, kesim malzemesi, manyetik özelliği sayesinde mıknatıs, süper alaşım, yüzey kaplama, yüksek hız çelikleri ve özellikle uçak gaz türbin motoru üretiminde kullanılmaktadır.

Tez çalışmasının şematik özeti Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Tez çalışmasının şematik özeti

Bu tez çalışmasının birinci aşamasında diskler elektrokimyasal olarak Ni ve Co ile kaplanmıştır. Kaplanan disklerin karakterizasyonu, Taramalı Elektron Mikroskobu ve EDX analizleri ile yapılmıştır.

Tezin ikinci aşamasında, bakteri süpernatantı kullanılarak biyojenik AgNP üretilmiş ve üretilen AgNP'lerin karakterizasyonu, Geçirimli Elektron Mikroskobu, Dinamik ışık saçılımı ve Zeta potansiyeli ve Zayıflatılmış Toplam Yansıma–Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi çeşitli yöntemler ile analiz edilmiştir.

Tezin üçüncü aşamasında polisülfon polimerinden boncuksuz ve homojen dağılımlı nanofiber üretimi için optimizasyon çalışması yapılmış ve elektroçürme yöntemi ile eş zamanlı Ni ve Co diskler, PSU-Nf ile kaplanmıştır. Nf kaplamanın tüm yüzeyi kaplaması için farklı zaman aralıkları ve farklı kollektörler kullanılarak uygun kaplama süresi ve kalınlığı belirlenmiştir. PSU-Nf kaplamanın fonksiyonelleştirilmesi amacıyla, AgNP eklenerek, AgNP taşıyan PSU-Nf kaplama üretilmiştir.

Tezin son aşamasında ise kaplama yapılmayan, PSU-Nf ile kaplanan ve AgNP taşıyan PSU-Nf ile kaplanan Ni ve Co disklerin biyotik ve abiyotik şartlarda elektrokimyasal korozyon analizleri tamamlanmıştır. Ortamların pH değişimleri takip edilmiş ve korozyon sonrası yüzey değişimleri ise SEM ile araştırılmıştır.

Özetle, tez çalışmasında, biyojenik yollar ile elde edilen ve mikroorganizmalara karşı güçlü antimikrobiyal etki gösteren AgNP ile nanofiberlerin metalleri korozyon ve

mikrobiyal korozyondan koruması, elektrokimyasal, mikrobiyolojik analizler ve görüntüleme teknikleri ile araştırılmıştır. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre Ni ve Co yüzeylerde kaplama olarak kullanılan PSU-Nf yapılarının metal yüzeylerini korozyon ve mikrobiyal korozyondan koruma potansiyeline sahip olduğu bulunmuştur.

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir (Proje 218M508).



## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Korozyon

Korozyonun birden fazla tanımı olmakla birlikte genel anlamda korozyon, metallerin çevreleriyle kimyasal, biyokimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlara girmesi sonucunda metalik özelliklerini kaybetmesi durumudur (Davis vd., 2001). Bu tanımın dışında korozyon Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) 8044:2020 standartlarına göre malzemelerin buldukları ortam ile girdikleri fizikokimyasal etkileşimler sonucu ortamın ya da parçası oldukları sistemlerin fonksiyonlarını kaybetmesi olarak tanımlanmıştır. Metallerin büyük çoğunluğu atmosfer ve suyun etkisine dayanıklı olmadıkları için normal koşullarda korozyona uğrayabilmektedir. Metallerin korozyona uğrama hızı içinde bulunduğu ortama, kullanım süresine, ortam sıcaklığına, ortamın nemine, oksijen miktarına, metalin hareketi, sistemin tasarımı, mikroorganizma varlığı ve ortam pH'ına göre değişmektedir.

Bütün metaller doğada buldukları en kararlı halleri olan mineral hale dönme eğilimindedirler. Bu mineraller gerekli işlem proseslerinden geçirilerek metal haline getirilir. Bu nedenle korozyon, enerji açığa çıkması ile doğal olarak meydana gelir (Jie vd., 2016).

Elektrokimyasal korozyon, bir elektrolitin ara yüzeyinde gerçekleşen elektrik yüklerinin aktarımını içeren indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarının bütünüdür. Elektrokimyasal korozyon metal yüzeyleri arasında veya bir metalden diğerine doğru elektron transferi şeklinde olabilir (Hack vd., 2010).

Korozyon sürecinde en önemli etken elektrolittir. Elektrik akımını ileten ve içerisinde iyon bulduran maddeler elektrolit olarak tanımlanır. Elektrolitin olmadığı alanda korozyon olayı gerçekleşmez. Örneğin tuzlu su çok iyi bir elektrolittir (Amanni vd., 2015; Hack vd., 2010).

Günümüzde endüstride sıklıkla kullanılan metaller için korozyon büyük bir sorun teşkil etmektedir. Korozyon şehir altyapıları, demiryolları, limanlar, inşaatlar, ulaşım araçları, gıda, elektrik, savunma, su ve doğalgaz boruları gibi hemen her alanda karşımızda çıkmaktadır (Zhu vd., 2016). Bu durumun ülkelere maliyeti oldukça fazladır. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) çalışmalarını yürüten Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliği (NACE) tarafından yayınlanan rapora göre

korozyonun takip edilebilen zararının 2,5 trilyon dolar olduğu hesaplanmıştır. Bu ekonomik zararın devletlerin gayri safi milli hasılasına oranı %3,4 olarak açıklanmıştır (<http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>). 2022 verilerine göre yapılan hesaplamalarda bu zararın ABD için 1,15 trilyon dolar olarak, Türkiye için ise 36 milyar dolardır.

### **2.1.1. Korozyon Çeşitleri**

Korozyon, kullanılan metale, içinde bulunduğu ortama hatta koruma için kullanılan yöntemeye kadar birçok etkenle farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Genel korozyon, elektrokimyasal (galvanik) korozyon, çukurcuk korozyonu, çatlak korozyonu, taneler arası korozyon, filiform ve mikrobiyal korozyon başlıca korozyon tipleridir (Davis vd., 2000).

#### **2.1.1.1. Genel korozyon**

Bir metalin bütün yüzeyinin aynı hızda ve şekilde korozyona uğramasıdır. Metalin hiçbir noktasında korozyon oranı değişiklik göstermez. Atmosferde bulunan çeliğin paslanması, deniz suyundaki bakır alaşımların korozyonu genel korozyona örnektir. Tüm metallerde görülebilir ve en çok karşılaşılan korozyon tipidir. Buna karşın en az zarara sebebiyet veren korozyon türüdür (Uhlig vd., 2011).

#### **2.1.1.2. Elektrokimyasal (galvanik) korozyon**

Birbiriyle temas halinde bulunan potansiyel farkları fazla olan metaller arasında oluşan korozyon çeşitidir. Elektrokimyasal korozyon yalnızca iki farklı metal arasında oluşmaz, farklı şekillerde işlenmiş aynı metaller arasında da görülebilir. Elektrokimyasal korozyonda korozyon hızı anot ve katot arasındaki potansiyel farka bağlıdır. Elektrolitin iletkenliğine bağlı olarak korozyon daha geniş alanlara yayılır. (Pourbaix vd., 2012; Revie vd., 2000).

#### **2.1.1.3. Çukurcuk korozyonu**

Metal malzemede oyukların veya deliklerin oluştuğu lokal bir korozyon şeklidir. Çukurcuk korozyonu metal yüzeyinden dik bir şekilde malzemenin içine doğru hareket eder. Malzeme kaybına sebebiyet vermemesine rağmen malzemelerde delinme/kırılma gibi sorunlara yol açabildiği için oldukça riskli bir korozyon şeklidir. Çukurcukların çapı ve derinliği malzemenin türüne, ortama ve ortam şartlarına göre

farklılık göstermektedir. Ayrıca çukurcuk korozyonun fark edilmesi oldukça güçtür (Frankel vd., 2003).

#### **2.1.1.4. Çatlak korozyonu**

Metal yüzeyinde bulunan genellikle tasarımsal hata veya kaza sonrasında ortaya çıkan çatlaklara elektrolitin ulaşması sonucu oluşan korozyon şeklidir. Bu şekilde oluşan korozyon yüzeye göre daha hızlı ilerlemektedir (Davis vd., 2000).

#### **2.1.1.5. Taneler arası korozyon**

Metaller küçük kristal taneciklerinden oluşmaktadır. Her bir tane birbirleriyle sıralı bir şekilde dizilmiştir. Belli şartlarda sıralı taneler arasındaki küçük alanlar anodik oldukları için daha aktiftirler. Elektrolitin tane sınırlarından nüfuz etmesiyle oluşan korozyon şeklidir. Genellikle alaşım malzemelerde görülür (Aydoğdu vd., 2016).

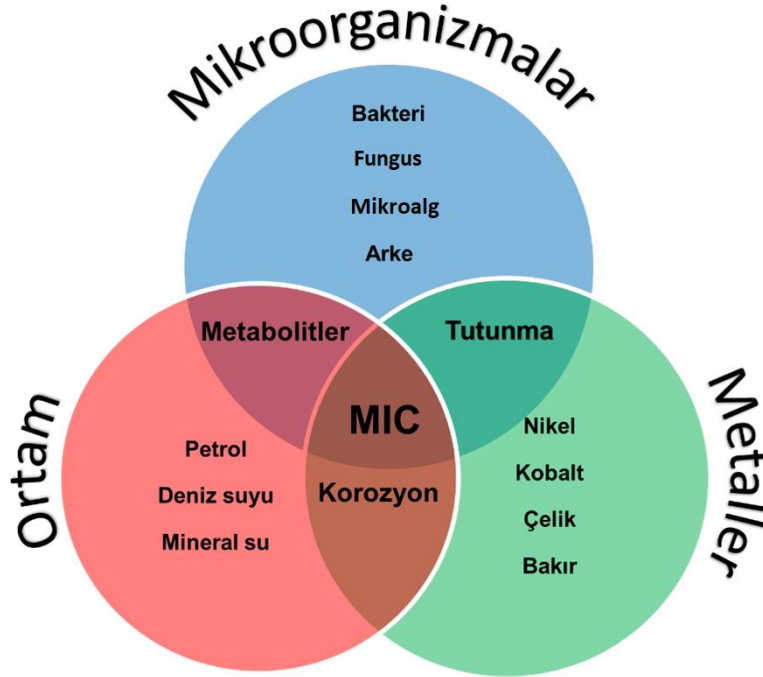
#### **2.1.1.6. Filiform korozyon**

Metal yüzeyine yapılan boya veya kaplama gibi koruma tabakasının altında meydana gelen korozyon şeklidir. Filiform korozyon boya veya kaplamanın zayıf olduğu alandan başlar, bu durumda koruma materyali özelliğini yitirerek oksijen ve su malzemeye ulaşır. Bu korozyon şeklinde korozyon kaplama altında yayılarak devam eder (Slabaugh vd., 1954).

#### **2.1.1.7. Mikrobiyal korozyon**

Bakteriler, funguslar, mikroalgler ve arkeler dahil olmak üzere mikroorganizmaların sorumlu olduğu korozyon şeklidir. Mikroorganizma, malzeme/ortam arasındaki reaksiyonlara bağlı olarak korozyonu doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebilir. Mikroorganizmaların tümünün oluşturduğu korozyonu tanımlamak için Mikrobiyal korozyon terimi kullanılmaktadır (Stott vd., 1993). Mikrobiyal korozyonun kısaltması olan MIC ise yaygın olarak kullanılmakta ve mikroorganizmaların varlığında meydana gelen korozyonu ifade etmektedir.

Mikrobiyal korozyon başlıca 3 temel unsurun (Şekil 2.1.) birleşmesinin bir sonucudur: Mikroorganizmalar, ortam ve metaller. Mikrobiyal korozyon ve abiyotik korozyon çoğunlukla aynı anda meydana gelmesinden dolayı MIC mekanizmasını tanımlamak daha da karmaşıktır.



Şekil 2.1. Mikrobiyal korozyonun oluşması için gereken üç temel unsur

## 2.2. Mikrobiyal Korozyon Oluşum Mekanizmaları

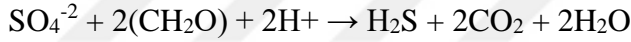
Mikrobiyal korozyon mekanizması mikroorganizma/metal/elektrolite özgüdür (Jigletsova vd., 2004). Mikrobiyal korozyon elektrokimyasal korozyon ile eş zamanlı olarak meydana gelmektedir (Kim vd., 2015). Mikrobiyal korozyonda Kükürt Oksitleyen Bakteriler (SOB), demir ve mangan bakterileri, Sülfat İndirgeyen Bakteriler (SRB) önemli rol oynamaktadır. Mikrobiyal korozyonda mikroorganizmaların faaliyetleri sonucu sülfürler ve asitler gibi bazı bileşenler ortaya çıkmakta olup bu bileşenler korozyonun hızını doğrudan etkilemektedir (Videla vd., 1996). Bu sebeple, çözeltildeki oksijen miktarı, pH, asidik bileşenler gibi agresif metabolitlerin varlığı önemlidir (Fang vd., 2002; Videla vd., 2009). Bazı durumlarda ise mikroorganizmalar direkt olarak elektrokimyasal tepkimelere katılabilirler (Liu vd., 2020). Ayrıca önemli bir korozyon oluşum mekanizması ise biyofilm oluşmasının sonucunda meydana gelmektedir (Liu vd., 2007; Santana Rodriguez vd., 2006). Mikrobiyal korozyonda mikroorganizmaların yüzeye tutunarak meydana getirdikleri biyofilm tabakası içerisinde bakterilerin üremesi ve metabolik faaliyetleri sonucunda ortam ve biyofilm tabakasının bağlandığı yüzey arasında değişen oksijen konsantrasyonu ile malzeme yüzeyini anot haline getirirken biyofilm dışında kalan yüzeyi katot haline getirir. Bu durumda metal korozyona uğrar. Bunun dışında mikroorganizmalar metal yüzeylerinde bulunan kaplamaları tahrip ederek koruyucu

kaplamayı ortadan kaldırdıktan pasif olarak da korozyona sebebiyet vermektedirler (Videla 1996).

### 2.2.1. Sülfat İndirgeyen Bakteriler

Sülfat indirgeyen bakteriler doğada birçok bölgeden izole edilebilir ve mikrobiyal korozyonda en çok karşılaşılan bakteri türüdür. Anaerobik koşullarda elektron alıcısı olarak sülfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), sülfid (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) gibi kükürt bileşiklerini enerji elde etmek için toksik ve korozif H<sub>2</sub>S (hidrojen sülfüre) indirger. Ortamda H<sub>2</sub>S varlığı ve artışı SRB'nin gelişmesi ile ilişkilendirilir (Madigan vd., 2007). Sülfat indirgeyen bakterilerin aktivitesi sonucu metal ve alaşımlarda genellikle çukurcuk tipi korozyon meydana gelir (Chang vd., 2008; Tang vd., 2009). Sülfat indirgeyen bakterilerin korozyonu sonucunda metal yüzeyinde demir sülfür (FeS) birikimi sonucu siyah renkli ve kokulu bir çökelti meydana gelir (Madigan vd., 2007). Sülfat indirgeyen bakteriler doğada ve endüstride kullanılan sistemlere ciddi zararlar vermektedir (Postgate vd., 1984).

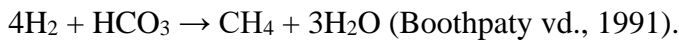
Sülfat indirgeyen bakterilerin H<sub>2</sub>S üretme mekanizması aşağıda verilmiştir:



Mikrobiyal korozyonda sıklıkla karşılaşılan SRB'lere *Desulfovibrio*, *Desulfobacter* ve *Desulfoformaculum* cinsi bakteriler örnek verilebilir.

### 2.2.2. Metanojenik Bakteriler

Anaerobik koşullarda yaşayan bu bakteriler H<sub>2</sub>'yi elektron vericisi olarak, pürivat, CO<sub>2</sub> ve asetatları elektron alıcısı olarak kullanır ve metan (CH<sub>4</sub>) üretir. Birçok metanojenik bakteri elektron kaynağı olarak demir ve diğer metalleri kullanmaktadır (Boothpaty vd., 1991). Metanojenik bakterilerin metan üretme mekanizması aşağıda verilmiştir.



### 2.2.3. Demir ve Mangan Oksitleyici Bakteriler

Demir bakterileri, demir veya mangan iyonlarını okside edebilen bir grup aerobik bakteri olarak tanımlanmaktadır. Demir ve mangan oksitleyici bakteriler, yüzeylere metal oksitleri tutturma ve biriktirme yoluyla metallerin pasif filmlerinin zarara uğratar. Bu oksitler, pasif metallerin korozyon potansiyelini değiştirme eğiliminde

olup, korozyon potansiyelinde artışa neden olarak, pasif metallerin lokalize korozyona uğramalarına neden olabilir. Demir ve mangan bakterileri, demiri demir iyonu formuna oksitleyerek son derece agresif demir klorürler üretirler (Chan vd., 2011).

#### **2.2.4. Kükürt Oksitleyen Bakteriler**

Enerji ihtiyacını indirgenmiş kükürdün kısmi oksidasyonu yoluyla elementel kükürt ( $S^0$ ) veya suda sülfürik asite ( $H_2SO_4$ ) dönüştüren anaerob bakterilerdir. *Beggiatoa* ve *Paracoccus*, SOB'nin iki klasik örneğidir. Aerobik kükürt oksitleyici prokaryotlar, *Acidianus*, *Acidithiobacillus*, *Aquaspirillum*, *Aquifex*, *Bacillus*, *Beggiatoa*, *Methylobacterium*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Starkeya*, *Sulfolobus*, *Thermithiobacillus*, *Thiobacillus* ve *Thiothrix* gibi cinslere aittir. Bu bakteriler betonun suya batmamış bölümlerinde oluşan biyofilmde yaşayan mikroorganizmaların betona zararlı olan sülfürik asit salgıladığında meydana gelen beton kanalizasyonlarının biyolojik olarak bozulmasına neden olur (Pokorna vd., 2015).

#### **2.2.5. *Pseudomonas aeruginosa***

*Pseudomonas aeruginosa* gram negatif, aerobik bir bakteridir. Doğada hemen hemen her yerde bulunabilir. Mikrobiyal korozyonun başlamasında önemli bir rol oynamaktadır. Model biyofilm bakterisi olan *Pseudomonas aeruginosa*, biyofilmin bütün evrelerinde varlığı bilinmektedir (Urquidi-Macdonald vd., 2014).

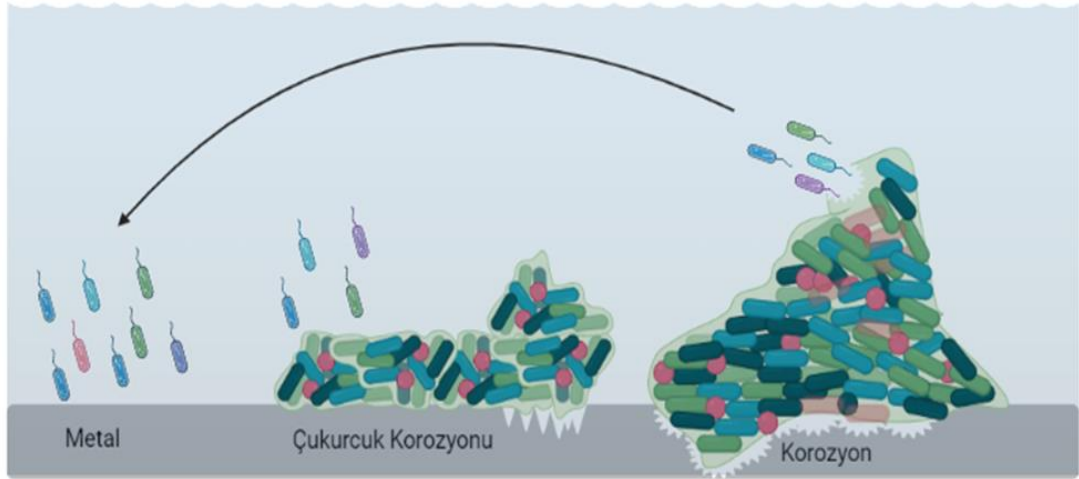
### **2.3. Biyofilm**

Mikrobiyal korozyonun oluşmasına sebep olan etmenlerin başında biyofilm oluşumu gelmektedir. Mikroorganizmaların canlı veya cansız bir yüzeye tutunması ve hücre dışı polimerik madde (EPS) üretimi ile oluşturdukları yapıya biyofilm denilmektedir (Zhang vd., 2020). Biyofilmler; lipid, protein, polisakkarit, nükleik asit ve DNA gibi bir veya daha fazla karmaşık biyokimyasal yapıdan oluşan bir yaşam formudur. Biyofilmin geliştiği ortama bağlı olarak biyofilm bileşiminde mineral kristalleri, korozyon partikülleri veya kan bileşenleri gibi hücresel olmayan malzemeler de bulunabilir (Shkodenko vd., 2020). Bakterilerin birçoğu biyofilm üretebilmektedir. Bakterilerin biyofilm oluşturabilmek için kullandığı mekanizmalar çevresel şartlara ve suş özelliklerine göre değişiklik göstermektedir (Lopez vd., 2010). Biyofilm içerisindeki sesil bakteriler zorlu çevre koşullarına dayanmak için metabolik aktivitesi, genetik adaptasyon ve iletişimini değiştirmiştir (Zhang vd., 2020). Bu sayede

planktonik bakterilere göre çevresel etmenlere karşı daha dayanıklıdır. Planktonik bakterileri öldüren antibiyotik ve antiseptik ilaçlar biyofilm içindeki bakterileri daha az etkilemektedir.

Biyofilmler genellikle 10-30 µm kalınlığındadır. Biyofilm bileşimini %5-35'ini bakteriler oluştururken geri kalanın büyük çoğunluğunu su ve EPS oluşturmaktadır (Sleytr vd., 1997). EPS yapısındaki hidrojen bağları sayesinde su barındırır bu sayede biyofilm tabakasına hem difüzyon sürelerinde avantaj sağlamakta hem de jelatinimsi ve kaygan bir yapı kazandırmaktadır (Allison vd., 2003; Sutherland vd., 2001).

Biyofilmin oluşması ve gelişmesi sürecinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler rol oynamaktadır. Şekil 2.2'de biyofilmlerin oluşum basamakları gösterilmiştir. Genellikle 5 basamakta biyofilm oluşumu gerçekleşmektedir (Characklis vd., 1981). İlk aşamada planktonik bakteriler fiziksel kuvvetler (Van der Waals kuvveti, elektrostatik ve hidrofobik etkileşimler vb.) ve flagella gibi yapılarla yüzeye tutunmaktadır. Uygun şartlar sağlandığında biyofilm üretimi başlamaktadır. Biyofilm oluşumu henüz erken evrede olduğunda tutunma geri dönüşümlüdür (Verdosa vd., 2019). İkinci aşamada tutunan bakterilerin bazıları hareketsiz kalarak EPS yardımıyla geri dönülmez biçimde yüzeye bağlanmaktadır. Üçüncü aşamada su ve besin kanalları ve mikro koloniler oluşmaya başlar, bu aşamada biyofilm çok katmanlı hale gelmektedir. Dördüncü aşamada biyofilm olgunluk seviyesine ulaşır ve biyofilm topluluğu olarak kabul edilir. Bu aşamada elektrokimyasal iletişim ve gen aktarımını da kapsayan mikrobiyal etkileşim başlar. Biyofilm içerisinde bakteriler Çoğunluğu Algılama (Quorum Sensing) aracılığıyla hücreler arası iletişimi sağlayarak toplu davranışlarını düzenleyebilmektedir (Papenfort vd., 2016). Beşinci aşamada ise olgun biyofilmin mikro kolonileri dağılarak sesil haldeki bakteriler tekrar planktonik hale dönerler. Dağılma fiziksel kuvvetler ile de gerçekleşebilir.



Şekil 2.2. Biyofilm oluşum basamakları

#### 2.4. Mikrobiyal Korozyonun Kazaları

Mikrobiyal korozyon ile ilgili yaşanan kazalara bakıldığında, 2006 yılında, Alaska, Prudhoe Körfezi'ndeki petrol boru hattında ceviz büyüklüğünde bir delik oluşması sebebiyle, 750.000 litrelik petrol sızıntısı olmuştur. İlgili sızıntı ile yapılan çalışmalar sonucunda sülfat indirgeyen bakteriler nedeniyle, boru iç hattının korozyona uğradığı ve boruda delik oluştuğu bildirilmiştir. Sızıntı sonucunda 27 km uzunluğundaki boru hattı değiştirilmiş ve bu sürede petrol transferi kesintiye uğramıştır. Boruların değişimi, hizmetin aksaması ve cezai yaptırımlar nedeniyle toplam maliyetin 250 milyon dolar olduğu bildirilmiştir (Jacobson vd., 2007).

2015 yılında, ABD'nin Aliso Kanyonu'ndaki metan gazı depolama kuyusundan 100.000 tondan fazla metan çevreye yayılmış bu durumdan yeraltı suyunda korozyona neden olan metanojenlerin sorumlu olduğu belirlenmiştir (Conley vd., 2016). Olay sonrası tesis 2 yıl kapalı kalmış ve sonrasında düşük kapasite ile tekrar açılmıştır. Bu sızıntının kamu hizmetleri de dahil toplam maliyeti 1 milyar dolardan fazla olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, zehirli gaz emisyonundan kaynaklanan sağlık iddiaları nedeniyle davalar devam etmektedir (Garcia-Gonzales vd., 2019; Little vd., 2020).

#### 2.5. Korozyonun Önlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Korozyonun doğal bir sürecin sonucunda meydana gelmesi sebebiyle oluşturduğu malzeme ve hizmet zararının kontrol edilmesi ve önlenmesi gerekmektedir. Korozyonu önleme çalışmalarında korozyonun tamamen önlenmesi veya olabildiğince geciktirilmesi amaçlanmaktadır. Önleme çalışmaları; uygun malzeme

seçimi, malzemenin türüne, kullanıldığı ortama, ekonomik koşullara, çevresel etmenlere veya bunlar mümkün değilse malzeme yüzeyinin özelliklerinin değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Korozyon metal ile çevre arasında gerçekleştiği için malzeme ve korozyona neden olan çevre arasında bir bariyer oluşturmak koruma yöntemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Korozyonun önlenmesi ekonomik, güvenlik, sağlık ve doğal kaynakların korunması gibi nedenler sebebiyle zorunluk arz etmektedir (Munger vd., 1984).

- Korozyona dayanıklı malzeme kullanmak: Kullanılacak malzeme ortama ve maruz kalacağı şartlara göre seçilmeli ve ortam özelliği iyi bilinmelidir. Ortam şartlarına uygun ve korozyon direnci yüksek malzemeler seçilmelidir.
- Ortam şartlarının kontrolü: Korozyon metal ile ortam arasında gerçekleşen bir süreç olduğu için korozyona sebebiyet veren veya hızlandıran ortam sıcaklığı, pH, oksijen miktarı gibi etkenler kontrol altında tutularak korozyon hızı azaltılabilir.
- Korozyon inhibitörleri kullanımı: Metalin uğradığı korozif etkiyi azaltmak veya önlemek için ortama katılan maddelerdir. Ortam ve metale göre etkinlikleri değişmektedir (Arthur vd., 2013).
- Biyosit kullanımı: Mikrobiyal korozyonu önlemek için korozyon ortamına biyositler eklenebilir. Biyosit kullanımı, mikroorganizmaların öldürülmesi veya aktivitelerinin baskılanması prensibine dayanmaktadır (Javaherdashti, 2008).
- Anodik-katodik kaplama: Dışarıdan bir akım uygulanarak metal yüzeyinin elektrokimyasal reaksiyonun durdurulması prensibine dayanmaktadır (Pedefferri vd., 1996).
- Metal kaplama: Kullanılacak metal yüzeyin üzerinin bir başka metal ile kaplanarak asıl malzemenin korunması prensibine dayanmaktadır.
- Yüzey kaplama: Metal ile ortam arasında bir bariyer oluşturarak metalin korunması amaçlanmaktadır. Boyalar ve organik maddeler içeren kaplamalar yüzeyde bir film oluşturarak malzemeyi korozyondan korur.

Yaygın olarak kullanılan kaplamalar, ağır metal içerikleri sebebiyle, çevre ve sağlık sorunlarına neden olmaktadır (González vd., 2019). Yeni alternatif kaplamalara örnek olarak, sol-jel, katyonik plazma biriktirme ve nano kaplama verilebilir (Deyab, 2017).

Metal ve metal yüzeylerinin dış etkenlere karşı dayanıklı hale getirilmesi, malzeme özelliklerinin iyileştirilebilmesi, korozyona karşı koruma sağlaması açısından nano kaplamalar son yıllarda araştırılmakta ve kullanılmaktadır (Madhan vd., 2015). Nano kaplama ile kaplanan yüzey amaca özgü olarak yüzeyin su temas açısının geliştirilmesi ve antibakteriyel etki göstermesi gibi özelliklere göre modifiye edilebilmektedir (Khamseh vd., 2017).

## **2.6. Nanoteknoloji**

Nanoteknoloji, boyutları 100 nanometre (nm) veya daha az olan malzemeleri tanımlayan, tıbbi uygulamalardan, uzay çalışmalarına, bilişim sektöründen yapı malzemelerine kadar birçok alanda uygulama imkânı bulunan yüksek performanslı, manipüle edilebilir ve çevreye duyarlı ürünlerin gelişmesine imkân veren disiplinler arası bir çalışma alanıdır (Casini vd., 2016). Bu alanda ilk çalışma 1959 yılında Nobel Fizik ödülünü almış Richard Feynman'a aittir. "Nanoteknoloji" terimi ise ilk kez 1974 yılında Japon bilim insanı Taniguchi tarafından kullanılmıştır (Hulla vd., 2015; McNeil vd., 2005). Nanoteknoloji, ISO kaynaklarına ve literatürde bulunan diğer çalışmalara göre maddenin özellikleri ile boyutu arasında ters orantı bulunan, maddeyi üretmek, kontrol etmek ve manipüle etmek yeteneklerine sahip bir çalışma alanı olarak tanımlanmaktadır (Casini vd., 2006). Nano boyuttaki malzemeler, büyük ölçekli örneklerine kıyasla farklı ve etkiletici özellikler göstermektedir. Bu özelliklerin nano malzemelerin fiziko-kimyasal farkından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nano malzemeler yüksek yüzey-hacim oranına sahiptirler. Bu sayede biyolojik, kimyasal ve fiziksel olarak benzersiz özellikler gösterirler (Mody vd., 2010). Nanoteknoloji birden fazla işlevi tek bir nano ölçekli üründe barındırabilir (Tkachenko vd., 2003).

## **2.7. Nanoparçacıklar**

Nanoparçacıklar; 1 ile 100 nm arasında boyutlara sahip aynı kimyasal benzerlerine göre üstün özelliklere sahip parçacıklar olarak tanımlanmaktadır (Naitō vd., 2018). Nanoparçacıklar yüksek yüzey alanı dışında farklı optik, manyetik ve flüoresan özellikleri sayesinde endüstrinin birçok alanında uygulama imkânı bulmaktadır. Nanoparçacıklar kullanılacak uygulamaya göre farklı yöntemler ile sentezlenebilmektedir. Nanoparçacıklar malzemeler üzerinde kullanımı malzemenin dayanıklılığını arttırabilir, malzemenin toplam ağırlığını azaltabilir, malzemeye istenen yeni özellikler eklenerek ihtiyaca özgü düzenlenebilir (Nasrollahzadeh vd., 2019).

Nanoparçacıklar biyolojik, kimyasal ve fiziksel yöntemler ile sentezlenebilmektedir (Patra vd., 2014). Fiziksel ve kimyasal üretim yöntemleri ile parçacıkların boyutu istenilen şekilde manipüle edilebilmesine karşın yüksek enerji tüketimi, üretimlerinin pahalı olması, üretim sırasında toksik ve istenmeyen yan ürünlerin ortaya çıkması gibi dezavantajlara sahiptirler (Shedbalkar vd. 2014). Biyojenik, biyolojik sentez veya yeşil sentez toksik olmayan nanoparçacık üretmek için canlı ya da canlıların ürünlerini kullanan bir yaklaşımdır. Bu yöntem ile bitki, fungus, mikroalg ve bakteri gibi canlılar veya canlıların metabolitleri kullanılarak sentez gerçekleştirilebilir (San Keskin vd., 2020; San Keskin vd., 2021).

### **2.7.1. Metalik Nanoparçacık**

Metal nanoparçacıklar biyolojik, kimyasal ve fiziksel yöntemler ile sentezlenebilmektedir (Daniel vd., 2004). Yaygın olarak kullanılan metal nanoparçacıklar; Altın (Au), Gümüş (Ag), Nikel (Ni), Platin (Pt) ve Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>)'dir (Li vd., 2013). Nanoparçacıkların üretiminde fiziksel ve kimyasal yöntemlerin kullanılması istenilen çap ve özellikte nanoparçacık üretilmesine imkân sağlamaktadır fakat üretim yöntemleri genellikle pahalıdır, canlı ve çevre için tehlikeli yan ürünler içermekte ve yoğun bir işçilik ve enerji kullanımına ihtiyaç duymaktadır (Sihna vd., 2012). Bu nedenle nanoparçacık üretimi için çevre dostu, güvenli ve uygun maliyetli yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur (Raveendran vd., 2003; Ahmad 2019). Mikroorganizmalar veya onların metabolitleri vasıtasıyla metal iyonlarının metal nanoparçacıklara dönüştürülebildiği bildirilmiştir (Makarov vd., 2014). Biyolojik olarak sentezlenen metal nanoparçacıkların antimikrobiyal ve antikanser özellikleri bilinmektedir (Mittal vd., 2013).

### **2.7.1.2. Gümüş nanoparçacık**

Gümüş nanoparçacıklar fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak sentezlenebilmektedir. AgNP kendine has fiziksel, optik, elektriksel, termal, kimyasal ve biyolojik özellikleri ve özellikle antimikrobiyal ve anti kanser etkileri sayesinde sağlık, gıda ve endüstri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Wypij vd. 2018). Gümüş nanoparçacıklar küçük boyutları sayesinde antibakteriyel ajanlara karşı dirençli olan biyofilm tabakasında DNA hasarı ve ölüme neden olmaktadır (Chaloupka vd., 2010). AgNP kullanılarak üretilen ürünler Amerika Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından kullanım

onayı almaktadır (Abou el Nour vd., 2010). Biyojenik olarak üretilen AgNP'lerin boyut dağılımı 1 ile 600 nm arasında değişmektedir (Swamy vd. 2015).

## **2.8. Nanofiber**

Nanofiberler 100 nanometre veya daha küçük çaptaki fiberlerdir (MacDiarmid vd., 2001). Ancak bazı kaynaklara göre nanofiberler 1 mikrometre altında bir boyuta sahip olan fiberler olarak da tanımlanmıştır (Yuris 2004). Bir başka tanımlamada ise nanofiberler, çapları 0,5 mikron ve daha az olan fiberler olarak ifade edilmektedir (Xue vd., 2019).

Fiberler mikrometreden nanometre boyutuna azaldığında, birim alana oranla daha yüksek yüzey alanına, yüksek mekanik sağlamlığa ve fiber boyunca artan gerilme kuvveti dayanımına sahip olurlar. Fiber çapının azalması özgül yüzey alanını artırır ve bu sayede oldukça iyi mekanik özellik sergilemektedirler (Beachley vd., 2009). Nanofiberlerin geniş yüzey alanına sahip olmaları nano ölçekli parçacıklara tutma veya yayma gibi farklı avantajlar sağlamaktadır. (Süpüren vd., 2007). Böylece üretilen fiberler filtre için etkili toz toplama alanı sağlayabilirken, doku mühendisliği için ise artan yüzey/hacim oranı nedeniyle kütle transferi ve yüzeye hücre tutunması iyileştirerek geniş bir kullanım alanına hizmet eder. Nanofiberler endüstrinin birçok alanında uygulama imkanına sahip son ürün geliştirme potansiyeli ile araştırmacılar arasında ilgi çekmiştir. Nanofiberler veya kompozit ürünlerin birlikte kullanılması ile katma değeri yüksek son ürünlerin elde edilebilmesi bu teknoloji ile üretilmiş ürünlere geniş kullanım alanlarını sağlamaktadır. Nanofiberler, filtre sistemleri, sensörler, polimerik piller, katalizörler ve kompozitler ve benzeri alanlarında birçok uygulamaya sahiptirler (Toriello vd., 2020). İstenmeyen maddeleri geçirmeyen ve mikrobiyolojik arıtma sağlayan, hava ve su filtreleri nanofiberler kullanılarak üretilmektedir (Mamun vd., 2021). Nanofiberlerin günümüzdeki önemli araştırmalarından biri biyomühendislik alanındaki uygulamalardır. Tıpta yara örtüsü, ilaç dağıtımı, kemik dokusu oluşturmak ya da cilde nüfuz etkili ilaçların taşıyıcı sistemleri gibi uygulamalar nanofiberler ile üretilmektedir (Kenawy vd., 2009; Khil vd., 2003). Malzemeyi korozyondan korumak için kullanılan mevcut kaplamalara alternatif olarak nanofiber içeren kaplamalar son yıllarda ilgi çekmiştir (Es-Saheb vd., 2012).

## 2.8.1. Nanofiber Üretim Yöntemleri

Nanofiberlerin üretim yöntemleri;

- Fibrilasyon yöntemi ile nanofiber üretimi
- Eriyik üfleme (Meltblown) yöntemi ile nanofiber üretimi
- Bikomponent yöntemi ile nanofiber üretimi
- Faz ayırma yöntemi ile nanofiber üretimi
- Spunbond yöntemi ile nanofiber üretimi
- Kendiliğinden montaj yöntemi ile nanofiber üretimi
- Elektroçirime yöntemi ile nanofiber üretimi

### 2.8.1.1. Fibrilasyon yöntemi ile nanofiber üretimi

Fibrilasyon tekniği, lineer selülozik yapıları fiberlerin, nano boyutta çaplara sahip alt fiberlere ayrılması işlemidir. Bu yöntemle selülozik fiber, 1 mikrondan daha küçük çapa sahip olan fiberciklere bölünmekte, ancak tek tek fiberler halinde değil, nanofiber tülbendi formunda üretilmektedir. Fibrilasyona uğrayan selülozik fiberlerden, ince, hidrofil, mikro gözenekli yapıda yüzeyler elde edilir. Bu yöntem ile üretilen fiberlerin özellikle sağlık ve çevre alanında kullanılan filtrelerde kullanılabileceği düşünülmektedir (Süpüren vd., 2007). KX Industries şirketi fibrile olmuş Lyocell elyafının nanofiberli tülbende dönüştürülmesi yöntemi ile kâğıt üretebilmektedir. Fiberlerinin üretim koşullarının zor olmasından dolayı, bu tekniğin yaygın kullanılması zordur (Chen vd., 2014).

### 2.8.1.2. Eriyik üfleme (meltblown) yöntemi ile nanofiber üretimi

Meltblown tekniğinde polimer eriyiği; şırınganın ucundan hızla çıkarak aynı sıcaklığa sahip hava ile toplayıcı plakanın üzerinde fiber toplanması ile tek adımda fiber üretilmektedir. Meltblown teknolojisi ile termoplastik polimerler kullanılarak maliyeti düşük fakat büyük miktarda fiber üretilmektedir. Bu üretim yöntemi ile termoplastik polimerler kullanılmakla beraber yaygın olarak PET (Polietilen tereftalat), PP (Polipropilen), ve PA6 (Naylon 6) kullanılır. Meltblown yöntemiyle çapları 0,1-500µ aralığında değişen fiberler elde edilebilir. Ancak uygulamada elde edilen fiber çapları 1-2 mikron aralığındadır. Meltblown yöntemi ile üretilen fiberler hafiftir ve yüksek yüzey alanına sahiptir. Elde edilen bu fiberler filtrasyon uygulamalarında veya yalıtım uygulamalarında kullanılabilmektedir. Meltblown prosesi ile konvansiyonel

fiber çekim prosesine göre daha ince fiberler üretilmesine rağmen, fiber çap dağılımı geniş bir aralık göstermektedir. Üretim avantajlarına karşın üretilen fiberlerin çapı 1 mikron ortalamasına sahiptir. Bu yüzden genellikle mikrofiber üretmek için kullanılmaktadır. Polimerden doğrudan yüzey oluşturma olanağı sağlayabilen bu yöntemin, teknik ve ekonomik anlamda ekipman ve fiber çapının büyüklüğü gibi dezavantajları bulunmaktadır (Pu vd., 2018).

#### **2.8.1.3. Bikomponent yöntemi ile nanofiber üretimi**

Bikomponent fiber üretim tekniği, iki polimerin aynı şırınga ucundan püskürtülmesi ile iki polimerinde aynı anda çıkmasıyla iki polimeri de içeren bir fiber üretilmesi esasına dayanır. Polimerler aynı düzeden püskürtüldükten sonra şırınga ucunun hemen altında yapay bir soğutmaya tabi tutulurlar. Bikomponent fiberler genel olarak kesit şekillerine göre içi-içe, yan-yana, denizde adacık ya da dilimli pasta bikomponent fiberler olarak sınıflandırılırlar. Bu yöntem ile üretilmek istenen fiber polimerlerinden biri (Polipropilen, Poliester ve Poliamid) fiberi oluşturacakken diğeri eriyerek bikomponentten fiberden uzaklaşan bir polimer madde kullanılır. Fiber komponentlerinden birinin uzaklaştırılmasında ısı, kimyasal ya da mekanik aletler gibi farklı yöntemler kullanılabilir (Naeimirad vd., 2018). Bu yöntemle üretilen nanofiberler geniş bir çap dağılımı göstermez. Bu yöntem ile üretilen nanofiber rastgele olmakta ve üretilen fiberlerden ancak bir kısmı istenen özellikleri taşımaktadır (Süpüren vd., 2007). Bu teknik kullanılarak elde edilen fiberler, özellikle Asya’da, yaklaşık 20 yıldan uzun süredir üretilmektedirler (Demir vd., 2002). Tipik “adacık” polimerleri; poliamid, poliester, tipik deniz polimerleri ise; PVA (polivinil alkol), EVOH (etilen vinil alkol) ve kolayca hidrolize olabilen poliesterdir (Demir vd., 2002).

#### **2.8.1.4. Faz ayırma yöntemi ile nanofiber üretimi**

Faz ayırma metodunda temel olarak bir polimer ile çözücünün termodinamik olarak ayrılması esasına dayanmaktadır. Bu teknikte, termodinamik ve kinetik parametrelerin optimizasyonu ile kolaylıkla nanofiber ve gözenekli yapılar elde edilebilir. Karmaşık ve zaman alıcı bir yöntemdir, kullanılan polimerin tipi, çözücüsü, konsantrasyon, faz ayırma sıcaklığı, soğutma ve ısıtma basamakları önemli parametrelerdir. Bu yöntem ile üretilen fiberler belli polimerler ile üretilmekte ve fiber çapının kontrolünü sağlaması da zordur. Ortalama 50 ile 500 nm çapta nanofiber üretilmektedir (Ma vd., 1999). Ayrıca laboratuvar ölçekli bir prosestir (Barnes vd., 2007).

### **2.8.1.5. Spunbond yöntemi ile nanofiber üretimi**

Spunbond yöntemi, meltblown yöntemi ile benzerlikler göstermektedir. Meltblown yönteminde hava ve sıcaklık kullanılmaktadır. Uygulamadaki bu farklılıklar, oluşan fiberlerin fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Meltblown metodunda yüksek miktarda hava kullanılmakta böylece hava akımıyla fiberler elde edilmektedir. Spunbond yönteminde ise fiber soğuyup katılaştıktan sonra fiziksel germe kuvveti uygulanmaktadır. Bu sebeple üretilen fiberler daha kalın çaplara sahiptir. Fiber çapları spunbond prosesi ile elde edilen fiberlerde 20 mikrona kadar çıkabilirken, meltblown prosesi ile elde edilen fiberlerde bu değer 2 mikron civarındadır (Süpüren vd., 2007).

### **2.8.1.6. Kendiliğinden montaj yöntemi ile nanofiber üretimi**

Kendiliğinden montaj; bağımsız bileşenlerin, rastgele olarak düzenli ve devamlı hale gelmesidir. Bu üretim yönteminin prensibi küçük moleküllerin bir araya gelip, nano ölçekli fiberleri oluşturması esasına dayanır (Ramakrishna vd., 2005). Kendiliğinden montaj karışık ve sınırlı polimer kullanımına imkân veren bir prosestir. Kendiliğinden montaj metodu ile nanofiberlerin üretiminde en çok çalışılan malzeme peptid-amfifildir (PA). Bu teknikle genellikle 5-8 nm çapında ve 1 µm uzunluğunda fiberler elde edilir. Proses laboratuvar ölçeklidir ve sadece belirli polimerler nanofiberlere dönüştürülebilmektedir (Barnes vd., 2007).

### **2.8.1.7. Elektroegirme yöntemi ile nanofiber üretimi**

Nanoteknolojinin ilerlemesi ile araştırmacıların nano malzemelerin benzersiz özelliklerine ilgileri artmıştır. Bir elektrostatik fiber üretim tekniği olan elektroegirme yöntemi çok yönlülüğü, uygulama alanlarının genişliği, kurulum ve uygulama maliyetinin düşük olması sebebiyle fiber üretim yöntemine olan ilgiyi arttırmıştır. Elektroegirme ile hem doğal hem de sentetik polimerlerden 2 nm ile birkaç mikrometre arasında fiberler üretilmektedir (Ahn vd., 2006; Hunley vd., 2008). Bu yöntem ile üretilen nanofiberler yüksek yüzey alanı/hacim, ayarlanabilir gözenek çapı ve istenilen özelliklere göre fonksiyonelleştirilebilme gibi büyük avantajlara sahiptir. Elektroegirme yöntemi ile üretilen nanofiberler, 200'den fazla polimer kullanılarak üretilmektedir. Diğer üretim yöntemlerine göre daha küçük çapta nanofiberler üretilmesi sayesinde nano kataliz, doku mühendisliği, koruyucu ekipmanlar, filtrasyon, doku mühendisliği, sağlık, elektronik, savunma, güvenlik ve yapı gibi



ek olarak elektroğirme ile üretilen nanofiberlerin morfolojisini ve çapını ortam sıcaklığı ve nem de etkilemektedir (Chong vd., 2007; Li vd., 2004). Çizelge 2.1’de uygulama ve ortam parametrelerin fiber morfolojisi üzerindeki etkileri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Uygulama ve ortam parametrelerinin fiber morfolojisi üzerine etkileri

Parametreler	Fiber morfolojisi üzerindeki etki	Kaynak
Viskozite	Fiber çapında artış, boncuk oluşumu veya boncuksuz fiber oluşur.	(Jiang vd., 2004; Zhang vd., 2005)
Polimer konsantrasyonu	Konsantrasyon artışında fiber çapı da artar.	(Kim vd., 2005; Son vd., 2004)
Moleküler ağırlık	Molekül ağırlığı arttıkça boncuk oluşumunda azalma ve daha ince fiber oluşur.	(Chen vd., 2004; Gupta vd., 2005)
İletkenlik	İletkenliğin artmasıyla fiber çapında azalır.	(Koski vd., 2004; Jiang vd., 2004)
Uygulama voltajı	Voltajın artması ile fiber çapı azalır.	(Kim vd., 2005; Jun vd., 2003)
İğne ucu ve kollektör arasındaki mesafe	Boncuk çapında büyüme veya küçülme meydana gelir.	(Geng vd., 2005; Ki vd., 2005; Zhang vd., 2005)
Pompa hızı	Pompa hızı azaldıkça fiber çapı azalır, arttıkça boncuk oluşur.	(Sill vd., 2008; Zhang vd., 2005; Zuo vd., 2005)
Ortam nemi	Yüksek nem fiberler üzerinde gözenekler meydana getirir.	(Casper vd., 2004; Mit-Uppathem vd., 2004)
Ortam Sıcaklığı	Sıcaklıktaki artış fiber çapını azaltır.	(Mit-Uppathem vd., 2004)

### Viskozite

Polimer çözeltisinin viskozitesi fiberlerin üretilmesi sırasında çap ve morfolojilerini belirlemede önemli bir parametredir. Viskozitenin düşük olduğu durumda fiber oluşmazken yüksek olması durumunda ise iğne ucundan jet oluşması zor olduğu için optimum şartları sağlamak önemlidir (Sukigara vd., 2003). Yapılan araştırmalara göre çözelti viskozite değerinin 1 ile 215 poise arasında olduğu durumlarda fiber üretilebildiği bildirilmiştir (Baumgarten vd., 1971; Deitzel vd., 2002). Viskozitenin yüksek olması durumunda polimer jetinin kırılması önlenemez (Deitzel vd., 2001). Elektroğirme yöntemi ile üretilen fiberlerin viskozitesi sürekli fiber oluşumunda önemli bir rol oynar (Doshi vd., 1995).

## **Polimer Konsantrasyonu**

Elektroğirme yöntemi ile fiber oluşumunda optimum çözeltili konsantrasyonu gereklidir. Konsantrasyon düşük olduğunda fiber boncuk yapıları ile birlikte oluşurken konsantrasyon arttıkça boncukların şekli küreselden iğ şekline doğru değişiklik gösterir. Artan konsantrasyonda ise tek biçimli fiberler oluşmaktadır (Deitzel vd., 2001; Haghi vd., 2007; Ki vd., 2005). Yapılan çalışmalarda çözeltili konsantrasyonun artması ile fiber çapının da arttığı belirlenmiştir (Ki vd., 2005).

## **Moleküler Ağırlık**

Polimerin moleküler ağırlığı iletkenlik, viskozite gibi elektriksel özellikler üzerinde de etkiye sahiptir (Haghi vd., 2007). İstenilen viskoziteyi sağlayabilmek için moleküler ağırlığında aynı şekilde yüksek olması gerekmektedir. Düşük moleküler ağırlıkta fiberler boncuk oluştururken yüksek moleküler ağırlıktaysa fiber çaplarında artış gözlenmiştir (Burger vd., 2006; McKee vd., 2006).

## **İletkenlik**

Çözeltili iletkenliği polimerin tipi, iyonlaşabilir tuzlar ve kullanılan çözücüye göre değişkenlik gösterir. İletkenliğin artması ile paralel, fiber çapında azalma gerçekleşirken iletkenliğin azalması ile jetin oluşumu için yeterli elektrik kuvvetine ulaşamaz ve oluşan fiberlerde boncuk yapısı meydana gelir. Çözücü iletkenliğinin fazla olduğu durumlarda fiber çap dağılımlarının daha geniş aralıkta olduğu ve jetin kararsızlığının daha fazla olduğu görülmüştür. Genel olarak en küçük çapa sahip fiberlerin yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduğu bildirilmiştir (Haghi vd., 2007).

## **Uygulama Voltajı**

Elektroğirme yöntemi ile fiber üretiminde en önemli parametrelerden biri uygulama voltajıdır. Uygulanan voltaj eşik değerine ulaştıktan sonra fiber jeti ve fiber oluşur. Bazı çalışmalarda uygulama voltajının artmasıyla büyük çapta fiber oluştuğunu bildirilmiştir (Demir vd., 2002; Zhang vd., 2005). Bazı kaynaklarda ise uygulama voltajının artması elektrostatik itme kuvvetlerini artırarak fiber çapının azaldığı bildirilmiştir. Genellikle yüksek voltaj, jetteki daha güçlü elektrik alanı nedeniyle çözeltilinin daha fazla gerilmesine ve fiber çapında azalmasına sebebiyet verir. Bunların yanında çözücünün hızlı buharlaşması ve boncuk oluşum ihtimalini de arttırmaktadır (Katti vd., 2004; Yordem vd., 2008).

## **İğne Ucu ve Kollektör Arasındaki Mesafe**

İğne ucu ve kollektör arasındaki mesafe fiber çapını kontrol etmekte önemli parametrelerden biridir. Fiberlerin toplayıcı kollektöre ulaşma mesafesi çözücünün buharlaşması açısından önem arz etmektedir. Mesafenin çok yakın veya çok uzak olması durumunda fiberlerde boncuk yapıları gözlemlenmiştir (Lee vd., 2004; Ki vd., 2005).

## **Pompa Hızı**

Polimerin şırınga ucundan akış hızı, jetin oluşum ve elektriksel yük ile yüklenme hızının etkilendiği önemli bir parametredir. Çözücünün buharlaşması için daha yavaş akış hızının olması tercih edilir (Yuan vd., 2004). Pompa hızının fazla olması ile boncuk yapıları oluşmakta ve fiber gözenek çaplarında artış meydana gelmektedir (Megelski vd., 2002; Zuo vd., 2005).

## **Ortam Nemi**

Polimer çözücüsünün daha yüksek nem ortamında fibere dönüşmesi ile fiber yüzeylerinden dairesel gözeneklerin oluşmasına neden olmuştur. Daha düşük nemde çözücünün buharlaşması daha hızlı gerçekleşmektedir (Casper vd., 2004).

## **Ortam Sıcaklığı**

Uygulama ve polimer parametrelerinin dışında ortam parametreleri de fiberlerin çap ve gözenek boyutlarını etkilemektedir. Sıcaklıktaki artışın fiber çapında azalmaya neden olduğu ve bunun sebebi olarak da viskozitenin azalması öne sürülmüştür. Viskozite ile sıcaklık arasında ters bir ilişki vardır (Mit-Uppatham vd., 2004).

## **2.9. Kaynak Özetleri**

Bairi vd., (2012), D9 paslanmaz çelik alaşımı üzerinde yer altı sularından izole ettikleri *Bacillus* sp. ve *Pseudomonas* sp. bakterilerinin mikrobiyal korozyon etkisini incelemişlerdir. Her iki bakterinin de alaşım üzerinde tutunduğu ancak *Pseudomonas* sp. bakterisinin biyofilm oluşturarak metal yüzeyinde daha yoğun bir şekilde var olduğu görülmüştür. *Pseudomonas* sp. biyofilm içerisindeki varlığı daha yüksek akım yoğunluğuna ve yüksek korozyon potansiyeline neden olmuştur. Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri verilerine göre ortamda bakteri varlığında Rp değerlerinde 100 kat azalma gösterilmiştir. Araştırmacılar D9 metalinin korozyona karşı dayanıklı

olmasına rağmen bakteri varlığında korozyona uğradığını belirtmiş ve mikrobiyal korozyonun önlenmesinde yüzeylerin antibakteriyel etki göstermesi gerekliliğini önermişlerdir.

Çetin vd., (2013) petrol üretim kuyusundan izole ettikleri *Desulfovibrio caledoniensis* bakterisinin düşük alaşımlı çelik üzerinde korozyon davranışını incelemişlerdir. 1 aylık inkübasyon süresince yapılan korozyon analizlerde korozyon potansiyeli zamanla katodik değere doğru kaymış ve korozyon akım yoğunluğu da artmıştır. Bu değerler inkübasyon süresince *Desulfovibrio caledoniensis* varlığının korozyona olan etkisini göstermiştir. Bu etkinin biyofilm varlığına veya üretilen metabolitlerin sebep olduğunu bildirmişlerdir.

Chen vd., (2014) deniz suyu ortamında Bakır'ın (Cu) mikrobiyal korozyon davranışını incelemişlerdir. Yapılan elektrokimyasal analizler ve SEM görüntülemelerinde Cu yüzeyinde mikroorganizma varlığının Cu'nun korozyon direncinin azalmasına ve korozyon sürecinin hızlanmasına yol açtığını bulmuşlardır.

Mohd Rasoli vd., (2015) Karbon çeliğin Açık Devre Potansiyeli (OCP) ölçümleri ile mikrobiyal korozyon etkisini araştırmışlardır. İzole ettikleri SRB'nin saf ve karışık kültürlerde karbon çeliğin korozyon potansiyelini arttırdığını göstermişlerdir. SRB'lerin sülfatları sülfür formuna indirgeme sürecinde üretilen H<sub>2</sub>S'in aşındırıcı etkisi sonucu karbon çeliğinin yüzeyinde korozyon meydana geldiğini göstermişlerdir.

Abdoli vd., (2016) yaptığı çalışmada, SS 316L çelik plakaların Yapay Deniz Suyu (ASW) ortamında 7 ve 30 gün boyunca korozyon ve mikrobiyal korozyonu hem elektrokimyasal olarak hem de yüzey görüntüleme yöntemleri ile araştırmışlardır. 7 ve 30 gün boyunca sadece ASW içerisindeki metallerde klorür iyonlarından kaynaklı birkaç korozyon atığı görülmüşken *Bacillus* sp. inoküle edilmiş ASW ortamında biyofilm oluşmuş ve oluşan biyofilm asit tabakasıyla temizlenerek yüzey SEM görüntülenmesi ile incelendiğinde biyofilm tabakasının altında çukurcuk korozyonu olduğu görülmüştür.

Qiu vd., (2017) yumuşak çelik üzerine kopolimerizasyon yöntemiyle ürettiği SPANI (Sülfonatlı Polianilin) nanofiberleri epoksi içine gömerek bir kaplama malzemesi üretmiş ve üretilen kaplamanın 120 gün boyunca %3,5 NaCl içerisinde korozyon takibi yapılmıştır. Kompozit kaplamanın üstün bir yapışma özelliğinin olduğu ve bu

sayede korozif ortamın malzeme ara yüzeyine ulaşmadığı ve yüksek empedans modülü verilerine göre de yumuşak çeliğin korozyondan koruduğu bildirilmiştir.

Cui vd., (2018) Alüminyum (Al) alaşımlar üzerine Polivinilidinden Florür (PVDF)/stearik asit (SA) kullanarak elektroegirme yöntemiyle süperhidrofobik kaplama materyali üretmişlerdir. Üretilen kaplama ile Al yüzey kaplanmış ve %3,5 NaCl içerisinde 30 güne kadar korozyon takibi yapılmıştır. Korozyon potansiyeli 6. saatte sadece Al levhada -1,325 V iken PVDF/SA nanofiber kaplı numunenin korozyon potansiyeli -0,765 V olarak ölçülmüştür. Korozyon potansiyelinin daha pozitif değerde olması kaplamanın korozyondan koruduğunun göstergesidir. 30 günün sonunda bile metal yüzeyinin korozyondan korunduğu ve kaplamanın üstün bir korozyon önleyici performansa sahip olduğu bildirilmiştir.

Bakhsheshi-Rad vd., (2019) yaptıkları çalışmada Magnezyum (Mg) alaşımlarının korozyon davranışını incelemiş ve Mg korozyon direncini arttırmak için PLLA nanofiber ile kaplanmıştır. Sadece Mg alaşımlarının  $E_{kor}$  değeri -1724 mV ve  $i_{kor}$  değeri 196,4  $\mu$ m iken nanofiber ile kaplanmış alaşımların  $E_{kor}$  değeri -1594 mV ve  $i_{kor}$  değeri 46,8  $\mu$ m olarak ölçülmüştür.  $i_{kor}$  değerindeki azalmanın Mg alaşım üzerindeki nanofiberlerin varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca nanofiberlerin alt tabakaya çözelti girişini engellediği ve alaşımı galvanik korozyona karşı koruduğunu bildirmişlerdir.

San Keskin vd., (2020) yılında bakır metalinin yapay deniz suyu içerisinde korozyon ve mikrobiyal korozyondan korumak için süperhidrofobik Selüloz Asetat (SA) nanofiberler üretmişlerdir. Üretilen nanofiberin içerisine biyojenik AgNP eklenmiş ve kaplamaya antibakteriyel etki kazandırmışlardır. Üretilen kaplamanın etkinliğinin belirlenmesi amacıyla *Pseudomonas aeruginosa* içeren ASW ortamında, 7 günlük immersiyon takibinin ardından yapılan elektrokimyasal analizler ve ağırlık kaybı verilerine göre üretilen nano kaplamanın bakır metalini hem korozyondan hem de mikrobiyal korozyondan koruduğu bildirilmiştir.

Rivero vd., (2021) Polikaprolakton (PCL) nanofiberler içerisine çinko oksit nanoparçacıklar (ZnO NP) eklemiş ve üretilen nanofiberin %3,5 NaCl içerisindeki Paslanmaz çelik (AISI 304) korozyon direnci açısından incelenmiştir. Yüzey SEM görüntülenmesi ile incelenmiş ve korozyon analizleri elektrokimyasal olarak yapılmıştır. Çinko nanoparçacıkların eklenmesiyle temas açısı azalmış fakat

koroziyondan koruma verimliliği sadece PCL nanofibere oranla artmıştır. Sadece çeliğin korozyon oranı (mm/yıl) 0,0118 olarak hesaplanmış, PCL içerisine ZnO NP eklenmiş nanofiber ile kaplanmış çeliğin korozyon oranı ise 0,00016 olarak hesaplanmıştır. Üretilen kaplamanın bir korozyon inhibitörü eklendiğinde yüksek verimde korozyon direncine sahip olduğu bildirilmiştir.

Dabirian vd., (2021) PCL/kurkumin (Cur) nanofiberleri elektroçirme yöntemi ile üretmiş ve magnezyum alaşım (AZ31) implantları kaplamışlardır. Kurkumin varlığının nanofiberin yüzeye adezyonuna olumlu yönde etki yaptığı, bu sayede malzemeyi korozif ortamdan koruduğunu ve kaplama üzerinde bozulmadan kaldığını bildirmişleridir. Yapay vücut sıvısı (SBF) içerisinde elektrokimyasal korozyon analizleri yapılmıştır. Buna göre korozyon potansiyeli -1.388 V, korozyon hızı ise 0,198 mm/yıl olarak ölçülmüştür. Bu değerler kaplamasız Mg alaşımına göre korozyonun önemli ölçüde azaldığını göstermektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Mikroorganizmalar

Tez çalışmasında kullanılan *Lysinibacillus* sp. NOSK (GenBank: M241862), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853) ve *Aeromonas eucrenophila* (GenBank: GQ466170) bakterileri Polatlı Fen Edebiyat Fakültesi NanoSan Laboratuvarı Kültür koleksiyonundan alınmıştır.

##### 3.1.2. Kullanılan Kimyasal Malzemeler

Tez çalışmasında kullanılan kimyasal malzemeler Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan kimyasal malzemeler ve kullanım amaçları

Kullanılan Kimyasal	Marka	Kullanım Amacı
Nutrient Broth	Sigma Aldrich	Bakteri kültürü için sıvı besiyeri olarak kullanılmıştır.
Nutrient Agar	Sigma Aldrich	Bakteri kültürü için katı besiyeri olarak kullanılmıştır.
NiSO <sub>4</sub> x7H <sub>2</sub> O	Sigma Aldrich	Kaplama banyosunda kullanılmıştır.
NiCl <sub>2</sub> x6H <sub>2</sub> O	Sigma Aldrich	Kaplama banyosunda kullanılmıştır.
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Sigma Aldrich	Kaplama banyosunda kullanılmıştır.
CoSO <sub>4</sub> x7H <sub>2</sub> O	Sigma Aldrich	Kaplama banyosunda kullanılmıştır.
KCl	Sigma Aldrich	Yapay deniz suyu ve elektrot tamponu hazırlamak için kullanılmıştır.
NaCl	Sigma Aldrich	Yapay deniz suyu ve mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
CaCl <sub>2</sub>	Sigma Aldrich	Yapay deniz suyu ve mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
MgCl <sub>2</sub> x6H <sub>2</sub> O	Sigma Aldrich	Yapay deniz suyu hazırlamak için kullanılmıştır.

FeSO <sub>4</sub> x7H <sub>2</sub> O	Sigma Aldrich	Mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Sigma Aldrich	Mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Sigma Aldrich	Mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	Sigma Aldrich	Mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
MgSO <sub>4</sub> x7H <sub>2</sub> O	Sigma Aldrich	Yapay deniz suyu ve mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Sigma Aldrich	Yapay deniz suyu ve mineral tuzlu su hazırlamak için kullanılmıştır.
%2,5 Gluteraldehit	Sigma Aldrich	Bakteri fiksasyonu için kullanılmıştır.
Polisülfon (Moleküler Ağırlık 60.000)	Acros Organics	Nanofiber üretimi için kullanılmıştır.
N,N-dimetilasetamid (DMAC) (≥ 99)	Sigma Aldrich	Polisülfon polimeri için çözücü olarak kullanılmıştır.
Aseton (≥ 99.8 %)	Merck KGaA	Polisülfon polimeri için çözücü olarak kullanılmıştır.
AgNO <sub>3</sub>	Merck KGaA	Gümüş nanoparçacık sentezlemek için kullanılmıştır.

### 3.1.3. Kullanılan Cihazlar

Tez çalışmasında kullanılan cihazlar Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları

Kullanılan Cihaz	Marka	Kullanım amacı
Çalkalamalı İnkübatör	Biosan	Bakteri geliştirmek ve biyojenik gümüş nanoparçacık üretmek için kullanılmıştır.
Elektro Eğirme Cihazı	NanoWeb nw350	Nanofiber üretmek için kullanılmıştır.
Potansiyostat	Ivium CompactStat	Kaplama ve korozyon ölçümlerinde kullanılmıştır.

Ag/AgCl Elektrot	Referans Kimya	Elektrokimyasal çalışmalarda referans elektrot olarak kullanılmıştır.
Platin Elektrot	CHI	Elektrokimyasal çalışmalarda karşıt elektrot olarak kullanılmıştır.
Ayarlanabilir Otomatik Pipet	Eppendorf	Sıvı aktarımları için kullanılmıştır.
pH Metre	Hanna	pH ölçümleri için kullanılmıştır.
Hassas Terazi	Bel Engineering	Kimyasal malzemelerin tartımında ve ağırlık kaybı ölçümlerinde kullanılmıştır.
Manyetik Karıştırıcı	Ika	Polimeri çözdürmek için kullanılmıştır
Deiyonize Saf Su Cihazı	Merck Millipore	Besiyeri ve kaplama banyosu hazırlamak için kullanılmıştır.
Vorteks	Dragon Lab	Sıvıların karıştırılmasında kullanılmıştır.
Ultrasonik Banyo	IsoLab	Nanofiber çözütüsü içerisinde AgNP çözünmesini sağlamak için kullanılmıştır
Santrifüj Cihazı	Nüve	Biyokütle elde etmek için kullanılmıştır.
Otoklav	Tomy	Besiyerinin ve cam ekipmanların sterilizasyonu için kullanılmıştır.
Buzdolabı (+4 °C)	Arçelik	Besiyeri ve mikroorganizmaları muhafaza etmek için kullanılmıştır.
Fırın	Thermo Fisher Scientific	Ağırlık kaybı ölçümlerinde kullanılmıştır.
UV-Vis spektrofotometre	Shimadzu	Bakterinin gelişimi ve gümüş nanoparçacık varlığını doğrulamak için kullanılmıştır.
Işık Mikroskobu	Leica	Nanofiberlerin görüntülenmesi için kullanılmıştır.
Upright Mikroskop	Bscope	Diskler üzere kaplanan nanofiberlerin kalınlıklarını ölçmek için kullanılmıştır.

Taramalı Elektron Mikroskobu ve EDX	Tescan	Nanofiberlerin morfolojileri, yüzey değişimleri ile yüzeylerin elemental analizi için kullanılmıştır.
Geçirimli Elektron Mikroskobu	Jeol	AgNP ve nanofiber karakterizasyonu için kullanılmıştır.
İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektroskopisi	Thermo Fisher Scientific	Nanofiber içerisindeki AgNP miktarının belirlenmesinde kullanılmıştır.
Zeta-Potansiyel Cihazı	Malvern Instruments	AgNP boyut ve dağılım ölçümünde kullanılmıştır.
Gonyometre	Biolin Scientific	Sadece disklerin ve nanofiber ile kaplı disk yüzeylerinin ıslanabilirlik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.
Densitometre	Biosan	Bakteri kültürlerini Mcfarland 0.5 sabitine ayarlamak için kullanılmıştır.
UV Lamba	Osram Germicidal	Nanofiberlerin ve yüzeylerin sterilizasyonu için kullanılmıştır.

### 3.2. Yöntem

#### 3.2.1. Bakteri İnkübasyonunda Kullanılan Besiyerlerinin Hazırlanması

Tez çalışmasında, bakterilerin geliştirilmesi amacıyla genel besiyerlerinden Nutrient Broth (NB) ve Nutrient Agar (NA) kullanılmıştır. Bu amaçla besiyerleri tartılmış, manyetik karıştırıcıda karıştırılarak 121 °C’de 1 ATM basınç altında 15 dakika süreyle otoklavda steril edilerek kullanılmıştır.

#### 3.2.2. Gümüş Nanoparçacıkların Biyosentezi

Gümüş nanoparçacıklar, *Lysinibacillus* sp. NOSK bakterisinin süpernatantı kullanılarak sentezlenmiştir.

Biyolojik nanoparçacık sentezi için öncelikle, *Lysinibacillus* sp. bakterisi stoktan alınarak saflığı gram boyama yöntemi ile kontrol edilmiştir. Saf bakteri, NB besiyeri içerisine ekilmiş ve çalkalamalı inkübatörde 30 °C, 100 rpm çalkalama hızında 24 saat inkübe edilmiştir. Bakteri 24 saat inkübasyon sonrasında gram boyama yapılarak saflığı kontrol edilmiş ve 20 ml NB besiyerinde ikinci kez aktifleştirilmiştir. 48 saatlik

inkübasyon sonunda, bakterinin optik yoğunluğu (OD) 600 nm dalga boyunda UV-Vis spektrofotometre kullanılarak ölçülmüştür. Sonrasında bakteri kültürü, 4000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilerek, süpernatant AgNP sentezi için kullanılmıştır.

Biyojenik AgNP sentezinde, pH'ı 8'e ayarlanmış, distile su (dH<sub>2</sub>O) içerisinde hazırlanan 10 mM gümüş nitrat (AgNO<sub>3</sub>) çözeltisi kullanılmıştır. Bakteri süpernatantı hazırlanan çözeltiliye 1:9 (v/v) oranında eklenmiş, karanlık ortamda 37 °C'de 150 rpm çalkalanma hızında 1 gün inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonrasında, elde edilen nanoparçacıklar, dH<sub>2</sub>O ile birkaç defa yıkanarak, liyofilize edilmiş ve ileri analizlerde kullanılmak üzere oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir.

### **3.2.3. %20 AgNP Solüsyon Hazırlanması**

Biyojenik olarak üretilmiş AgNP'ler dH<sub>2</sub>O içerisine %20 oranında eklenmiş ve manyetik karıştırıcıda karanlık ortam altında 24 saat karıştırılmıştır. Agregasyonu önlemek için diskler solüsyon içerisinde bekletilirken eş zamanlı olarak manyetik karıştırıcı ile karıştırma işlemine devam edilmiştir.

### **3.2.4. Boncuksuz Nanofiber Üretimi İçin Elektroğirme Parametrelerinin Belirlenmesi**

Elektroğirme tekniği ile, boncuksuz (bead-free), düzgün yapıda ve çapları nano boyutta fiber elde etmek için birçok parametrenin düzenlenmesi gerekmektedir. Polimerik olan sistemler için bu parametreler, polimerin cinsi/moleküler ağırlığı, çözücünün çeşidi, çözeltinin viskozitesi, çözeltinin iletkenliği, buna ek olarak elektroğirme aparatında uygulanan voltaj, fiberlerin toplanma mesafesi, polimer solüsyonunun akış hızı, şırınga ucunun çapı (nozzle) şeklinde sıralanabilmektedir.

Polisülfon polimeri %32 oranında N,N-dimetilasetamid (DMAC):Aseton 9:1 (v:v) oranında çözücü içerisinde manyetik karıştırıcı içerisinde tamamen çözüldükten sonra çalışmalarda kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmasında 10-15 kV uygulama voltajı, 10-15 cm pompa ile kollektör uzaklığı arasındaki değerler denenmiştir.

Optimizasyon çalışması sırasında üretilen nanofiberler, genel morfolojinin belirlenmesi amacıyla lam üzerine toplanarak ışık mikroskobunda incelenmiştir.

### **3.2.5. Gümüş Nanoparçacık İçeren PSU Nanofiberlerin Elektroegirme Yöntemi ile Üretilmesi**

Polisülfon nanofiberlerin AgNP taşınması amacıyla, öncelikle çözücü içerisinde ağırlıkça %1-3-5 oranında AgNP eklenmiş, 30 kHz frekansa sahip ultrasonik su banyosunda 2 dakika süreyle sonike edilmiş ve sonikasyon sonrası oluşan çözeltiye PSU polimeri eklenerek manyetik karıştırıcıda tamamen çözünene dek karıştırılmıştır.

### **3.2.6. Nanofiber ve AgNp'lerin Karakterizasyonu**

#### **3.2.6.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)**

Üretilen nanofiberler, metal yüzeylere kaplanan nanofiberler ve korozyon analizleri sonrasında yüzey morfolojisindeki değişim ve korozif tabakanın ve biyofilm tabakasının görüntülenmesi için SEM analizi yapılmıştır. (Tescan GAIA 3 FIB-SEM/Czech Republic).

Mikrobiyal korozyona sebep olan mikroorganizmaların yüzeylerde görüntülenmesi için fiksasyon yapılmış ve bu amaçla, yüzeyler, %2,5 gluteraldehit solüsyonu içerisinde oda sıcaklığında bir gece inkübe edilmiş ve SEM analizi öncesinde kurutulan örnekler, yaklaşık 5 nm kalınlığında altın-paladyum ile kaplanarak SEM analizleri yapılmıştır. Bununla birlikte hem kaplamanın elemental analizi hem de AgNP içeren nanofiberlerde gümüş varlığının belirlenmesi amacıyla EDX analizleri de yapılmıştır.

#### **3.2.6.2. Geçirmeli elektron mikroskobu (TEM)**

Biyojenik gümüş nanoparçacık içeren nanofiberlerin görüntülenmesinde TEM kullanılmıştır. TEM analizi için AgNP içeren nanofiberler, belirlenen optimum koşullarda kollektöre sabitlenen grid üzerine toplanarak, 100–200 kV altında analiz edilmiştir (FEI HR-TEM).

#### **3.2.6.3. Nanofiberlerin taşıdığı gümüş nanoparçacık miktarının belirlenmesi**

Nanofiberlerin taşıdığı gümüş nanoparçacıkların miktarının belirlenmesi amacıyla AgNP içeren nanofiberler kesilip, 10 mg olacak şekilde tartıldıktan sonra nitrik asitte çözdürülüp, analiz edilmiştir (ICP-MS, Thermo iCAP RQ, USA).

#### **3.2.6.4. Gümüş nanoparçacık boyut belirlenmesi ve zeta potansiyel analizleri**

Üretilen biyojenik AgNP'lerin boyutlarının belirlenmesi ve zeta potansiyel değerleri için Zeta Sizer Nano Series (Malvern Instruments, ZEN 3600) kullanılmış, analizler 25 °C, tek kullanımlık küvetler kullanılarak tamamlanmıştır.

#### **3.2.6.5. ATR-FTIR analizi**

Nanofiberlerin ve üretilen AgNP'lerin, moleküler bağ karakterizasyonlarının belirlenmesi amacıyla; ATR-FTIR (Nicolet TM ISTM 50 spectrometer, Thermo Fisher Scientific, USA) kullanılmıştır.

#### **3.2.7. Kaplama Banyolarının Hazırlanması**

##### **3.2.7.1. Nikel kaplama banyosu**

Nikel kaplama banyosu, 1 M NiSO<sub>4</sub> x 7H<sub>2</sub>O, 0,1 M NiCl<sub>2</sub> x 6H<sub>2</sub>O ve 0,5 M H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ile hazırlanmış çözeltiler kullanılarak hazırlanmıştır.

##### **3.2.7.2. Kobalt kaplama banyosu**

Kobalt kaplama banyosu, 0,5 M CoSO<sub>4</sub> x 7H<sub>2</sub>O ve 1M H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ile 2:1 (v:v) oranında karıştırılarak hazırlanmıştır.

#### **3.2.8. Disklerin Kronoamperometrik Kaplanması**

Korozyon analizlerinde kullanılacak Ni ve Co diskler, 10 mm çap ve 0.78 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip pirinç disklerin kronoamperometrik yöntem ile kaplanması sonucu elde edilmiştir. Bu amaçla, diskler, 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış, ardından 1 M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile temizlenmiş ve dH<sub>2</sub>O ile yıkanıp, kuruduktan sonra kullanılmıştır. Nikel disklerin kronoamperometrik kaplanması için, 600 saniye 0,9 V, kobalt disklerin kaplanması için 900 saniye boyunca 1,2 V uygulanarak kronoamperometrik kaplama yapılmıştır.

#### **3.2.9. Korozyon Çalışmasında Kullanılan Hücre ve Elektrotlar**

Elektrokimyasal çalışmalarda, 12 ml hacimli geleneksel 3 elektrotlu teflon hücre kullanılmıştır. Korozyon çalışmalarında, referans elektrot olarak Ag/AgCl (3M KCl) karşıt elektrot olarak platin elektrot kullanılmıştır. Çalışma elektrotu olarak Ni ve Co diskler kullanılmıştır.

### 3.2.10. Metal Disklerin Nanofiber ile Kaplanması

Nanofiberlerin korozyon kaplaması için kullanılması amacıyla Ni ve Co disk yüzeyleri, eş zamanlı olarak elektroçirime cihazında PSU nanofiber ile kaplanmıştır. Kaplamada, diskler sabit ve döner kollektör (300 rpm) üzerine yerleştirilerek kaplama yapılmıştır. Kaplama, tüm disklerde kalınlığın yaklaşık olması amacıyla, zaman tutularak takip edilmiştir. Disk yüzeylerin nanofiber ile kaplanması sonrasında kaplama kalınlıkları Upright mikroskop ile görüntülenmiş ve ImageJ görüntü analiz yazılımı ile kalınlık ölçümleri yapılmıştır.

### 3.2.11. Sentetik Deniz Suyu Hazırlanması

Tez çalışmasında Ni metali için korozyon ortamı olarak sentetik deniz suyu kullanılmıştır (<http://cshprotocols.cshlp.org/content/2012/2/pdb.rec068270.full>). Sentetik deniz suyu, 450 mM NaCl, 10 mM KCl, 9 mM CaCl<sub>2</sub>, 30 mM MgCl<sub>2</sub> x 6H<sub>2</sub>O ve 16 mM MgSO<sub>4</sub> x 7H<sub>2</sub>O kullanılarak hazırlanmıştır. Karbon ve enerji kaynağı olarak 28 mM glikoz (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) eklenmiştir. Sentetik deniz suyunun pH'ı 7,8'e ayarlanmış ve glikoz içermeyen medium 121 °C'de 20 dakika steril edilmiş ve sonradan glikoz eklenerek +4 °C'de bekletilmiştir.

### 3.2.12. Mineral Tuzlu Su Hazırlanması

Tez çalışmasında Co metali için korozyon ortamı olarak Mineral Tuzlu Su (MSW) kullanılmıştır (Sekar vd., 2011). Mineral tuzlu suyu 10 mM K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 5 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,9 mM MgSO<sub>4</sub> x 7H<sub>2</sub>O, 70 mM NaCl, 0,2 mM FeSO<sub>4</sub> x 7H<sub>2</sub>O, 13 mM NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> ve 0,2 mM CaCl<sub>2</sub>x2H<sub>2</sub>O kullanılarak hazırlanmıştır. Karbon ve enerji kaynağı olarak 28 mM glikoz (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) eklenmiştir. Mineral tuzlu suyun pH'ı 7'ye ayarlanmış, glikoz içermeyen medium 121 °C'de 20 dakika steril edilmiş ve sonradan glikoz eklenerek +4 °C'de bekletilmiştir.

### 3.2.13. Bakterilerin Korozyon Deneyleri İçin Hazırlanması

Çalışmalarda kullanılan bakterilerin, her çalışma öncesi gram boyama yöntemi ile boyanarak saflıkları kontrol edilmiştir. *Pseudomonas aeruginosa* bakterisi çalışmalar öncesinde NB besiyeri içerisinde 30 °C 100 rpm'de inkübasyona bırakılmıştır. 24 saatlik inkübasyon sonrasında UV-Vis spektroskopi cihazı ile 600 nm'de yapılan absorbans ölçümleri yapılarak OD >1,0 üzerinde olduğunda korozyon deneylerinde kullanılmıştır.

Bu amaçla, bakteri 4000 rpm'de 15 dakika santrifüj edilmiş ve biyokütle korozyon hücresine inoküle edilmiştir.

Korozyon deneylerinde kullanılan bir diğer bakteri olan *Aeromonas eucrenophila* NB besiyerinde 30 °C 100 rpm'de inkübasyona bırakılmıştır. 24 saat aktifleştirme sonrasında Mcfarland 0,5 değerine ayarlanarak korozyon hücresine ekim yapılmıştır.

Tez çalışmasında incelenen deney düzenekleri: (n=3)

Abiyotik ortamlarda:

- Sistem 1: abiyotik kontrol ASW/MSW ortamına konulan metal diskler
- Sistem 2: abiyotik kontrol ASW/MSW ortamına konulan sadece nanofiber (PSU) kaplı metal diskler
- Sistem 3: abiyotik kontrol ASW/MSW ortamına belirli konsantrasyonlarda biyojenik gümüş nanoparçacık eklenerek üretilmiş nanofiber (PSU+AgNP) kaplı metal diskler

Biyotik ortamlarda:

- Sistem 4: tek tek mikroorganizma inoküle edilmiş ASW/MSW ortamına konulan metal diskler
- Sistem 5: tek tek mikroorganizma inoküle edilmiş ASW/MSW ortamına konulan sadece nanofiber (PSU) kaplı metal diskler
- Sistem 6: tek tek bakteri inoküle edilmiş ASW/MSW ortamına konulan biyojenik gümüş nanoparçacık eklenerek üretilmiş nanofiber (PSU+AgNP) kaplı metal diskler

### **3.2.14. Elektrokimyasal Korozyon Analizi**

Korozyon analizinde potansiyostat ile 3 elektrotlu klasik korozyon hücresi kullanılmıştır. Platin karşıt elektrot olarak ve Ag/AgCl (3M KCl) referans elektrot olarak kullanılmıştır. Çalışma elektrotu olarak Ni ve Co diskler kullanılmıştır. Elektrokimyasal analizlerde, potansiyel tarama hızı 1 mV s<sup>-1</sup> olarak seçilmiştir. Tüm deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır. Açık devre potansiyel değerinin belirlenmesi amacıyla belirlenen sürelerde OCP takip edilmiş ve denge potansiyeline ulaşılması ile Lineer Taramalı Voltametri (LSV) deneylerinde denge potansiyelinden 250-300 mV anodik ve katodik yönde tarama yapılmıştır.

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) deneyleri 20 kHz-50mHz frekans aralığında 5 mV (RMS) voltaj uygulanarak çalışılmıştır. Elde edilen veriler, ZSimpwin ve EISSA bilgisayar programları ile analiz edilmiştir. Her empedans verisi, Nyquist ve Bode eğrileri olarak kaydedilmiştir.

### **3.2.15. Korozyon ve Mikrobiyal Korozyon Ortamlarının pH Değerlerinin Takibi**

Abiyotik ve biyotik ortamlarda pH değişimleri 3 paralel olacak şekilde ölçülmüştür. Tüm düzeneklerde öncelikle  $t=0$  anında ölçüm yapılmış ve korozyon deneyleri başlatılmıştır. Korozyon süreleri sonrasında ortamın pH'ı tekrar ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır.

### **3.2.16. Kütle Kaybı Deneyleri**

Kütle kaybı analizi öncesinde yüzeyi etanol ve distile su ile yıkanmış metal diskler, kurutulduktan sonra hassas terazi ile tartılıp, korozyon sistemleri içerisinde yerleştirilmiştir. Bu amaçla korozyon analizleri incelenen yüzeyler:

- 1) Sadece metal yüzey
- 2) Sadece nanofiber ile kaplanan metal yüzey
- 3) Biyojenik gümüş nanoparçacık içeren nanofiber ile kaplanan metal yüzeyler olarak dizayn edilmiştir.

Belirlenen korozyon immersiyon sürelerinde tutulan diskler, ortamdaki çıkarılmış, çok yavaş bir şekilde peçete ile silinmiş, distile su ve aseton ile yüzey yıkanmış ve 80 °C'de fırında kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan diskler, tartılarak, korozyon oranları (mm/yıl) aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır:

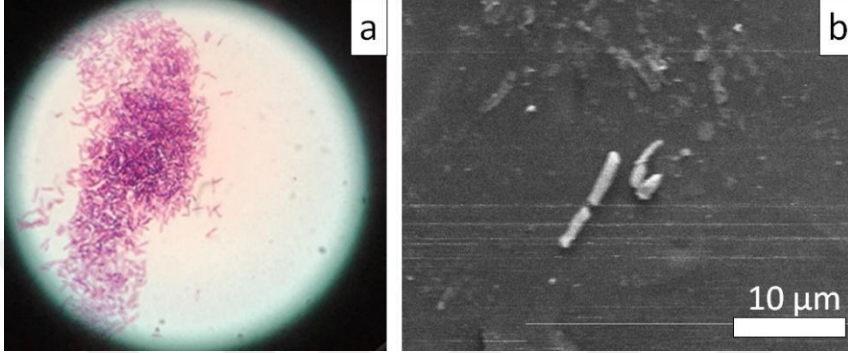
$$C = (R \cdot W) / (A \cdot t \cdot d) \text{ (Edwards vd., 1994)}$$

Bu formülde, W, A, t ve d sırası ile kütle kaybı (g), örnek yüzey alanı (cm<sup>2</sup>), immersiyon süresi (s), ve kullanılan malzemenin yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>) ile hesaplanmıştır. Elde edilen değer cm/s olup, bu değer mm/yıl değerine  $3,154 \times 10^8$  çarpılması ile ulaşılmıştır. Kütle kaybı deneyleri beş tekrar olacak şekilde dizayn edilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

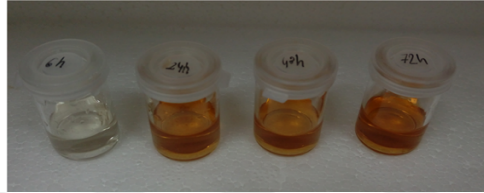
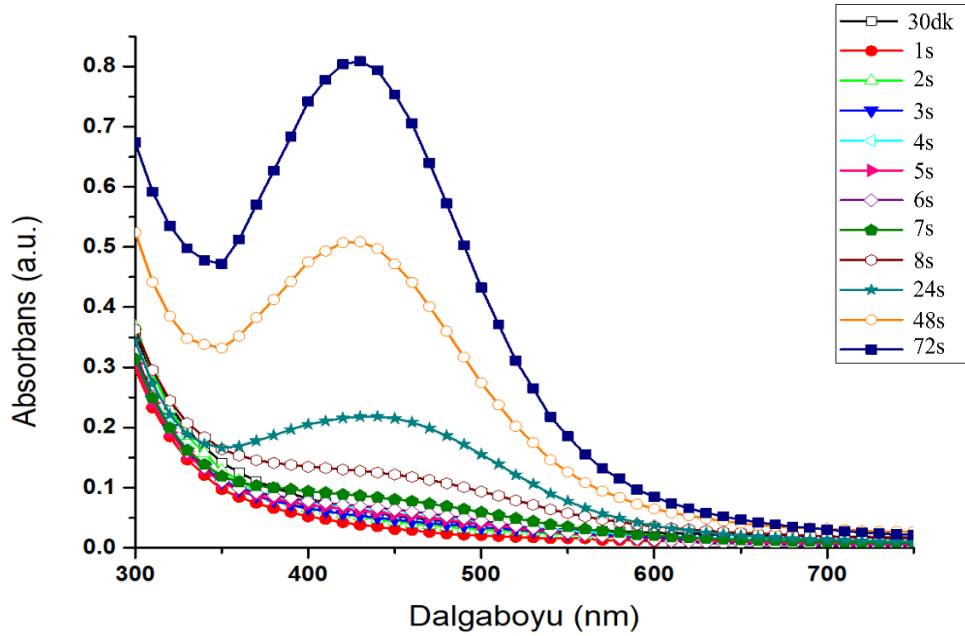
### 4.1. Gümüş Nanoparçacık Biyosentezi

Gümüş nanoparçacıkların sentezlenmesi için *Lysinibacillus* sp. NOSK bakterisi kullanılmıştır. Bakterinin ışık mikroskobu altındaki görüntüsü ve SEM mikrografı Şekil 4.1.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. *Lysinibacillus* sp. bakterisi a) mikroskop görüntüsü b) SEM mikrografı

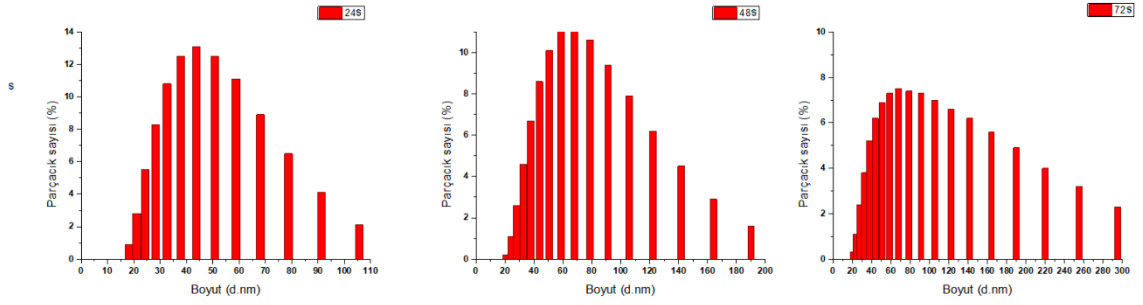
Gümüş nanoparçacık sentezinde, 10 mL bakteri süpernatantı, 90 ml 1 mM  $\text{AgNO}_3$  solüsyonuna (pH 8) ilave edilmiş, 37 °C, 150 rpm çalkalamalı inkübatörde inkübasyona bırakılmıştır. Bu süreçte belirli zaman aralıklarında örnek alınarak, örnekler UV-Vis spektroskopisi analizi yapılmıştır. Şekil 4.2.'de AgNP'lerin zamana karşı UV-Vis spektroskopisi analiz sonuçları verilmiştir. Ayrıca, grafik içerisinde verilen resimde, 6h, 24h, 48h ve 72h sonunda AgNP oluşumu sonrası renk değişimi görülmektedir. 6h inkübasyon sonunda renk değişimi gözlenmeye başlamış, 24h sonunda sarı-kahverengi bir renk oluşmuş ki bu renk AgNP oluşumunda beklenen renk olup, inkübasyon süresi arttıkça renk koyulaşmıştır (Kalimuthu vd., 2008). Bu duruma ilave olarak, AgNP için elde edilen 420-430 nm'de beklenen karakteristik yüzey plazmon rezonans piki AgNP oluşumunu kanıtlamaktadır (Gou vd., 2015; Otari vd., 2015).



Şekil 4.2.  $AgNO_3$  solüsyonu-*Lysinibacillus* sp. NOSK süpernatantın zamana karşı takip edilen UV-Vis absorpsiyon spektrumu ve zaman karşı renkteki değişim

AgNP'lerin boyutları 24s-48s ve 72s sonunda alınan örneklerden analiz edilmiştir.

Şekil 4.3.'te belirtilen zamanlarda elde edilen AgNP'lerin boyut dağılım histogramı verilmiştir. 24s sonunda AgNP boyutu yaklaşık  $42 \pm 5,3$  nm ve Polidispersite İndeksi (PDI) 0,166'dir. İnkübasyon süresi arttıkça parçacık boyutu artmış, 48h için boyut yaklaşık  $61 \pm 6,7$  iken 72s için boyut  $76 \pm 8,5$  nm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, nanoparçacık entegrasyonları ile ilgili çalışmalarda 24h inkübasyon sonucunda elde edilecek AgNP'ler nanofiber içerisine eklenmiştir.



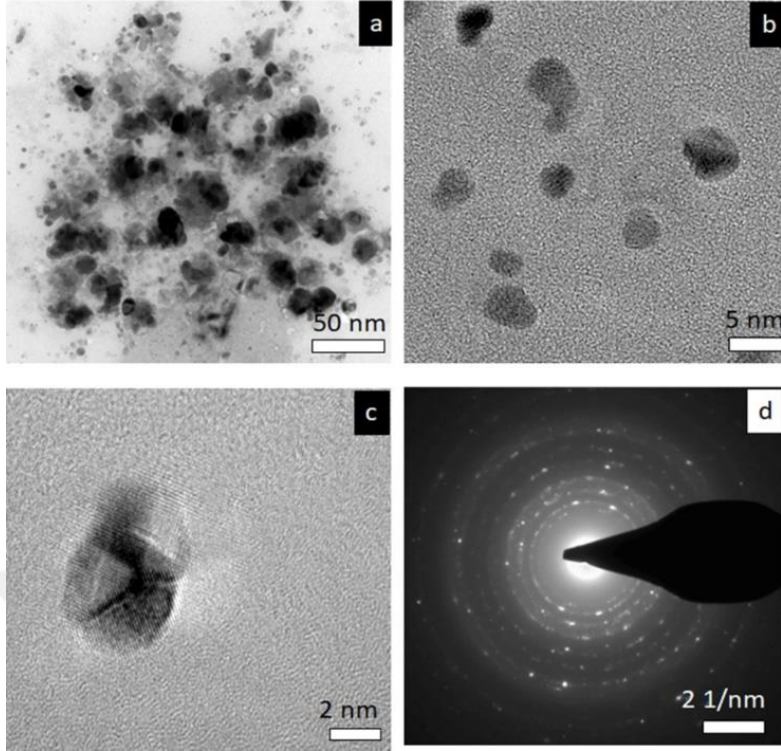
Şekil 4.3. Gümüş nanoparçacık boyut dağılım histogramı

Dinamik ışık saçılımı analizinde ayrıca parçacıkların Zeta Potansiyel değerleri de ölçülmüş ve değerler Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Zeta potansiyel değeri  $\xi > \pm 30$  mV ise nanoparçacık yüzeyinde yüksek elektrik yüzey yükü sonucu nanoparçacıklar agregasyondan korunmaktadır. 24s sonunda üretilen AgNP'lerin Zeta Potansiyel değeri -23,1 mV olarak bulunmuş, bu değer parçacıkların stabil olduğunu göstermektedir (Arulmozhi vd., 2013).

Çizelge 4.1. Farklı inkübasyon zamanlarında oluşan gümüş nanoparçacıkların Zeta Potansiyel değerleri (6 s, 8 s, 24 s, 48 s ve 72 s)

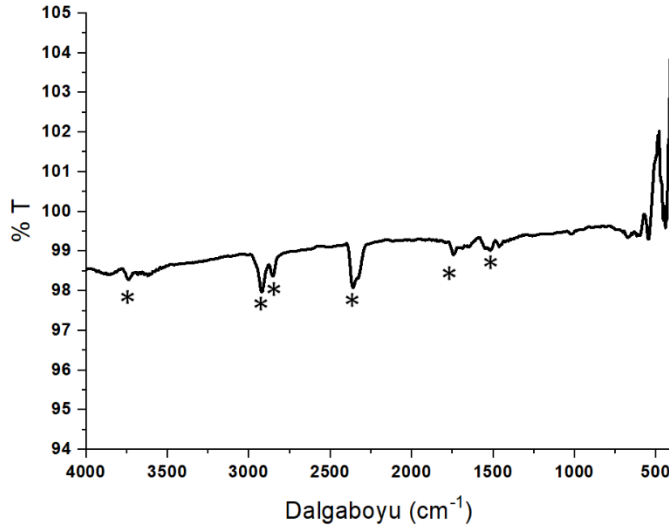
Zaman / Saat	Zeta Potansiyel (mV)
6	-18 ± 0,27
8	-21,3 ± 0,93
24	-23,1 ± 1,97
48	-19,7 ± 1,29
72	-18,8 ± 2,15

Parçacıkların morfolojilerinin belirlenmesi amacıyla TEM analizi yapılmış ve Şekil 4.4.'de (a) 50 nm (b) 5 nm (c) 2 nm ölçekler ve (d) seçilmiş alan elektron kırınımı (SAED) verilmiştir. TEM analizinden AgNP'lerin küre şeklinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, SAED analizi ile de parçacıkların kristal yapıda oldukları bulunmuştur.



Şekil 4.4. Gümüş nanoparçacıkların TEM mikrografları (a-c) ve (d) SAED analizi

Biyojenik AgNP üretiminde hangi moleküllerin indirgeyici ve parçacık oluşumunda etkili olduğunun belirlenmesi amacıyla ATR-FTIR analizi yapılmış olup Şekil 4.5.'de ATR-FTIR spektrumu verilmiştir. Şekil 4.5.'te verilen spektrum pikleri incelendiğinde,  $1646\text{ cm}^{-1}$  ve  $1541\text{ cm}^{-1}$  pikleri proteinlerin amid I ve amid II bükülme bantlarına karşılık gelmektedir (Kardas vd., 2014).  $3619\text{ cm}^{-1}$  ve  $3736\text{ cm}^{-1}$  pikler, hidroksil fonksiyonel grupların O-H gerilme titreşim ve proteinlerin amino fonksiyonel N-H gerilme titreşimine denk gelmektedir (Gou vd., 2015). Diğer pikler,  $2923\text{ cm}^{-1}$ ,  $2851\text{ cm}^{-1}$  ve  $1741\text{ cm}^{-1}$  ise proteinlerin, nükleik asitlerin ve karbonhidratların  $\text{CH}_2$  asimetrik ve simetrik esneme ve trigliserit ve kolesterol esterlerinin C=O esneme bandına karşılık gelmektedir. Sonuç olarak bakteri dışına salınan ekstrasellüler biyomoleküllerin AgNP oluşumu ve stabilizasyonunda rol oynadığı bulunmuştur (Baygar vd., 2019).

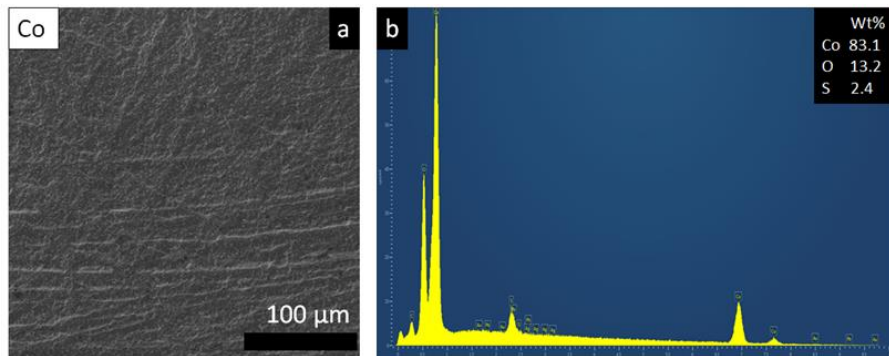


Şekil 4.5. Gümüş nanoparçacık üretiminde kullanılan ekstrasellüler biyomoleküllerin ATR-FTIR spektrumu

#### 4.2. Disklerin Co ve Ni ile Kaplanması

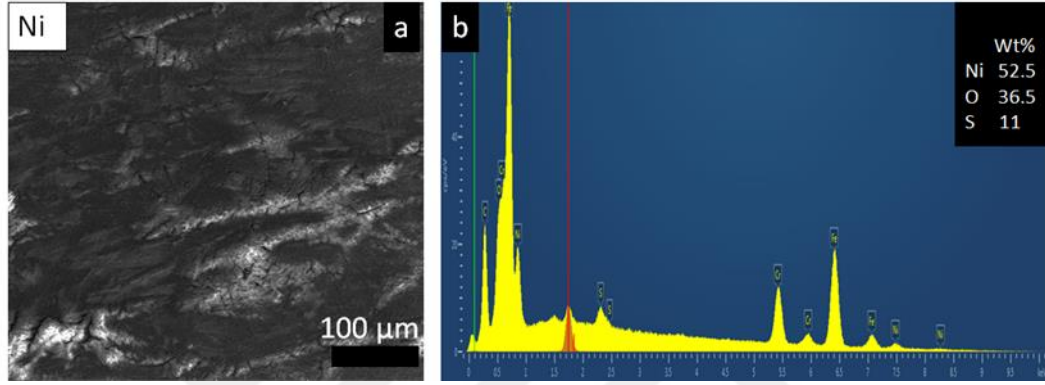
Tez kapsamında çalışılan metaller, sıklıkla mikroorganizma ile temasta olan; su/boru sistemleri, sağlık sektöründe kullanılan cihazlar ve yakıt sistemleri gibi sistemlerde ana malzeme olarak kullanılmalarından dolayı seçilmiştir. Çalışma için kullanılan disklerin yüzey görüntüleri için SEM ve elementel analiz için EDX kullanılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan Co metali ürün ve uygulama bazında diğer metallere göre daha az kullanılmaktadır. Fakat, kobalt ve kobalt alaşımları, özellikle endüstriyel uygulamalarda, kobalt temelli süper alaşımlar (Sims vd., 1987), manyetik ürünler ve ortamlar (Metikoš-Huković vd., 2007) ve ameliyat malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır (Contu vd., 2005). Tez çalışmasında kullanılan Co disk'in SEM ve EDX analizi Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Kobalt disk yüzeyinin SEM mikrografı ve EDX analizi

Tez çalışmasında kullanılan bir diğer metal Ni ise paslanmaz çelik gibi alaşımların yapısında bulunmakta ve korozyon direncini arttırmaktadır. Nikel ayrıca, çok yüksek sıcaklıktaki suların geçtiği nükleer güç reaktörlerinde kullanılan birçok alaşımda yer almaktadır. Nikel korozyondan korunmayı, birçok korozyon ortamında pasifleşme davranışı ile yani yüzeyinde biriken oksit ve hidroksit tabakası ile başarmaktadır (Friend vd., 1980; Beverskog., 1997). Tez çalışmasında kullanılan Ni disk'in SEM ve EDX analizi Şekil 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Nikel disk yüzeyinin SEM mikrografı ve EDX analizi

### 4.3. Polisülfon Nanofiber Optimizasyon Çalışması

Elektroegirme sistemi değişik polimerlerden, polimer karışımlarından, inorganik malzemelerden ve supramoleküler yapılardan yüksek voltaj kullanılarak oldukça basit, maliyeti düşük ve etkili bir biçimde mikron altı ve nano boyutta düşük maliyetle nanofiber üretim tekniğidir (Agarwal vd., 2011; Celebioglu vd., 2012; Greiner vd., 2007; Li vd., 2004; Ramakrishna vd., 2005; Wendorff vd., 2012). Teknik ile elde edilecek nanofiberin boncuksuz, düzgün yapıda ve çaplarının nano boyutta olması için birçok parametrenin düzenlenmesi gerekmektedir. Sistemde kullanılan polimerin cinsi/moleküler ağırlığı, çözücünün çeşidi, çözeltinin viskozitesi ve çözeltinin iletkenliği denemelerle optimize edilmelidir. Ayrıca sistemde, elektroegirme aparatında uygulanan voltaj, fiberlerin toplanma mesafesi, polimer solüsyonunun akış hızı ve şırınga ucunun çapı da istenilen özellikte nanofiber elde edilmesi için önemlidir. Optimizasyonun her aşamasında nanofiber yapısının belirlenmesi (boncuk yapısının olup, olmaması) amacıyla ışık mikroskobu kullanılmış ve en son aşamada optimize edilen şartlar sonrasında nanofiberlerin morfolojileri SEM analizleri ile belirlenmiştir.

Düzgün yapıda ve boncuksuz nanofiberlerin optimizasyonu ve üretimi için literatürde bulunan San Keskin vd., (2015) tarafından kullanılan koşullar modifiye edilerek, PSU nanofiber elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla uygulanan voltaj ve fiberlerin toplanma mesafesi detaylı optimize edilmiştir. Özellikle uygulama voltajı, nanofiber morfolojisini etkileyen önemli işlem parametrelerinden birisidir. Yüksek voltaj uygulandığında, iğne ucunda bulunan polimer solüsyonun salınım damlasının yüksek olması sonucu, yüzey gerilimi ve dış alan üzerine uygulanan Coulombic elektrostatik kuvvetler ile karşılaşacaktır. Elektrik alanının gücü bir kritik değeri aştığında, elektrostatik kuvvetler polimer çözeltisinin yüzey gerilimini aşar ve böylece sıvı jetin ucundan zorlama gücüyle itilir (Katti vd., 2004).

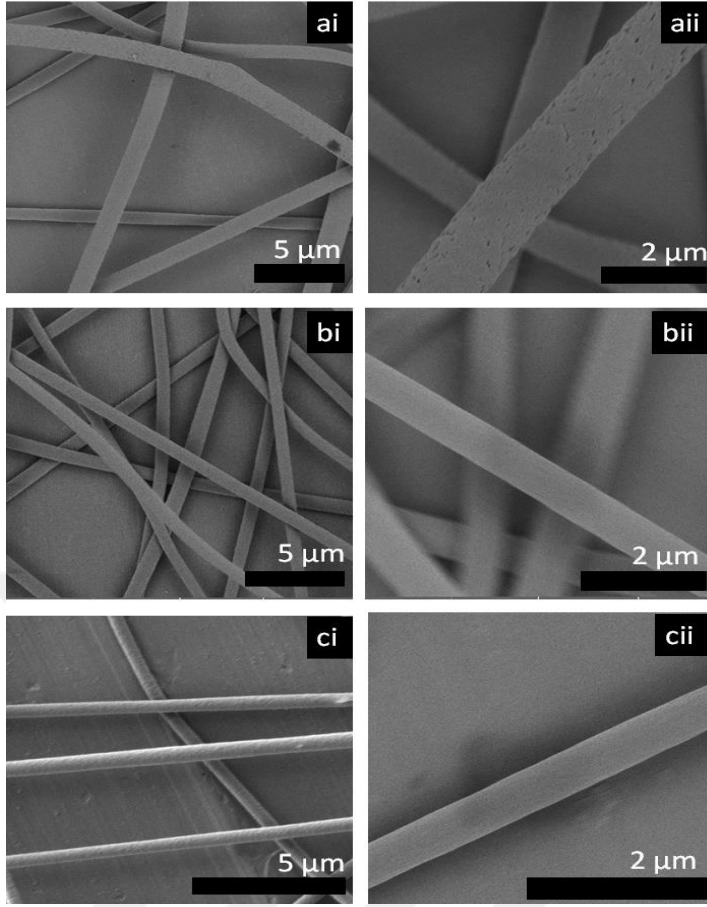
İğne ucu ile toplayıcı kollektör arasındaki mesafe, jetin üzerinde bulunan çözeltinin hem uçuşma zamanını hem de elektrostatik kuvvetlerin yoğunluğunu, direkt olarak etkilemekte ve nanofiber oluşumda önemli bir parametredir. Polimer içindeki çözeltinin buharlaşması için yeterli zamana ihtiyacı vardır. Ayrıca çözücünün buharlaşması için geçen süre arttığında, oluşan nanofiberler daha kuru bir şekilde kollektör üzerinde birikir. İğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe kısa olduğunda elektrostatik kuvvetlerin etkisi fazla olur. Mesafe çok kısa olduğunda, fazla çözücü, fiberlerin bağlantı oluşturmak üzere temas ettikleri yerde birleşmesine neden olabilir (Homayoni vd., 2009).

Polisülfon nanofiber üretimi için uygulanan optimizasyon koşulları Çizelge 4.2.'de verilmektedir. Nanofiber üretimi için voltaj 10-15 kV arasında değiştirilerek uygulanmış, elde edilen nanofiberlerin boncuklu olup olmadıkları her aşamada ışık mikroskobu ile takip edilmiştir. Nanofiber üretimi için 15 kV uygulanan voltaj optimum uygulama voltajı olarak belirlenmiş ve sonrasında iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe için farklı değerler uygulanarak (10-15 cm), boncuksuz PSU üretimi denenmiştir.

Çizelge 4.2. Düzgün yapıda ve boncuksuz PSU nanofiber üretimi için optimize edilen nanofiber parametreleri (Sıcaklık; 23 °C ± 2, Nem; %35 ± 3)

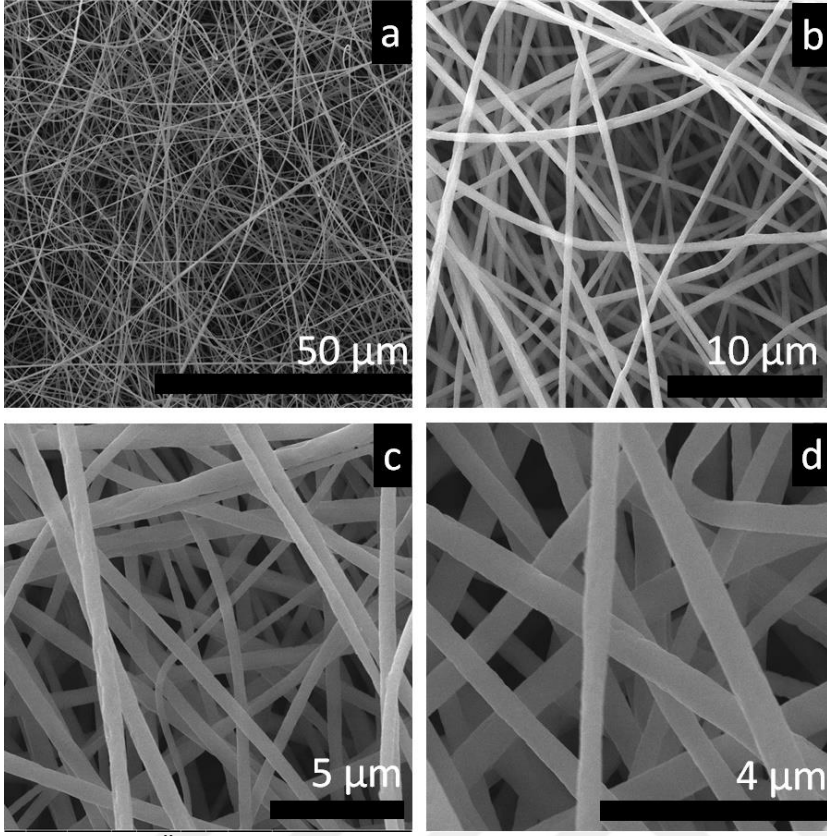
Uygulanan Voltaj (kV)	Toplanma mesafesi (cm)	Fiber Yapısı
10	10	Büyük boncuk
11	10	Büyük boncuk
12	10	Az sayıda boncuk
13	10	Az sayıda boncuk
14	10	Az sayıda boncuk
<b>15</b>	<b>10</b>	<b>Boncuksuz</b>
<b>15</b>	<b>11</b>	<b>Boncuksuz</b>
<b>15</b>	<b>12</b>	<b>Boncuksuz</b>
15	13	Büyük boncuk
15	14	Büyük boncuk
15	15	Fiber oluşmadı

15 kV'da iğne ucu ile toplayıcı arasındaki 10, 11 ve 12 cm mesafelerde boncuksuz nanofiber elde edilmiş olup, SEM analizi ile nanofiber çapları ölçülmüş ve Şekil 4.8.'de verilmiştir. İğne ucu ve toplayıcı arasındaki mesafe 10 cm olarak uygulanmış ve nanofiber çapı  $1409 \pm 240$  nm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.8. bi-bii görülen fiberlerde ise iğne ucu ve toplayıcı arasındaki mesafe 11 cm olarak uygulanmış ve fiber çapı  $814 \pm 206$  nm olarak ölçülmüştür. 12 cm iğne ucu ve toplayıcı arasındaki mesafede ise fiber çapı  $960 \pm 170$  nm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.8 ci-ii). En küçük çaplı nanofiber, iğne ucu ve toplayıcı arasındaki mesafe 11 cm olarak uygulandığında elde edilmiş ve bundan sonraki çalışmalarda bu optimizasyon değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.8. ai-ii) 10 cm bi-bii) 11 cm ve ci-cii) 12 cm iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafenin PSU nanofiberin çapına etkisinin belirlenmesi amacıyla SEM analizi ile elde edilen mikrograflar

Polimer çözeltisi 1 mL'lik şırınga içine doldurularak yatay bir şekilde, akış hızı 0,5 mL/saat olarak ayarlanan pompanın üzerine yerleştirilmiştir. Yüksek voltaj güç kaynağının elektrotlarından biri metal iğnenin ucuna diğeri de topraklanmış döner kollektöre bağlanmış ve 10-15 kV'luk voltaj uygulanmıştır. Böylece nanofiberler alüminyum folyo sarılmış toplayıcıya,  $23 \pm 1$  °C sıcaklıkta ve yaklaşık %35 bağıl nem koşullarında kapalı bir ortamda toplanmaya başlanmıştır. Elde edilen nanofiberlerin morfolojisi Şekil 4.9.'da verilmiştir. Elde edilen NF'ler boncuksuz ve homojen bir dağılım göstermektedir.



Şekil 4.9. Üretilen polisülfon nanofiberlerinin farklı büyütmelerde alınan SEM mikrografları (a-d).

#### 4.4. Nanofiberlerin Metal Diskler Üzerine Kaplanması

Optimize edilen nanofiberlerin eş zamanlı olarak metal yüzeylerine toplanması amacıyla, elektroegirme kabini içerisinde yer alan toplayıcı kısmının üzerine, çalışılan metal disk yerleştirilmiş, elektrot sistemi bağlanarak, nanofiberlerin disk üzerine atışı ile kaplanması sağlanmıştır.

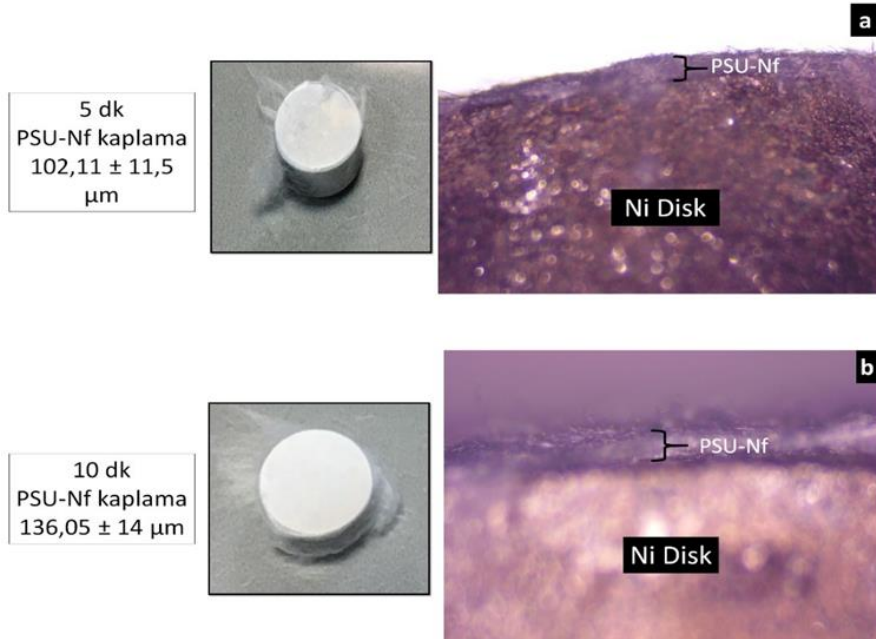
Tez çalışmasının ilk aşamasında nanofiber kaplamalar sabit ya da döner kollektör kullanılarak, en kısa sürede yüzeyi tamamen kaplayan bir kaplamaya ulaşım hedeflenmiştir. Bu çalışmalarda PSU-Nf'ler sabit toplayıcı kullanıldığında disk yüzeyinde gelişigüzel katmanlar oluştuğu için PSU-Nf'lerin düzgün katmanlar şeklinde kaplama yapılması amacıyla döner toplayıcı kullanılmıştır. Sabit ve döner toplayıcının kaplamaya etkisi Şekil 4.10.'da verilmektedir. Kaplanan metal malzemeleri korozyondan korunması hedeflendiğinden, kaplama yapılma süresince, yüzeyin tamamen nanofiber ile kaplanması sürekli atım kontrol edilerek ve süre tutularak çalışmıştır.

Yapılan kaplama kalınlığının korozyon deneylerinde daha etkili olacağı düşünölmekte olup bu sebeple, tüm metal yüzeylerinin tamamen kaplanmasını sağlayan süre seçilmiş ve kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Nikel yüzeylere PSU-Nf ile kaplama yapılması için en uygun toplayıcının seçilmesi

En kısa sürede ve homojen bir kaplama yapılması için bu çalışmada döner toplayıcı kullanılmıştır. Kaplama çalışmasında, 5 dk ve 10 dk sürelerince Ni disk yüzeyine kaplama yapılarak, kaplama süresi ve kaplama kalınlığı bulunmuştur. Şekil 4.11.'de disklerin 5 dk ve 10 dk süre sonunda, döner toplayıcıda PSU-Nf ile kaplanmaları sonrasında kalınlık ölçüm sonuçları ve fotoğrafları verilmiştir.

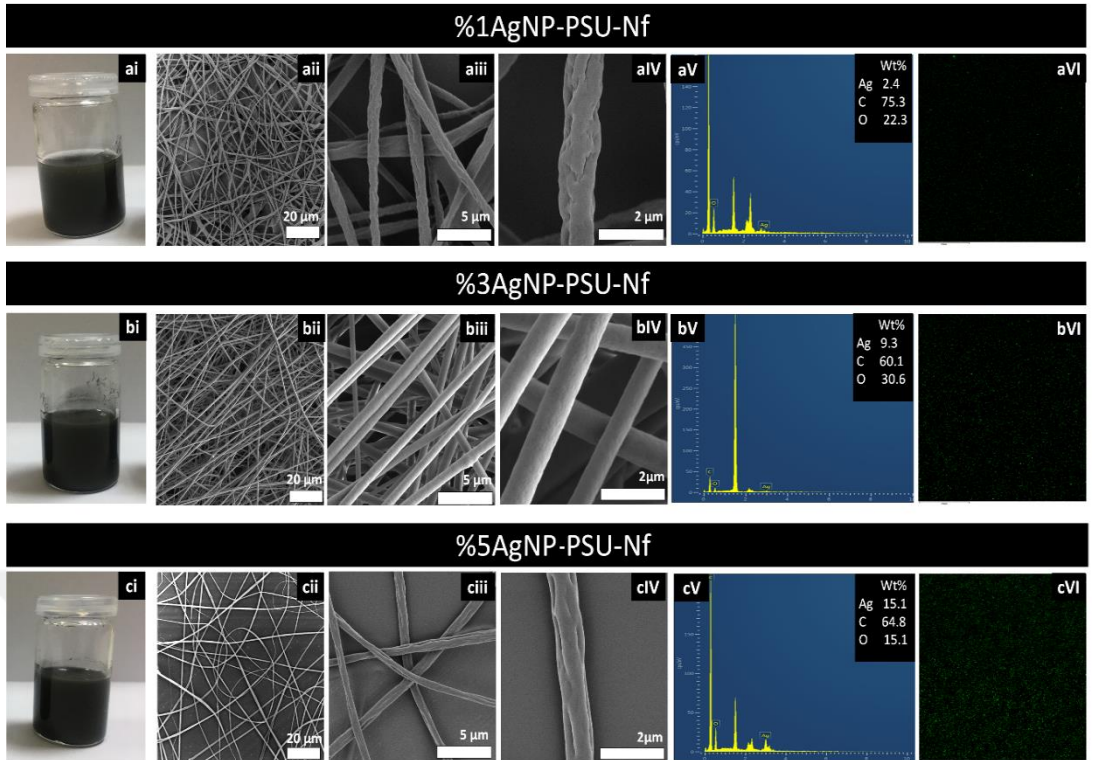


Şekil 4.11. Nikel disk yüzeylerin 5 ve 10 dk polisülfon nanofiber ile kaplanması sonrasında kaplama kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla çekilmiş upright mikroskop görüntüleri

5 dakika kaplama sonucunda, kaplama kalınlığı  $102,11 \pm 11,5 \mu\text{m}$  olarak ölçölmüştür. Bu süreçte, tüm yüzey PSU-Nf ile kaplanmamıştır. 10 dk kaplama süresince ise tüm yüzey kaplanmış ve kaplama kalınlığı  $136,05 \pm 14 \mu\text{m}$  olarak ölçölmüş ve 10 dakika kaplama süresi ve kalınlık bundan sonraki çalışmalar için rutinde kullanılmıştır.

#### 4.5. PSU Nanofiberin AgNP İçeriğinin Belirlenmesi

AgNP taşıyan Nf üretimi amacıyla farklı konsantrasyonlarda (%1, %3 ve %5 (w/w)) AgNP içeren PSU polimerler 24s manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve polimerlerin renk değişimleri Şekil 4.12. (ai, bi, ci)'de verilmiştir. Bu polimerlerden elde edilen Nf'lerin SEM mikrografları %1AgNP-PSU-Nf (Şekil 4.12. aii, aiii, aIV), %3AgNP-PSU-Nf (Şekil 4.12. bii, biii, bIV) ve %5AgNP-PSU-Nf (Şekil 4.12. cii, ciii, cIV) verilmiştir. AgNP içeren PSU-Nf'lerin morfolojilerine bakıldığında, AgNP eklenmesinin nanofiber morfolojisini etkilemediği görülmüştür. Ayrıca, EDX analizleri ile AgNP içerikleri de gösterilmiş olup, EDX haritalaması ile de AgNP'lerin fiber içindeki dağılımları haritalanmıştır (Şekil 4.12. aVI, bVI, cVI). Çizelge 4.3.'te AgNP içeren Nf'lerin ICP-MS analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre; %1, %3 ve %5 AgNP içeren ve rastgele kesilerek analiz edilen nanofiberlerin gümüş içerikleri sırasıyla  $4,022 \pm 3,2\%$ ,  $4,143 \pm 2,2\%$  ve  $4,791 \pm 5,6$  bulunmuştur. Gümüş nanoparçacık içeren Nf'lerin ICP analizi ile gümüş miktarı belirlenmesinde bazı problemler belirlenmiştir. Öncelikle elektroçürme prosesinde jetin düzensiz atım yapmasından kaynaklı, polimer içerisine eklenen maddeler fiber içerisinde homojen dağılım göstermemektedir. ICP analizinde, üretilen fiber, rastgele bölgelerden kesilerek, 3 paralel olacak şekilde çalışılmıştır. Bu durumdan dolayı PSU-Nf'ler artan konsantrasyon AgNP içermesine karşın, analiz sonuçlarına bakıldığında NP miktarlarının birbirlerine çok yakın olduğu bulunmuştur.

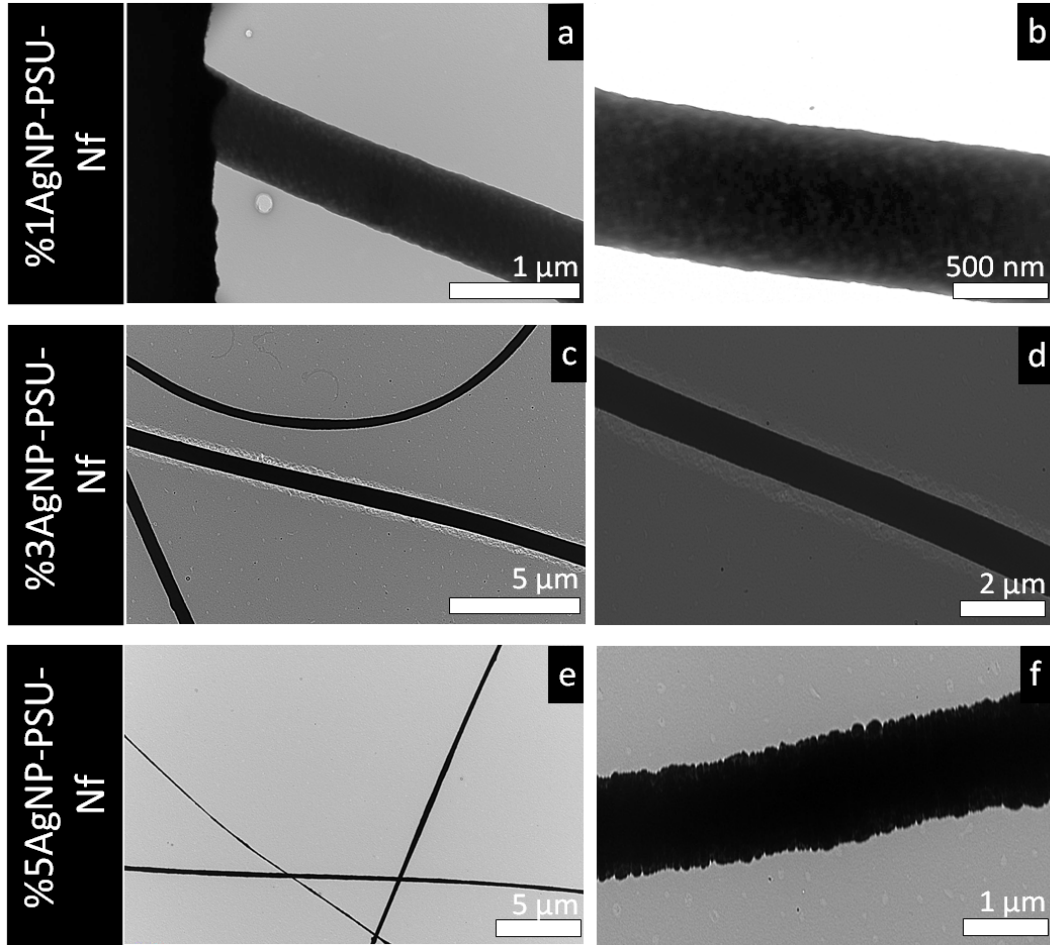


Şekil 4.12. %1, %3 ve %5 AgNP içeren polimerlerin renk değişimleri (ai, bi, ci), %1 (aii, aiii, aIV), %3 (bii, biii, bIV) ve %5 (cii, ciii, cIV) AgNP içeren Nf'lerin SEM mikrografları, ve EDX haritalaması (aVI, bVI, cVI)

Çizelge 4. 3. Artan konsantrasyonda gümüş nanoparçacık içeren polisülfon nanofiberlerde bulunan AgNP miktarları

Nanofiber	Polimerde AgNP oranı (% wt)	AgNP miktarı (ppb)
Polisülfon	1	4,022 ± 3,2
	3	4,143 ± 2,2
	5	4,791 ± 5,6

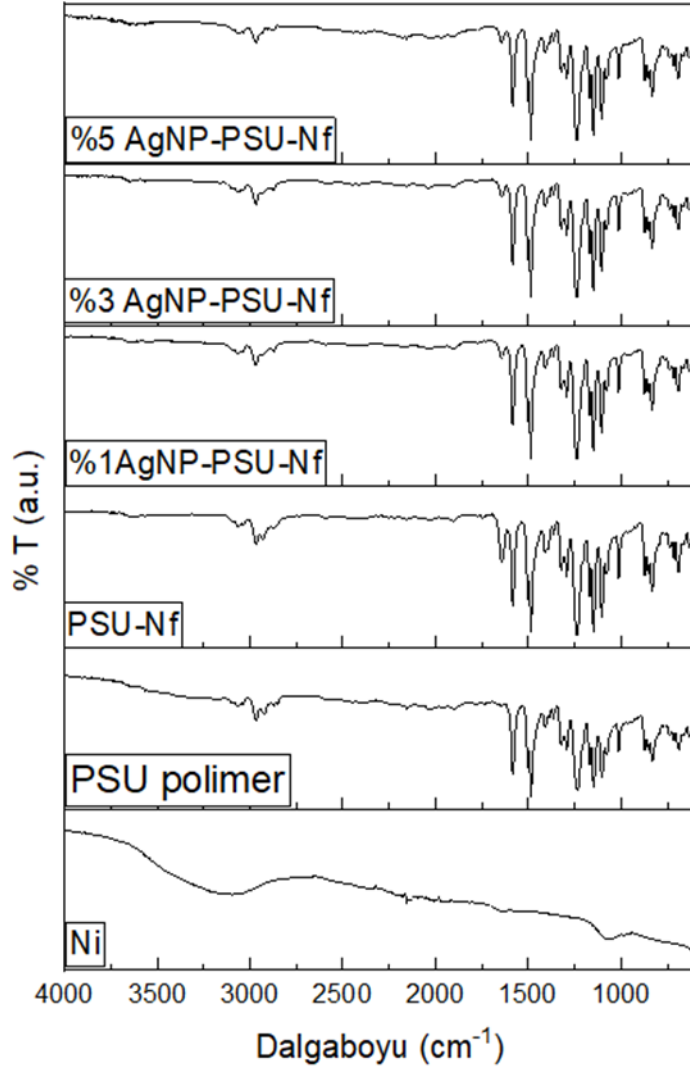
Şekil 4.13.'te artan konsantrasyonda AgNP içeren polisülfon nanofiberlerin TEM mikrografları verilmektedir. Bu mikrograflara bakıldığında, PSU-Nf'lerin içinde ve dışında NP görülmekte olup, ayrıca agregasyona da rastlanmıştır.



Şekil 4.13. Artan konsantrasyonda gümüş nanoparçacık içeren polisülfon nanofiberlerin TEM mikrografları

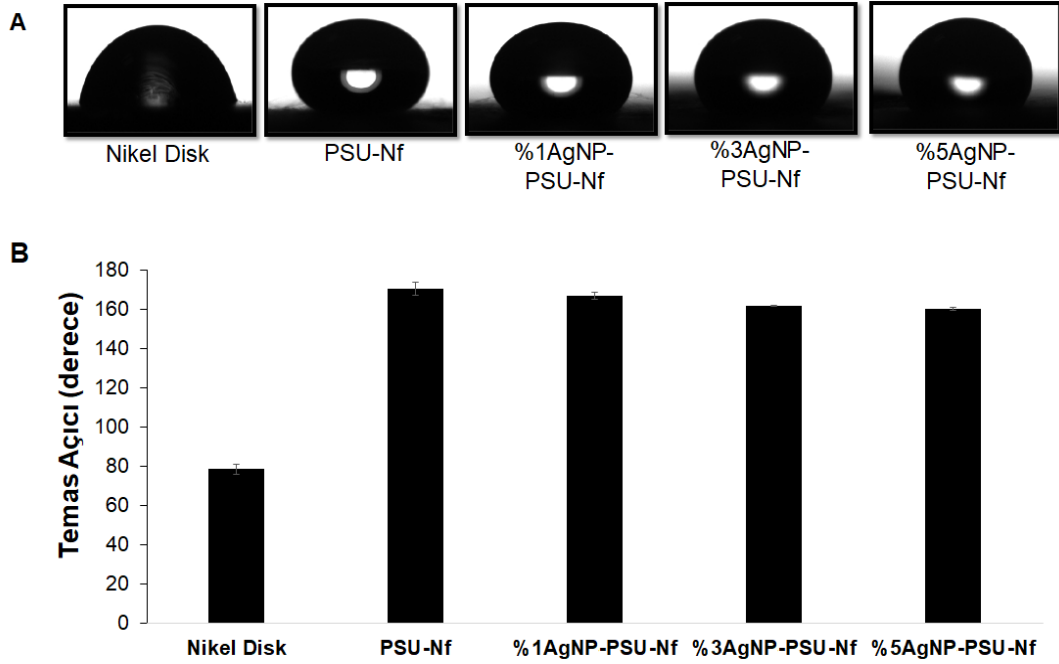
#### 4.6. Ni ve PSU Nf ile Kaplanmış Ni Disklerin Karakterizasyonu

Şekil 4.14.'te Ni disk, PSU polimer, PSU-Nf ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf'lerin ATR-FTIR spektrumu verilmiştir.  $1244\text{ cm}^{-1}$ ,  $1489\text{ cm}^{-1}$  ve  $1585\text{ cm}^{-1}$  pikler polisülfonun karakteristik pikleridir. Sadece Ni yüzey ve PSU polimerde görülen  $3500\text{ cm}^{-1}$ 'deki geniş pik, hidroksil gruplarına karşılık gelmektedir. PSU-Nf ile kaplama yapılması sonrası bu pik azalmıştır.



Şekil 4.14. Nikel disk, PSU polimer, PSU-Nf ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf'lerin ATR-FTIR analiz sonuçları

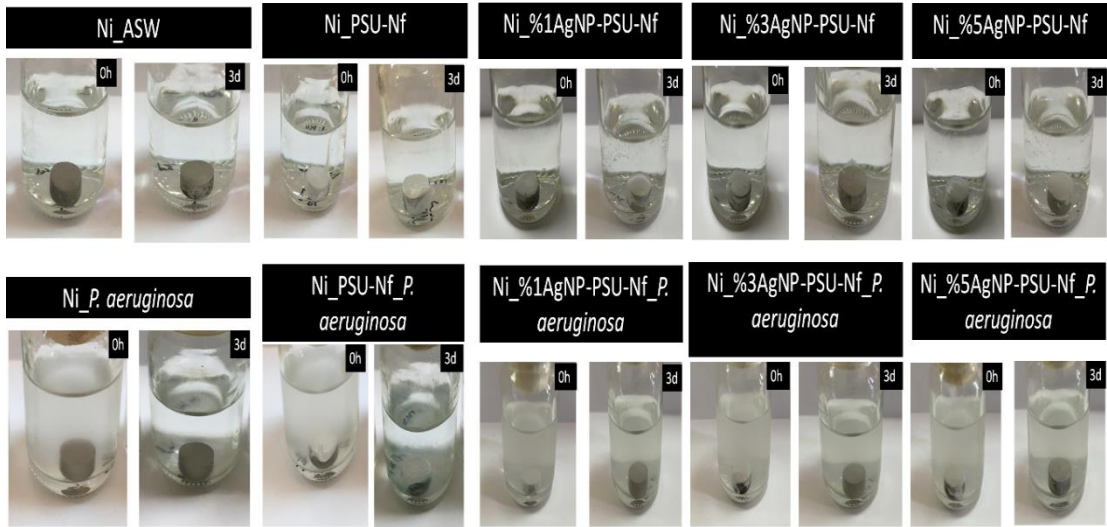
Sadece Ni yüzey ve bu yüzeyin PSU-Nf ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf kaplama sonrasında temas açıları (TA) ve temas açı resimleri Şekil 4.15.'te verilmiştir. Sadece Nikel yüzeyin TA değeri  $78,34 \pm 2,4^\circ$  olup bu değer PSU-Nf ile kaplama sonrası artarak  $170,48 \pm 3,3^\circ$ 'ye ulaşmıştır. TA değerinin  $\theta > 90^\circ$  olması durumunda yüzeyin hidrofobik özellik gösterdiği bilinmektedir (Ashraf vd., 2016). PSU-Nf'lere AgNP eklenmesi sonrasında TA değerleri sırasıyla  $166,73 \pm 1,6^\circ$ ,  $161,47 \pm 0,3^\circ$  ve  $160 \pm 0,7^\circ$  (%1AgNP-PSU-Nf, %3AgNP-PSU-Nf, %5AgNP-PSU-Nf) olarak ölçülmüş olup bu değerler PSU-Nf kaplama ile karşılaştığında AgNP içeren fiberlerin süperhidrofobik özellik göstermeye devam ettiği belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Nikel disk, PSU-Nf ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanan yüzeylerin (a) temas açıcı fotoğrafları (b) temas açısı değerleri

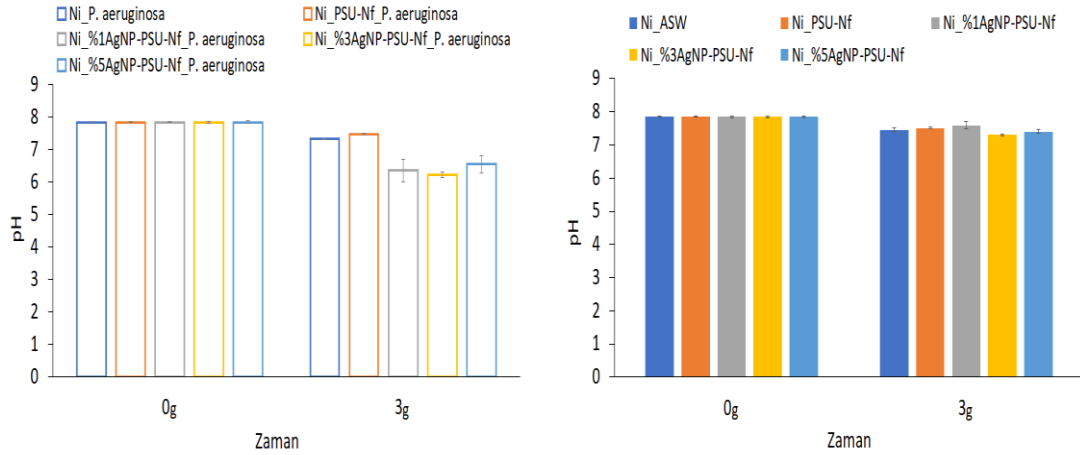
#### 4.7. Ni ve PSU Nf ile Kaplanmış Disklerin Korozyon Çalışmaları

Şekil 4.16.'da ağırlık kaybı deneyleri süresince, korozif ortamlar ve *P. aeruginosa* inoküle edilen ortamlarda 3 gün süresince tutulan disk yüzeyleri ve korozyon sıvılarındaki değişim görülmektedir. Nf ile kaplanan yüzeylerde, 3 gün sonunda yüzeylerde nanofiberlerin, degrade olmadan kompakt bir şekilde yüzeyde durduğu gözlenmiştir. Bakteri inoküle edilen ortamlarda bakteriden kaynaklı bulanıklık görünmekte olup abiyotik ortamlarda renk değişimi görülmemiştir.



Şekil 4. 16. Sadece nikel, PSU-Nf ile kaplanmış nikel ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanmış nikel metalinin abiyotik ve *Pseudomonas aeruginosa* içeren ASW ortamında 3 gün süresi sonunda korozyon analiz ortamında görüntüleri

Şekil 4.17’de korozyon ortamların deney öncesi pH verileri ve 3 gün sonunda korozyon ortamlarının pH değerleri verilmiştir.



Şekil 4.17. Sadece nikel, PSU-Nf ile kaplanmış nikel ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanmış nikel metalinin biyotik ve abiyotik ASW ortamında ölçülen pH değerleri

3 gün süre sonunda ASW solüsyonunun pH değeri başlangıçtaki ile aynı değer olan 7,85 olarak ölçülmüştür. Nikel metal yüzeyi PSU-Nf ve AgNP içeren PSU-Nf ile kaplandıktan sonra, 3 gün sonunda ortamın pH değeri başlangıçtaki pH değerine oldukça yakındır (pH 7,3). Ancak, bu durumun biyotik ortam için farklı olduğu görülmektedir. Üç gün bakteri inokülasyonu sonunda pH değerinde azalma görülmüştür. Artan konsantrasyonlarda AgNP içeren PSU-Nf ortamlarının pH değerleri azalmış ancak bakteriden kaynaklı pH azalmasının daha ciddi bir azalma olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4.'te korozyon immersiyon süresi sonunda disk yüzeyine tutunan bakteriler sayılmıştır. Sayım sonucunda, sadece Ni yüzeye  $8,3 \times 10^6$  (kob/ml) bakteri tutunmuş iken bu sayı sırasıyla %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf için  $2,59 \times 10^6$  (kob/ml),  $1,28 \times 10^6$  (kob/ml) ve  $1,55 \times 10^6$  (kob/ml) olup, sayım sonuçlarına göre tutunan bakteri sayısının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçta, metal nanoparçacıklar arasında gümüş nanoparçacıklar inhibitör ve bakterisidal etkilere sahip oldukları için nanofiber kaplama antibakteriyel etki göstermiştir (Amendola vd., 2007; Anitha vd., 2012).

Çizelge 4.4. Korozyon süresi sonunda disk yüzeyine tutunan bakteri sayıları

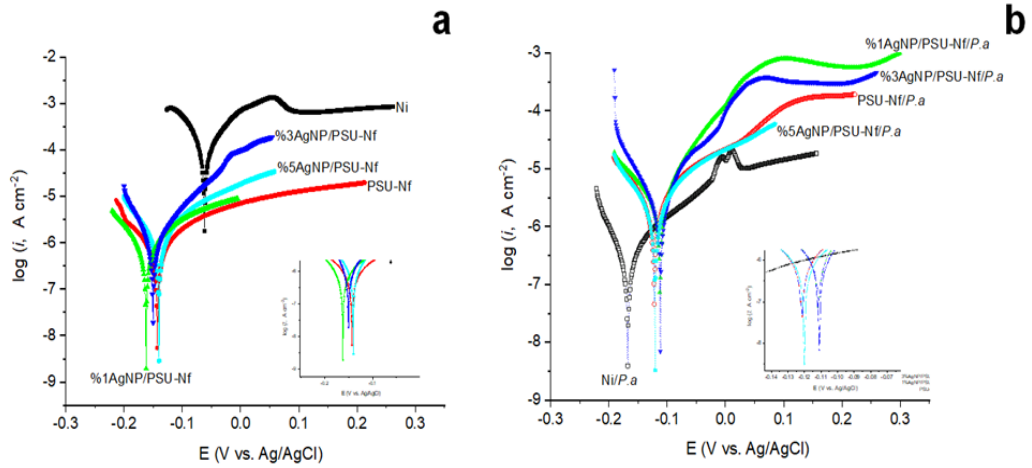
Ortam	KOB/ml
Ni	$8,30 \times 10^6$
PSU-Nf	$8,40 \times 10^6$
%1AgNP-PSU-Nf	$2,59 \times 10^6$
%3AgNP-PSU-Nf	$1,28 \times 10^6$
%5AgNP-PSU-Nf	$1,55 \times 10^6$

Çizelge 4.5.'de ASW, bakteri inoküle edilmiş ASW ve bakteri + AgNP inoküle edilmiş ASW ortamında bekletilen nikel metalinin ağırlık kaybı değerleri incelendiğinde, abiyotik ortamda, nikel metalinin korozyon oranı  $0,140 \text{ mm y}^{-1}$  iken bu değer PSU-Nf ve AgNP içeren PSU-Nf'ler ile kaplama sonrası korozyon oranı azalmıştır. Biyotik ortamda ise, bakteri inokülasyonu ile korozyon oranı  $0,140 \text{ mm y}^{-1}$  iken bu değer PSU-Nf ile kaplama sonrası azalarak  $0,105 \text{ mm y}^{-1}$  olarak ölçülmüştür. Ancak, korozyon oranları %1 ve %3 AgNP içeren PSU-Nf kaplamalarda Ni metalinin sadece bakteri içeren kütle kaybına göre daha fazla olduğu bulunmuştur. AgNP miktarı %5 olduğunda ise nikel metalinin korozyon oranı azalarak  $0,122 \text{ mm y}^{-1}$  değeri olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.5. Sentetik deniz suyu, bakteri inoküle edilmiş ASW ve bakteri + AgNP inoküle edilmiş ASW ortamında bekletilen nikel metalinin ağırlık kaybı (g) ve bu değerlerden hesaplanmış korozyon oranları ( $\text{mm y}^{-1}$ )

	Kütle Kaybı (g)	Korozyon Oranı ( $\text{mm y}^{-1}$ )
<b>Ni</b>	$0,0008 \pm 0,0004$	0,140
<b>PSU-Nf</b>	$0,0006 \pm 0,0001$	0,105
<b>PSU-Nf_ %1AgNP</b>	$0,0005 \pm 0,0002$	0,087
<b>PSU-Nf_ %3AgNP</b>	$0,0003 \pm 0,0005$	0,052
<b>PSU-Nf_ %5AgNP</b>	$0,0004 \pm 0,0001$	0,070
<b><i>P. aeruginosa</i></b>	$0,0008 \pm 0,0003$	0,140
<b>PSU-Nf_ <i>P. aeruginosa</i></b>	$0,0006 \pm 0,006$	0,105
<b>PSU-Nf_ %1AgNP_ <i>P. aeruginosa</i></b>	$0,0008 \pm 0,0005$	0,140
<b>PSU-Nf_ %3AgNP_ <i>P. aeruginosa</i></b>	$0,0009 \pm 0,0001$	0,157
<b>PSU-Nf_ %5AgNP_ <i>P. aeruginosa</i></b>	$0,0007 \pm 0,0001$	0,122

Şekil 4.18.'de sadece Ni, PSU-Nf ile kaplanmış nikel ve %1, %3 ve %5 AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanmış nikel metalinin abiyotik ve *P. aeruginosa* içeren ASW ortamında 3 gün süresi sonunda elde edilen Tafel eğrisi verilmektedir.



Şekil 4.18. (a) abiyotik ve (b) biyotik ASW ortamında bekletilen Ni disk, PSU-Nf ve AgNp eklenmiş PSU-Nf ile kaplanmış disklerin Tafel polarizasyon eğrileri

Bu eğrilerden elde edilen polarizasyon verileri Çizelge 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenen korozyon potansiyeli ( $E_{korr}$ ), korozyon akım yoğunluğu ( $i_{korr}$ ), anodik ( $\beta_a$ ) ve katodik ( $\beta_c$ ) Tafel değerleri

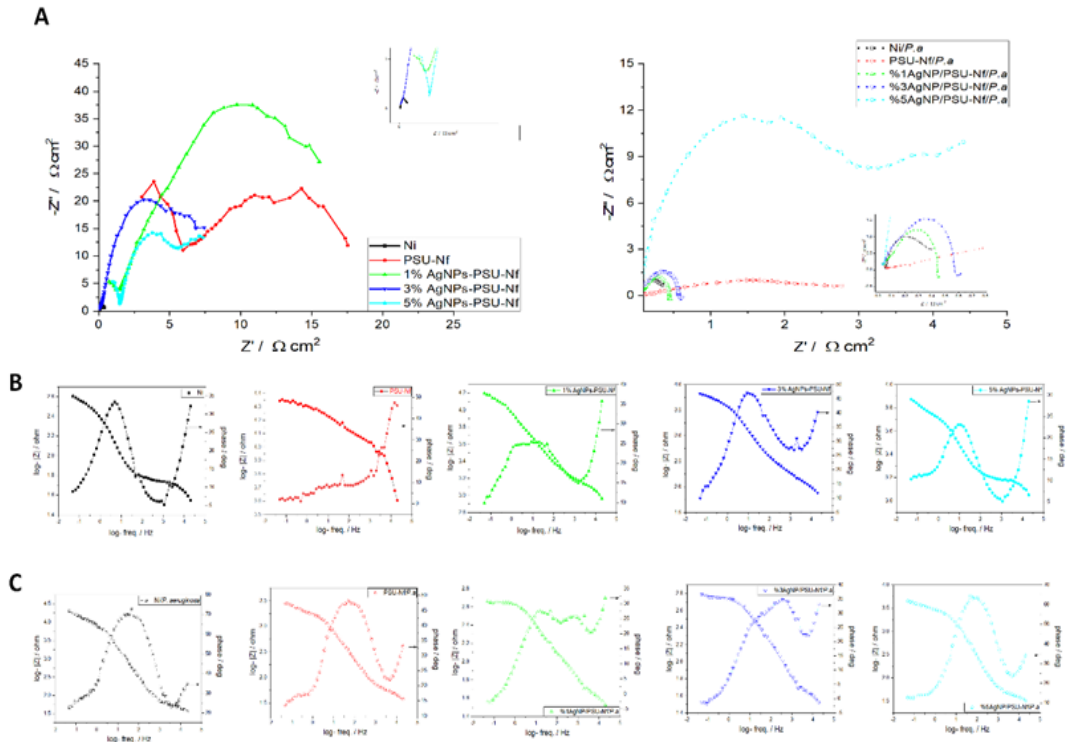
Sentetik Deniz Suyu (ASW)	Polarizasyon verisi			
	$E_{korr}$ , V vs Ag/AgCl	$i_{korr}$ , $\mu A cm^{-2}$	Anodik Tafel eğrisi $\beta_a$ , V dec <sup>-1</sup>	Katodik Tafel eğrisi $-\beta_c$ , V dec <sup>-1</sup>
Ni	-0,061	170,6	0,081	0,054
PSU-Nf	-0,140	12,1	0,840	0,972
% 1AgNP-PSU-Nf	-0,161	2,94	0,246	0,155
% 3AgNP-PSU-Nf	-0,150	1,57	0,075	0,053
% 5AgNP-PSU-Nf	-0,140	4,88	0,200	0,175
Ni_ <i>P. aeruginosa</i>	-0,156	3,05	0,102	0,094
PSU-Nf_ <i>P. aeruginosa</i>	-0,121	7,91	0,500	0,500
% 1AgNP-PSU-Nf_ <i>P. aeruginosa</i>	-0,112	4,47	0,074	0,101
% 3AgNP-PSU-Nf_ <i>P. aeruginosa</i>	-0,112	4,76	0,048	0,061
% 5AgNP-PSU-Nf_ <i>P. aeruginosa</i>	-0,119	7,32	0,210	0,156

Çizelge 4.6.'da verilen polarizasyon verilerine bakıldığında, ASW ortamında PSU-Nf ile kaplanan nikel metalinin ( $12,1 \mu A cm^{-2}$ ), sadece metalin ( $170 \mu A cm^{-2}$ ) korozyon akım yoğunluğu değerinden yaklaşık 10 kat daha az olduğu yani korozyonun nikel metaline göre azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, AgNP içeren PSU-Nf ile kaplanan nikel metalinin bu ortamlarda ölçülen korozyon akım yoğunlukları, kaplama olmayan Ni metalinin korozyon akım yoğunluklarından düşük olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, PSU-Nf ve AgNP içeren PSU-Nf'lerin abiyotik marin ortamlarda nikel metalini korozyondan koruduğu sonucuna ulaşılabilir.

Biyotik ortamlarda ise, bakteri inokülasyonu sonrası, *P. aeruginosa* bakterisinin güçlü biyofilm oluşturan bir bakteri olması ve oluşturduğu biyofilm tabakasının bir bariyer görevi görerek ASW ortamında nikel metalini korozyondan koruyormuş gibi yapması, bu ortamın ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerinin  $3,05 \mu A cm^{-2}$  olmasından

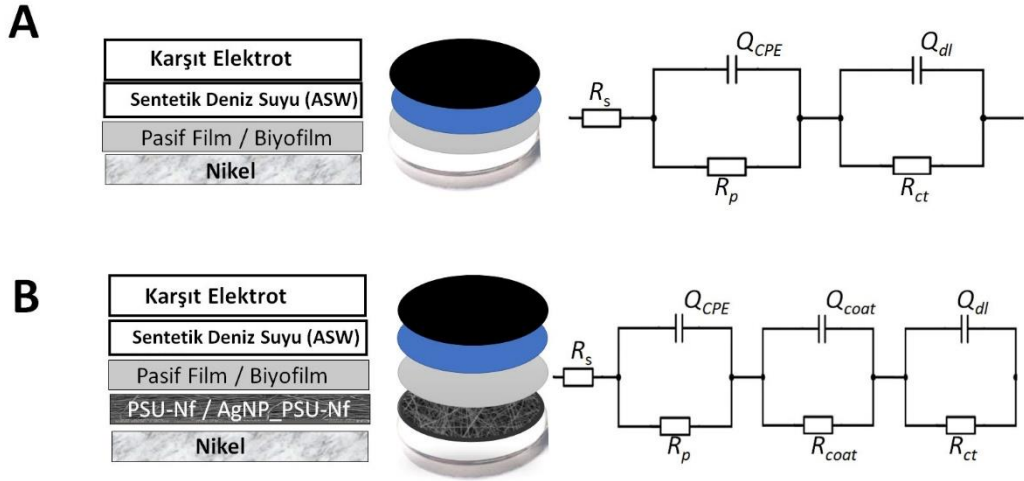
dolayı bu şekilde açıklanabilir. Bu duruma ek olarak, immersiyon süresi uzatıldığında  $i_{\text{korr}}$  değeri beklenildiği gibi bakteriden kaynaklı artarak  $6,67 \mu\text{A cm}^{-2}$  olarak ölçülmüştür. Ayrıca, bakteri varlığında korozyon potansiyel değeri sadece PSU-Nf (0,121 V) ve AgNP içeren PSU-Nf kaplama ortamlarına göre -0,167 V negatif değerlerdedir.

Şekil 4.19.'da bu ortamların (a) Nyquist ve (b) Bode diyagramları verilmektedir. Nyquist eğrilerinde gözlemlenen yarım daireler, bu ortamlarda çoklu zaman sabitlerinin varlığını göstermektedir. Bu daireler, kapasitif ve direnç davranışlarına karşılık, yüksek ve düşük frekanslarda oluşmaktadır. Bu davranışlar, elektrolit içindeki iyonların kaplama/metal yüzeyinden geçişi ile ilgilidir (Yao vd., 2020).



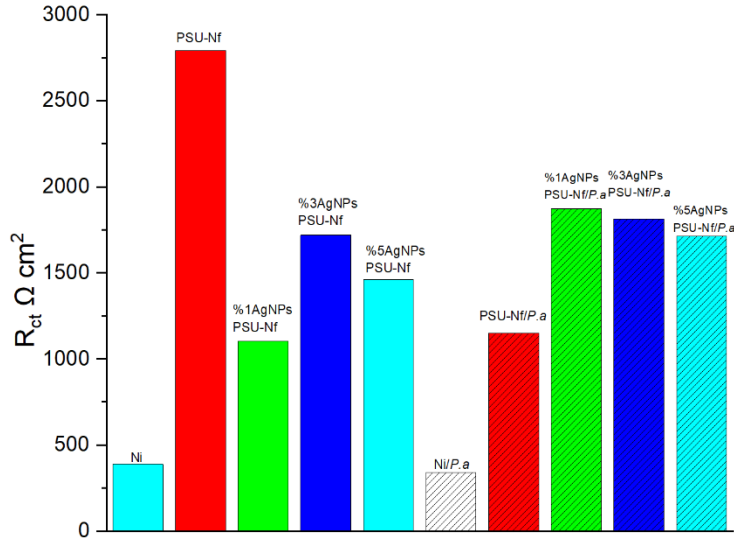
Şekil 4.19. Biyotik ve Abiyotik koşullarda ASW ortamında bekletilen Ni disk, PSU-Nf ve AgNP eklenmiş PSU-Nf ile kaplanmış disklerin (a) Nyquist (b,c) Bode diyagramları

Şekil 4.20.'de sentetik deniz suyu, bakteri inoküle edilmiş ASW ve bakteri + AgNP inoküle edilmiş ASW ortamında bekletilen nikel metalinin eş değer devresi ve modelleri verilmiştir.



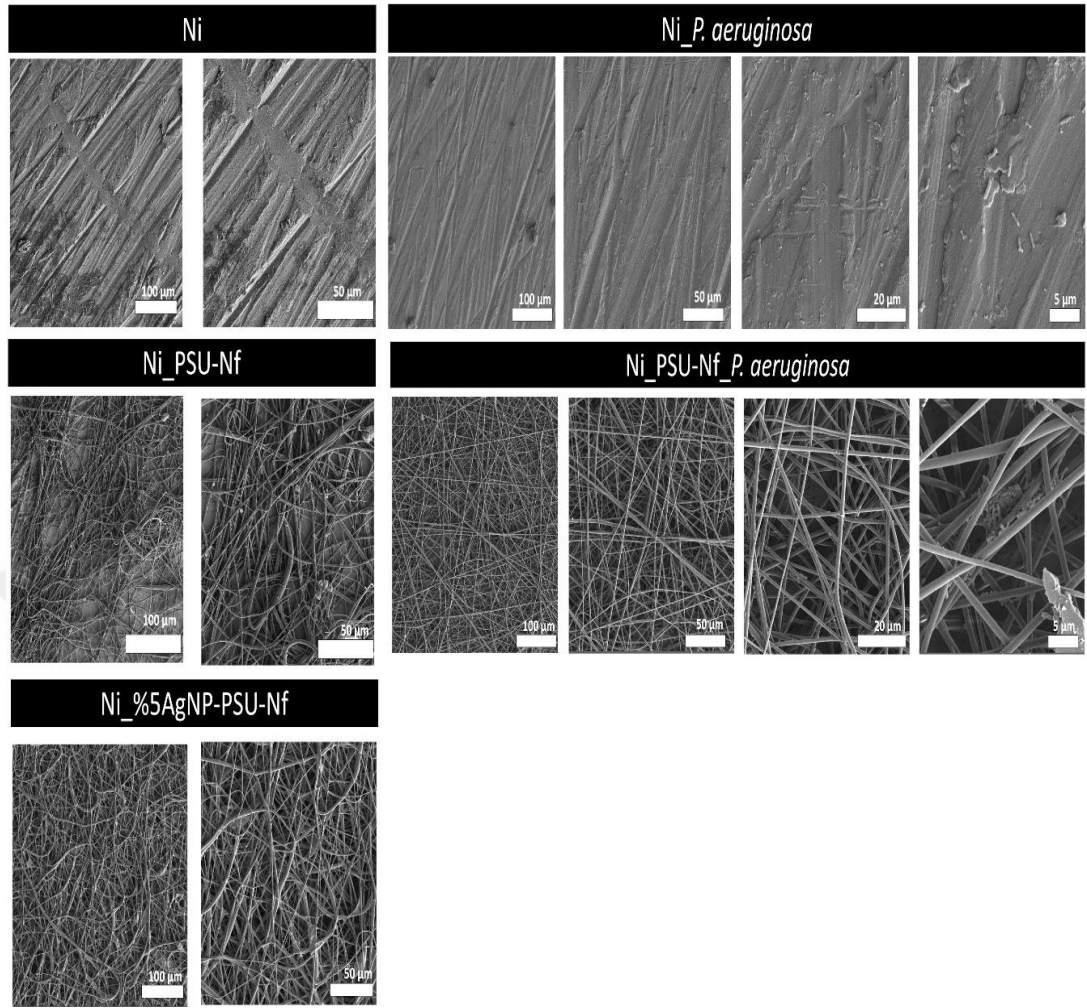
Şekil 4.20. Biyotik ve Abiyotik koşullarda ASW ortamında bekletilen Ni disk, PSU-Nf ve AgNp eklenmiş PSU-Nf ile kaplanmış disklerin eş değer devresi ve modeli

Şekil 4.21.'de kaplama ile metal yüzeyi arasında oluşan ve korozyon sürecini en iyi açıklayabilen verilerden yük transfer direncindeki ( $R_{ct}$ ) verilmiştir. Yüksek  $R_{ct}$  değeri elektron transferinin sistemde daha zor olduğunu ve bu sebeple düşük korozyon oranını göstermektedir. Abiyotik ortamda, PSU-Nf kaplamada artan bir trend görülmüştür. PSU-Nf ile kaplama sonrası  $R_{ct}$  değeri  $388,5 \Omega \text{ cm}^2$  değerinden  $2793 \Omega \text{ cm}^2$  yükselmiştir. Bu durumla birlikte, AgNP içeren PSU-Nf kaplama içeren ortamın  $R_{ct}$  değeri nikel yüzeyin  $R_{ct}$  değerinden yüksektir. Buna benzer bir durum biyotik ortamda da ölçülmüştür.  $R_{ct}$  değeri  $341,2 \Omega \text{ cm}^2$  (Ni/P. a)'dan  $1150 \Omega \text{ cm}^2$ ,  $1873 \Omega \text{ cm}^2$ ,  $1814 \Omega \text{ cm}^2$ ,  $1715 \Omega \text{ cm}^2$  (PSU-Nf\_P.a, %1AgNP-PSU-Nf\_P.a, %3AgNP-PSU-Nf\_P.a, %5AgNP-PSU-Nf\_P.a olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar ile PSU-Nf ve AgNP içeren nanofiber kaplamaların nikel metalini abiyotik ve biyotik marin ortamda korozyondan koruduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.21. Nyquist eğrilerinden hesaplanan yük transfer direnci değerleri  
Korozyon analizleri sonrasında yüzeylerin ve nanofiber kaplamaların morfolojileri

SEM ile belirlenmiş ve Şekil 4.22.'de verilmiştir. Mikrograflara bakıldığında abiyotik ve biyotik ortamda nikel metali, açığa çıkan iyon ve bakterilerin etkisi ile zarar görmüşken nanofiber ve AgNP içeren nanofiber kaplamanın yüzeyde kompakt olarak mevcut olduğu ve morfolojisi koruduğu görülmektedir.

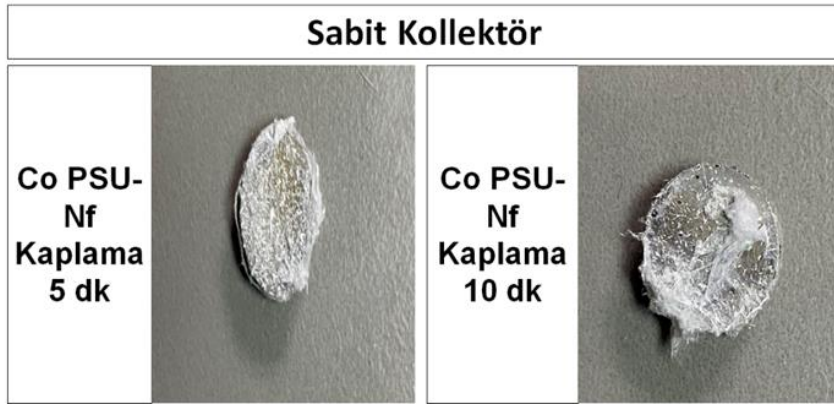


Şekil 4.22. Korozyon analizleri sonrası yüzeyde meydana gelen değişimleri gösteren SEM mikrografları

#### 4.8. Co Diskin PSU Nf ile Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu

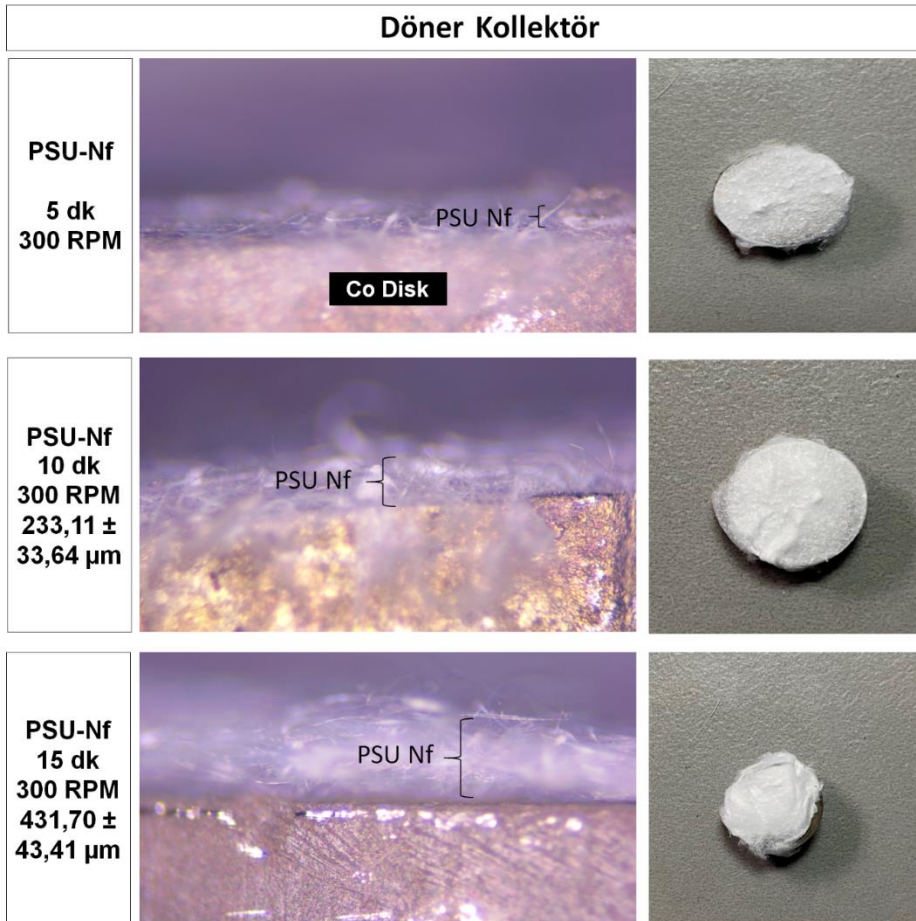
Tez çalışmasında kobalt metali elektroçerme ile üretilen polisülfon nanofiberler ile kaplanmış ardından yüzey ıslatma tekniği kullanılarak gümüş nanoparçacık ile fonksiyonelleştirilmesi ile mikrobiyal korozyon kaplaması olarak kullanım potansiyeli de araştırılmıştır. Bu aşamada Co metalinin korozyondan korunması için farklı bir yaklaşım uygulanmıştır. Polimer içerisine eklenen AgNP'lerin elektroçerme tekniği ile üretilen nanofiber kaplama yüzeyine homojen dağılmaması sebebiyle %20 AgNP içeren solüsyona, PSU-Nf ile kaplanmış diskler daldırılarak, 1 gün solüsyon içerisinde bekletilmiş ve AgNP'lerin yüzeye tutunması sağlanmıştır (PSU-Nf-AgNP).

İlk aşamada, Co disk yüzeyinin kaplanması için sabit kollektör üzerine yerleştirilen Co diskler PSU-Nf ile kaplanmış ve kaplama görüntüleri Şekil 4.23.'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Sabit kollektör ile Co metal yüzeyinin PSU-Nf kaplanması sonucu disklerin yüzey fotoğrafları

Co metal yüzeyi, 5 ve 10 dk süreler ile kaplanmaya çalışılmış fakat kaplama kalınlığı yeterli olmamıştır. Bu sebeple, döner kollektör kullanılmış ve Şekil 4.24.'te farklı sürelerde elde edilen kaplama görüntüleri ve kalınlık ölçümleri verilmiştir.

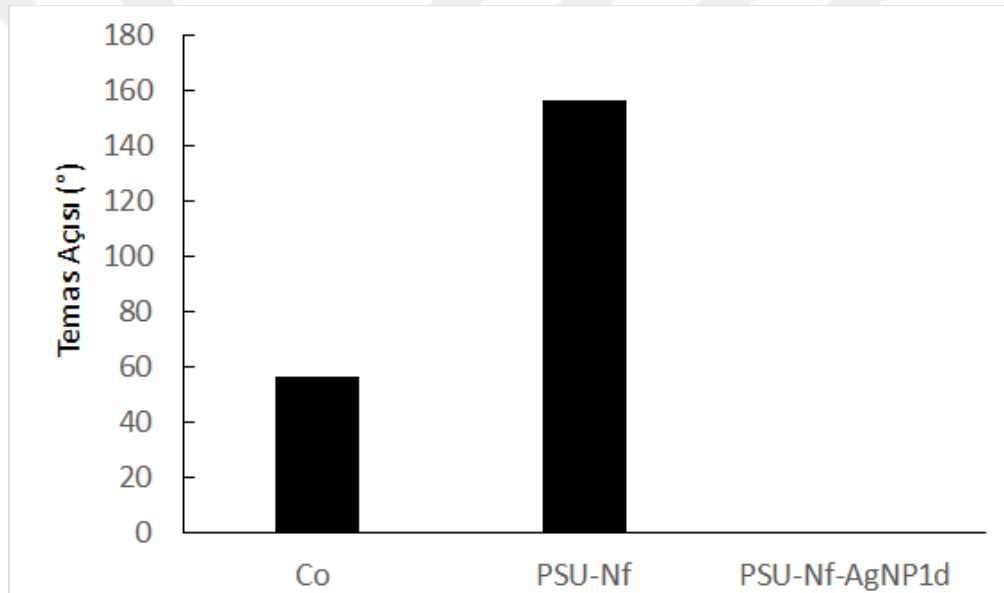


Şekil 4.24. Döner kollektör ile Co metal yüzeyinin PSU-Nf kaplanması sonucu disklerin yüzey fotoğrafları

Şekil 4.24.'te görüldüğü üzere, 5 dk PSU-Nf ile döner kollektör kullanılması ile yeterli kaplama kalınlığı elde edilememiştir. Kaplama süresi 10 dk'ya çıkarıldığında kaplama

kalınlığı  $233,11 \pm 33,66 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüş ve kaplama süresi arttıkça kaplama kalınlığı da artarak 15 dk kaplama sonunda  $431,70 \pm 43,41 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. 10 dk kaplama sonrası yüzey tamamen kaplanmış ve bu sebeple 10 dk kaplama süresi bundan sonra kaplama süresi olarak seçilmiştir.

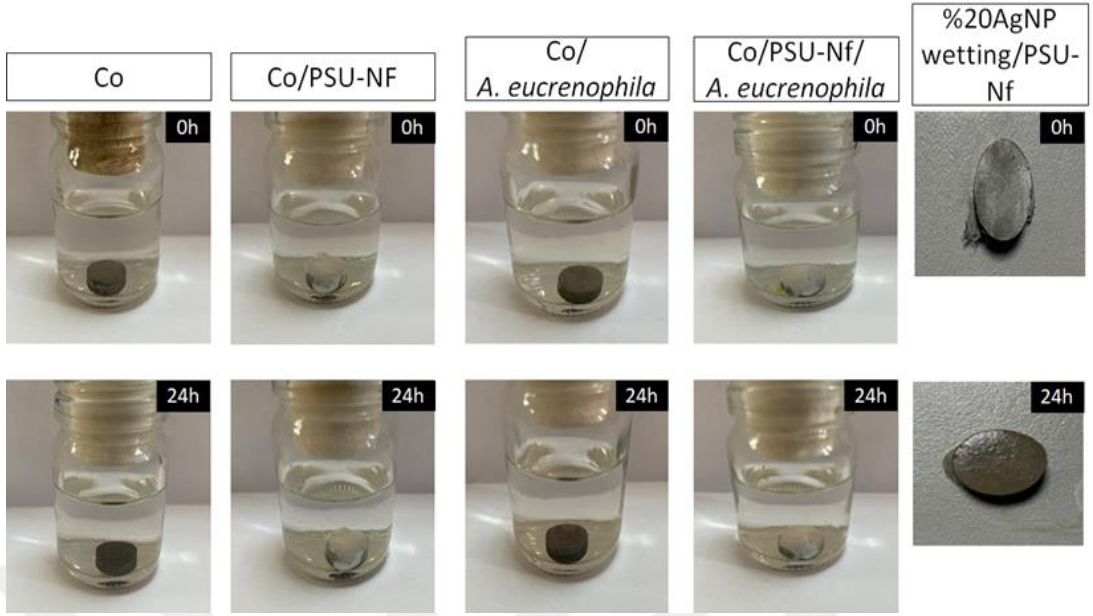
Şekil 4.25.'te sadece Co yüzey, PSU-Nf ile kaplanmış yüzey ve AgNP ile fonksiyonelleştirilmiş PSU-Nf ile kaplanmış yüzeyin temas açısı değerleri verilmiştir. Sadece Co yüzeyin temas açısı  $56,03 \pm 0,23^\circ$  iken PSU-Nf kaplanması sonucu yüzeyin temas açısı artarak  $156 \pm 4,7^\circ$ 'ye ulaşmıştır. Ancak, PSU-Nf ile kaplı yüzey, %20AgNP içeren solüsyonda 1 gün bekletilerek yüzeyi modifiye edildiğinde temas açısı azalmış ve yüzey tamamen sıvı ile temas etmiş ve ıslanmıştır.



Şekil 4.25. Sadece Co, PSU-Nf ile kaplanmış yüzey ve %20 AgNP ile yüzeyi modifiye edilmiş PSU-Nf'in temas açısı değerleri

#### 4.9. Co ve AgNP PSU Nf ile Kaplanmış Disklerin Korozyon Deneyleri

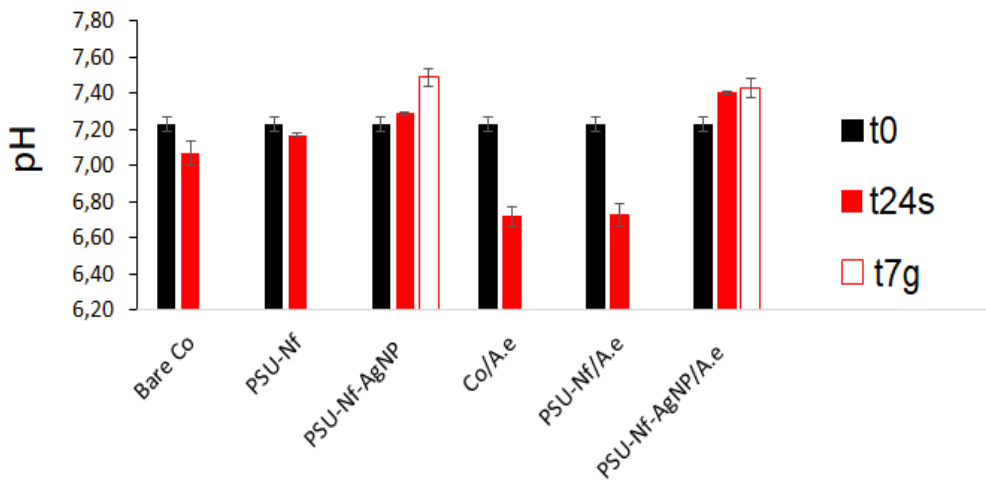
Sadece Co, PSU-Nf ile kaplanan Co ve %20 AgNP ile yüzeyi modifiye edilen PSU-Nf ile kaplı Co diskler, 24 saat süresince abiyotik ve biyotik korozyon ortamlarında bırakılmıştır. Biyotik ortamda inoküle edilen bakteri, *Aeromonas eucrenophila* bakterisidir. Şekil 4.26.'da ortamların deney başlangıcında  $t = 0$  ve  $t = 24$  saat immersiyon süresi sonrasında korozyon ortamları içerisinde görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.26. (a) Sadece kobalt, PSU-Nf ile kaplanmış kobalt ve %20AgNP ile fonksiyonelleştirilen PSU-Nf ile kaplanmış kobalt metalinin abiyotik ve *Aeromonas eucrenophila* içeren MSW ortamında t = 0 ve t = 24 saat süresi sonunda disklerin görüntüleri

24 saat sonunda, PSU-Nf ile kaplı yüzeylerde nanofiberlerin yüzeyde degrade olmadan kaldıkları görülmüştür.

Şekil 4.27.'de t=0 anında ve 24 saat süresi sonunda korozyon ortamlarının pH değişim değerleri verilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, %20 AgNP ile yüzeyi modifiye edilen PSU-Nf ile kaplı Co disklerin 7 gün immersiyon süresi sonucunda ortamdaki pH değişimi takip edilmiştir.

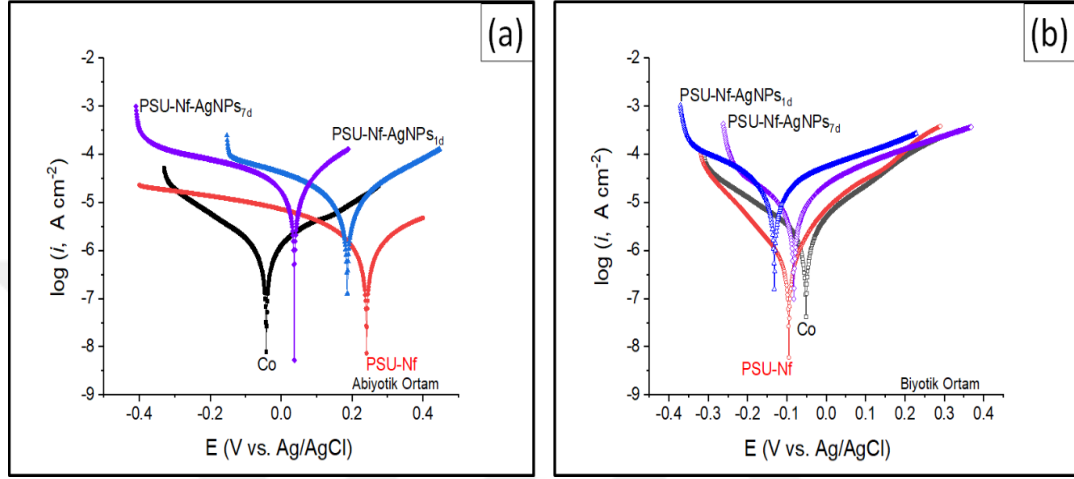


Şekil 4.27. Abiyotik ve biyotik korozyon ortamlarında pH değişimleri

Abiyotik ortamda, başlangıçta pH 7,23 ölçülen değeri, 24 saat korozyon analizleri sonrasında 7,07 pH değerine düşmüştür. Ancak, PSU-Nf kaplama sonrasında, pH

değerlerinde artma eğilimi göstermiştir. Biyotik ortamlarda, bakterinin etkisi sonucunda pH değeri 6,72 değerine azalmış iken, AgNP ile fonksiyonelleştirilmiş PSU-Nf kaplamada, pH artış göstermiş ve yaklaşık 7,4 olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.28.'de abiyotik ve biyotik korozyon ortamlarında Co metalinin polarizasyon eğrilerinden elde edilmiş Tafel eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.28. Abiyotik (a) ve biyotik (b)MSW ortamında bekletilen sadece kobalt, PSU-Nf, PSU-Nf-AgNP<sub>1d</sub> ve PSU-Nf-AgNP<sub>7d</sub> kaplı yüzeylerin Tafel polarizasyon eğrileri. Bu eğrilerden elde edilen değerler Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

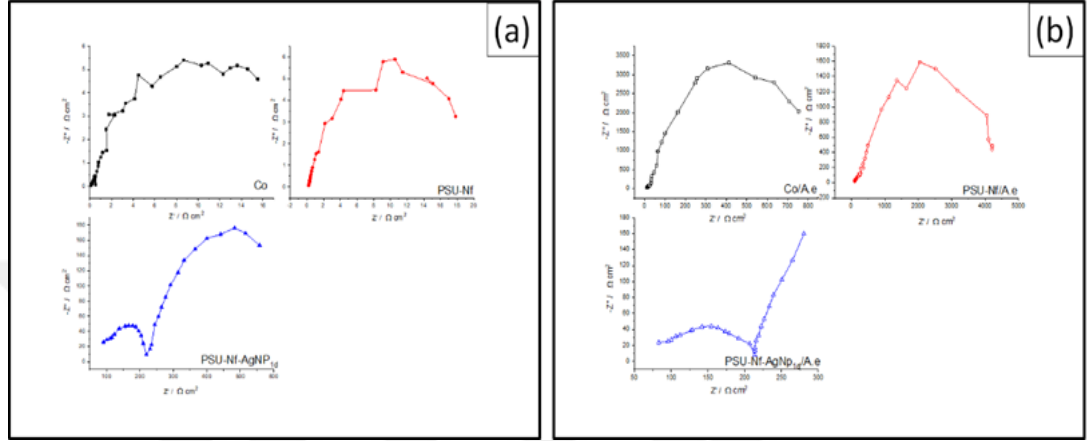
Çizelge 4.7. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP<sub>1d</sub> ve PSU-Nf-AgNP<sub>7d</sub> immersiyon süresi sonunda Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenen korozyon potansiyeli ( $E_{korr}$ ), korozyon akım yoğunluğu ( $i_{korr}$ ), anodik ( $\beta_a$ ) ve katodik ( $\beta_c$ ) Tafel değerleri

Mineral tuzlu su (MSW)	Polarizasyon Verisi			
	$E_{korr}$ , V vs Ag/AgCl	$i_{korr}$ , $\mu A cm^{-2}$	Anodik Tafel eğrisi $\beta_a$ , V dec <sup>-1</sup>	Katodik Tafel eğrisi $-\beta_c$ , V dec <sup>-1</sup>
Co	-0,109	11,67	0,331	0,253
PSU-Nf	0,10	5,30	0,541	0,705
PSU-Nf-AgNP <sub>1d</sub>	0,187	31,4	0,383	0,620
PSU-Nf-AgNP <sub>7d</sub>	-0,106	1,838	0,430	0,223
Co/A.e	-0,056	3,67	0,329	0,177
PSU-Nf/A.e	-0,056	3,58	0,170	0,211
PSU-Nf-AgNP <sub>1d</sub> /A.e	-0,07	24,34	0,286	0,030
PSU-Nf-AgNP <sub>7d</sub> /A.e	-0,038	9,50	0,199	0,134

Abiyotik ortamlarda korozyon potansiyeli -0,109 V iken PSU-Nf ile kaplanma sonrasında potansiyel değerleri pozitifte doğru kaymıştır. Bu durum, kaplamanın korozyondan koruma sağlandığını göstermektedir. En düşük korozyon potansiyel değerlerine %20 AgNP ile fonksiyonelleştirilmiş PSU-Nf kaplamalarda ulaşılmıştır. Korozyonun değerlendirilmesinde önemli bir diğer parametre olan korozyon akım yoğunluğu değerlerine bakıldığında ise sadece Co metalinin  $i_{korr}$  değeri 11,67  $\mu A cm^{-2}$  değerinden PSU-Nf kaplama sonrasında 5,30  $\mu A cm^{-2}$  değerine azalmış yani PSU-Nf kaplamanın korozyondan koruduğu görülmektedir. PSU-Nf yüzeyinin AgNP ile fonksiyonelleşmesi sonucunda (1d) korozyon akım yoğunluğu artmış olup fonksiyonelleşme süresi 7d olduğunda ise en düşük  $i_{korr}$  değerine (1,838) ulaşılmıştır. Biyotik ortamda, kobaltın  $i_{korr}$  değerini 3,67  $\mu A cm^{-2}$  iken PSU-Nf ile kaplama yapıldığında bu değer 3,58  $\mu A cm^{-2}$ 'ye azalmıştır. Ancak, PSU-Nf'in %20 AgNP içeren solüsyonda 1d ve 7d bekletilmesi sonucunda elde edilen yüzeyde  $i_{korr}$  değerlerine bakıldığında bir artış görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, özellikle anti mikrobiyolojik etkisinden dolayı AgNP'lerin mikrobiyal korozyon direncini

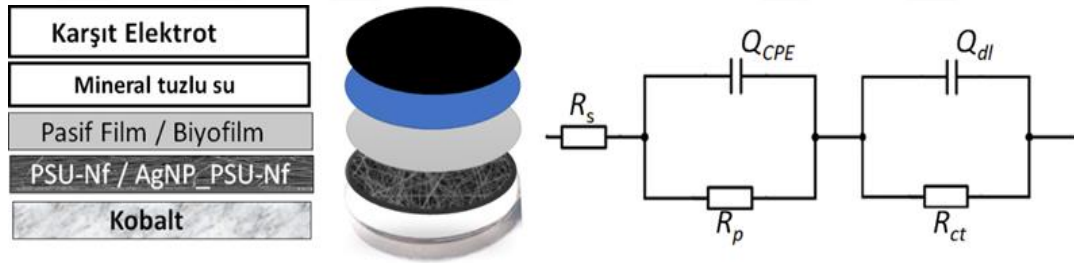
arttırdığı, özellikle yüzeyi kaplayarak koruyucu bir tabaka oluşturarak yumuşak çeliği (MS) koruduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.29.'da abiyotik ve biyotik mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP<sub>1d</sub> ve PSU-Nf-AgNP<sub>7d</sub> kaplanmış kobalt yüzeylerin Nyquist eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.29. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP<sub>1d</sub> ve PSU-Nf-AgNP<sub>7d</sub> kaplanmış kobalt yüzeylerin abiyotik (a) ve (b) biyotik ortamlarda elde edilen Nyquist eğrileri

Bu eğrilerin eş değer devresi ve modeli Şekil 4.30.'da verilmiştir.



Şekil 4.30. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP<sub>1d</sub> ve PSU-Nf-AgNP<sub>7d</sub> kaplanmış kobalt yüzeylerin eş değer devresi ve modeli

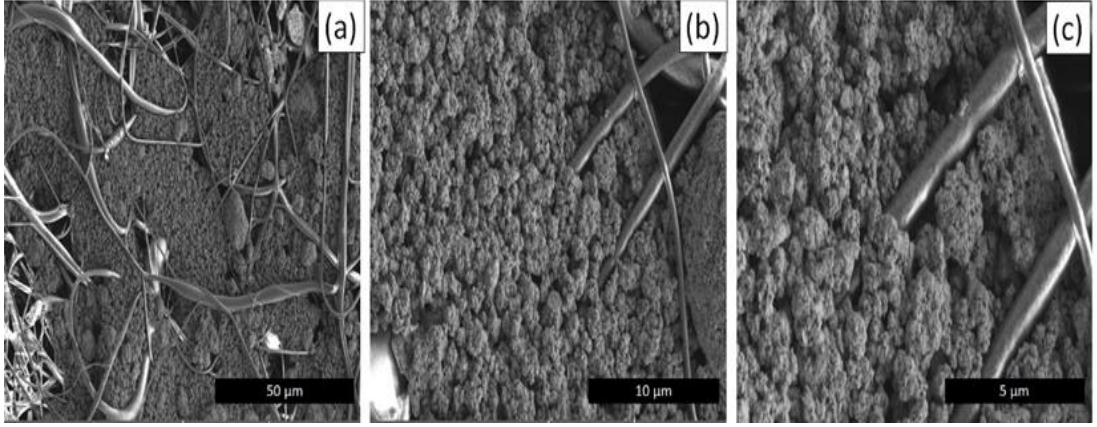
Bu modelden elde edilen veriler Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP<sub>1d</sub> ve PSU-Nf-AgNP<sub>7d</sub> kaplanmış kobalt yüzeylerin eşdeğer devre üzerinden hesaplanan empedans verileri

Mineral tuzlu su (MSM)	Empedans verisi						
	$R_s, \Omega \text{ cm}^2$	$R_p, \Omega \text{ cm}^2$	$R_{ct}, \Omega \text{ cm}^2$	$Q_{CPE}, \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \times 10^{-5}$	$\eta$	$Q_{dl}, \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \times 10^{-5}$	$\eta$
Co	52,2	61930	1680	0,173	0,41	3,24	0,81
PSU-Nf	189,7	18030	3594	1,559	0,61	44,17	0,93
PSU-Nf-AgNP <sub>1d</sub>	73,79	159,1	468	2,447	0,62	0,024	0,81
PSU-Nf-AgNP <sub>7d</sub>	60,38	2304	150,9	1,147	0,82	1,35	0,65
Co_A. e	93,09	8639	150,9	8,627	0,81	3,38	0,64
PSU-Nf_A. e	73,97	3939	311,2	7,191	0,85	0,126	0,46
PSU-Nf-AgNP <sub>1d</sub> _A. e	70,97	147	6788	2,632	0,64	0,15	0,91
PSU-Nf-AgNP <sub>7d</sub> _A. e	63,46	142,8	6324	1,651	0,66	622,4	0,64

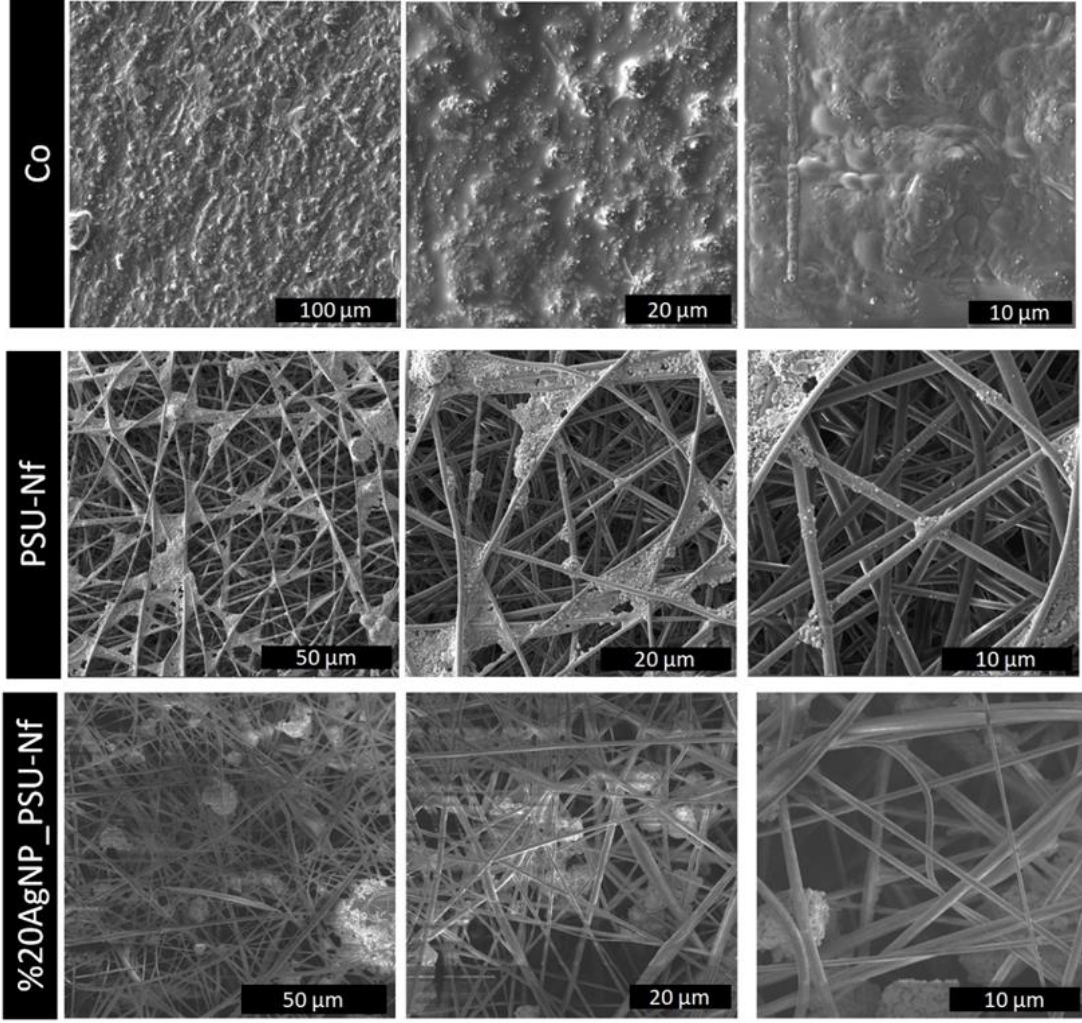
Nanofiber kaplama ile metal yüzeyi arasında oluşan ve korozyon sürecini en iyi açıklayan yük transfer direnç ( $R_{ct}$ ) verilerine bakıldığında abiyotik ortamda kobalt yüzeyin  $R_{ct}$  değeri ( $1680 \Omega \text{ cm}^2$ ) nanofiber kaplama sonrası arttırmış yani elektron transferinin sistemde daha zor olduğunu ve bu sebeple korozyon direncinin arttığı ( $3594 \Omega \text{ cm}^2$ ) sonucuna ulaşılmıştır. AgNP ile fonksiyonelleşme sonrasında yüzeyde yük transfer dirençleri azaldığı belirlenmiştir. Biyotik ortama bakıldığında ise en yüksek  $R_{ct}$  değeri yani korozyondan koruma durumu PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP<sub>1d</sub> ve PSU-Nf-AgNP<sub>7d</sub> kaplamaları ile ulaşılmıştır.

Yüzey morfolojisindeki değişimin belirlenmesi amacıyla öncelikle korozyon öncesince PSU-Nf-AgNP<sub>1g</sub> SEM analizleri yapılmış ve Şekil 4.31.'de mikrograflar verilmiştir.



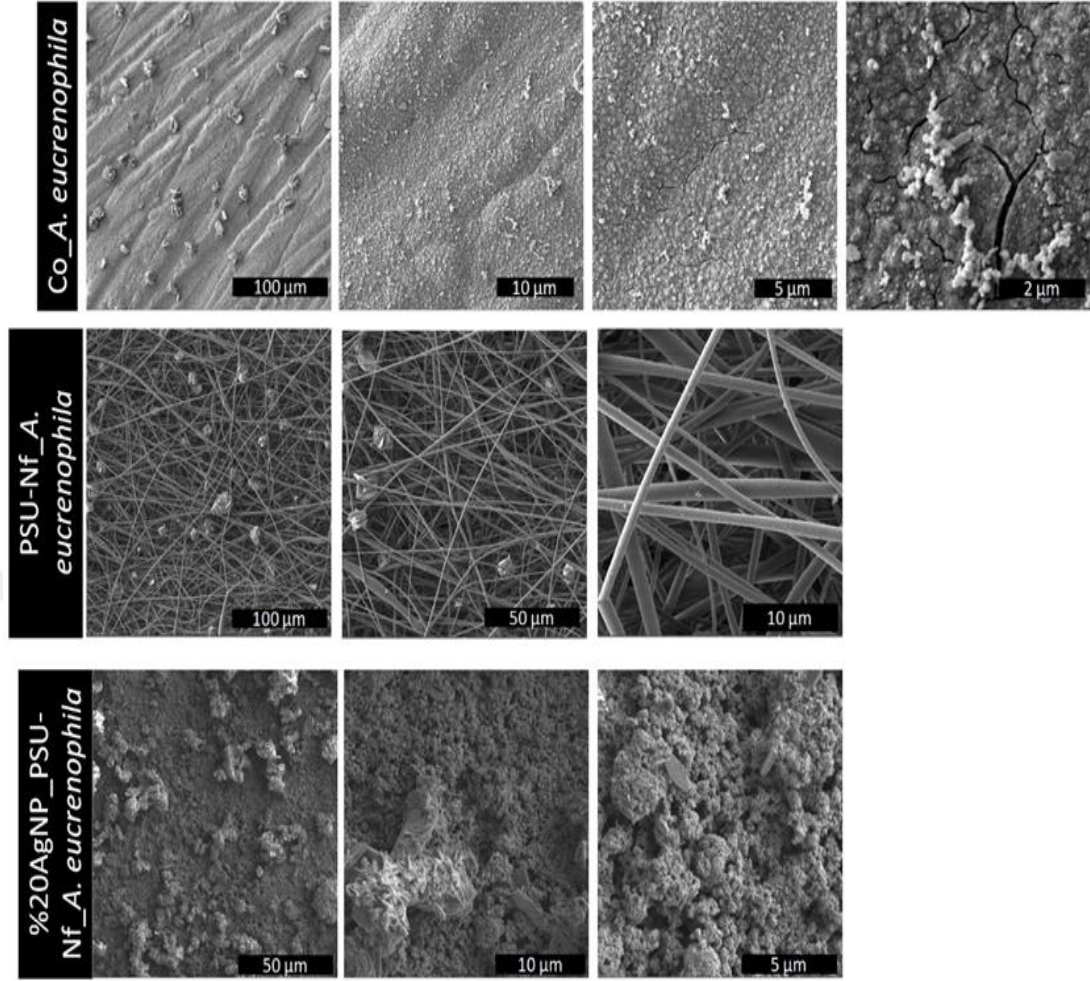
Şekil 4.31. %20 AgNP solüsyonu içerisinde 1 gün süresi ile bekletilen PSU-Nf kaplı yüzeyin SEM mikrografları

Mikrograflara bakıldığında yüzeyin tamamen fiber ve gümüş nanoparçacık ile kaplandığı görülmektedir. Korozyon analizleri sonrasında abiyotik ve biyotik ortamların (Şekil 4.32.) yüzeydeki değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.32. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP kobalt yüzeylerin abiyotik ortamlarda korozyon immersiyonları sonrasında yüzeydeki değişimler

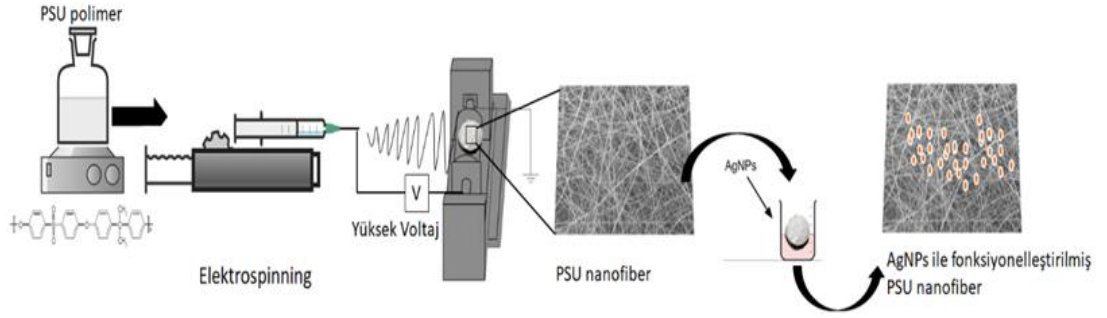
Abiyotik korozyon ortamlarında, nanofiber kaplamaların morfolojilerini korudukları görülmektedir.



Şekil 4.33. Mineral tuzlu su ortamında, sadece kobalt, PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP kaplanmış kobalt yüzeylerin biyotik ortamlarda korozyon immersiyonları sonrasında yüzeydeki değişimler

Şekil 4.33.'te biyotik ortamda korozyon sonrasında yüzeydeki değişimlere bakıldığında ise kobalt yüzeyde bakteriden kaynaklı olarak yüzeydeki çatlaklar ve bakterilerin varlıkları görülmektedir. PSU-Nf kaplama sonrasında, kobalt yüzey korozyon sonrasında görünmekle beraber nanofiberlerin yapılarını koruduğu görülmektedir. Ancak, AgNP ile fonksiyonelleştirilen PSU-Nf ile kaplanan Co yüzey, korozyon sonrasında, PSU-Nf'ler yüzeyde gözükmemektedir. Yüzey tamamen bir tabaka ile kaplanmış olup, yüzeyde bakteri görülmemiştir. Korozyon sonucu oluşan bu tabakanın biyotik ortamda Co yüzeyini korozyondan koruduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın özeti Şekil 4.34.'te verilmiştir.



Şekil 4.34. PSU-Nf ve PSU-Nf-AgNP ile kaplanmış kobalt yüzeylerin şematik deney özeti

Sonuç olarak bu çalışma ile hedeflenen, elektroğirme yöntemi ile nanofiber içerisine homojen dağıtılmayan gümüş nanoparçacıkların, PSU-Nf ile kaplama sonrasında yüzeyde homojen dağılmasının sağlanması ve böylece Nf kaplamanın mikrobiyal korozyon etkisinin artmasının sağlanmasıdır. Çalışmanın detaylandırılması ile biyotik ve abiyotik ortamlarda korozyon direncini arttıran PSU-Nf kaplamalar üretilebileceği düşünülmektedir.



## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışması kapsamında, özellikle su sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan ve büyük maddi kayıp ve çevre sorunlarına yol açan mikrobiyal korozyonun engellenmesini sağlayacak gümüş nanoparçacık taşıyan nanofiber yapıları yeni kaplama malzemeleri geliştirilmiştir. Geliştirilen nanofiber kaplamaların, taşıdığı biyojenik gümüş nanoparçacık sayesinde antibakteriyel özellik ve Nf kaplamanın yüzey ile korozif ortam/oksijenin temasının en aza indirilmesi sağlanarak anti-korozif özellik göstermiştir.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, PSU-Nf'lerin boncuksuz ve homojen üretim optimizasyonu çalışması tamamlanmış ve elde edilen Nf'ler karakterize edilmiştir. Nf üretimi için PSU polimerinin seçilme sebebi; kimyasal inertlik, basınç dayanımı, termal stabilite, elektriksel performans ve mekanik mukavemet gibi mükemmel özelliklere sahip olmasındandır. Literatürde PSU-Nf ile yapılan çalışmalara bakıldığında, örneğin Rosid vd., (2021) yaptığı çalışmada, elektroçerme yöntemi ile PSU-Nf üretilmiş ve Nf'lere FeO nanoparçacık eklemiştir. Üretilen PSU-Nf'lerin çap kalınlığı 1124 nm iken nanoparçacık eklenmesiyle çapın azalarak 870 nm olduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar, üretilen Nf'lerin hidrofilik/hidrofobik özelliklerini belirlemek için temas açılarını (TA) ölçmüşler ve sadece PSU nanofiberin TA 109°, nanoparçacık eklendiğinde ise 98° olarak bulunmuştur. Bu durumu, demir oksit nanoparçacıkların polimer çözeltisinin iletkenliği ve viskozitesini etkilemesi olarak açıklamışlardır. Tez çalışması kapsamında üretilen PSU-Nf'lerin çapı 814 nm olarak ölçülmüştür. Temas açısına bakıldığında ise, sadece PSU nanofiberin temas açısı 170°, AgNP içeren PSU nanofiberin TA ise 160° olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda literatürde yer alan çalışmalarda üretilen PSU-Nf göre daha ince, küçük çaplı ve daha hidrofobik fiber üretilmiştir.

Tez çalışmasında, antibakteriyel özellik gösterilmesi için biyojenik yol ile üretilen AgNP kullanılmıştır. AgNP'ler aynı kimyasal özellikteki diğer büyük partiküller ile karşılaştırıldığında, biyokimyasal reaktivite, katalitik aktivite ve yüksek yüzey alanına sahip olmalarından dolayı kullanımları artmaktadır (Xu vd., 2006). Nanoparçacıkların bakterilere karşı antibakteriyel özellik göstermesi, genellikle bakteri yüzeylerine bağlanmaları, hücre duvarını parçalamaları ve ölüme neden olmaları ile mümkündür (Arakha vd., 2015). Nanoparçacıklar, geniş yüzey alanı, stabilite ve mekanik

mukavemet gibi özellikleri sayesinde NP'ler mikrobiyal enfeksiyon ve biyofilm inhibisyonu gibi amaçlar için kullanılabilir (Thanh vd., 2010). Parçacık boyutu ve şeklinin AgNP'lerin antibakteriyel aktivitesini etkilediğini bildirilmiştir (Kailasa vd., 2019). Fabrega vd., (2009) yaptıkları çalışmada, AgNP boyutu azaldıkça yüzey alanının arttığı bu sayede moleküllere bağlanma afinitesini artırarak daha yüksek antibakteriyel etki gösterdiğini bildirmişlerdir. Bir başka çalışmada, Shrivastava vd., (2007) 100 nm ve daha küçük nanoparçacıkların yüksek antibakteriyel etki gösterdiklerini bildirmişlerdir. Literatürde biyojenik AgNP sentezi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Örneğin, Thomas vd., (2014) marin *Ochrobactrum* sp. kullanarak ürettikleri AgNP'lerin (35-85 nm) patojenlere karşı antibakteriyel aktivite testi sonucunda hem gram negatif hem de gram pozitif bakterilere karşı etkili antibakteriyel etki göstermişlerdir. Bir diğer çalışmada Shaker vd., (2017) *Ochrobactrum anthropi* bakterisi kullanılarak sentezlenen 37-168 nm boyutlarındaki AgNP'lerin *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* ve *Klebsiella pneumoniae* bakterilerine karşı etkili bir antibakteriyel etkisini göstermişlerdir. Tez çalışması kapsamında üretilen AgNP'ler küre şekilli ve 42 nm boyuta sahiptir. 50 nm altındaki boyutları sebebiyle, deneylerde kullanılan bakterilere karşı antibakteriyel etki göstermişlerdir.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, PSU-Nf'ler ile su ortamlarında sıklıkla kullanılan Ni ve Co metalleri eş zamanlı olarak nanofiberler ile kaplanmıştır. Bu kaplamaların kalınlığı yaklaşık 100-450 µm olarak ölçülmüştür. Literatürde az sayıda çalışmada nanofiber kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Bunlardan birisi ise Iribarren vd., (2019) yılında yaptıkları çalışmada Al üzerine PVC/ZnO nanofiberi ile 10 dakika süre ile kaplama yapmış ve kaplama kalınlığının 100 µm olduğunu bildirmiştir. Kaplamanın kalınlığı ve kalitesi korozyonun önlemesini etkileyen önemli bir faktördür. Kaplamada bulunan kusur, delikler, gözenek ve deformasyona uğrama gibi durumlar kaplamanın etkinliğini önemli ölçüde azaltır (Yu vd., 2019). Bu sebeple, tez çalışmasında Nf kaplamaların, düzgün, homojen ve her seferinde benzer kalınlık göstermesi amacıyla belirlenen kaplama sürelerine uyularak, yüzeyler kaplanmıştır.

Başarılı bir şekilde Nf ile kaplanmış metaller abiyotik ve farklı mikroorganizmalar ile inoküle edilmiş su ortamlarında mikrobiyal korozyon analizleri, kütle kaybı ve elektrokimyasal analizlerle araştırılmıştır. Abiyotik ve biyotik korozyon süreleri sonunda, Nf kaplamanın morfolojik değerlendirilmesi SEM analizleri ile

tamamlanmış olup, bu mikrograflara göre Nf kaplamaların sulu ortamlarda kısa (1 gün) ve uzun süreler (7 güne kadar) inkübasyonlarında kaplamaların kompakt ve degrede olmadıkları ve SEM analizleri ile de Nf morfolojilerini korudukları belirlenmiştir. Elektrokimyasal korozyon analizlerinde korozyon akım yoğunluk değerleri korozyonun anlamlandırılması için önemli bir parametredir. Örneğin, Yu vd., (2019) Al üzerine yaptıkları kaplamanın korozyondan koruma etkisini değerlendirirken, kaplanmamış Al yüzeyin korozyon akım yoğunluğu ( $i_{corr}$ ) 526,3 mA/cm<sup>2</sup> olarak ölçülmüş iken 3 farklı kalınlık ile kaplanan metallerden en fazla kaplama kalınlığına sahip Al metalinin  $i_{corr}$  değerinin kaplanmamış Al yüzeyin  $i_{corr}$  değerine göre azalarak 60,6 mA/cm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. Bu durumda, kaplamanın metali korozyondan koruduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tez çalışmasında, Ni ve Co metalleri için  $i_{corr}$  değerleri sırasıyla 170,6 ve 11,67 mA/cm<sup>2</sup> olarak ölçülmüş olup, yüzeylerin Nf kaplaması sonrası  $i_{corr}$  değerleri sırasıyla 12,1 ve 5,30 mA/cm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. Nf kaplama sonrası  $i_{corr}$  değerlerinin azaldığı literatürdeki çalışmaların sonuçları ile uyumludur.

Tez çalışması sonucunda su sistemlerinde sıklıkla kullanılan farklı metalleri korozyon ve mikrobiyal korozyondan koruyan, polimer temelli gümüş nanoparçacık taşıyan nanofiber kaplama üretilmiştir. Bu nanoteknolojik kaplama, pahalı ve zaman alıcı geleneksel yüzey hazırlamanın yerine düşük maliyeti ve hazırlama/uygulama kolaylığı ile üstünlük göstermektedir. Bu kapsamda elde edilen başarılı sonuç ve ürünler, endüstriyel sistemlerde sıklıkla kullanılan diğer metal/alaşımaları korozyon ve mikrobiyal korozyondan koruyan nanoteknoloji temelli kaplama sistemlerinin araştırılıp üretilmesine öncü olacak potansiyel taşımaktadır.



## KAYNAKLAR

- Abdoli, L., Suo, X., & Li, H. (2016). Distinctive colonization of *Bacillus* sp. bacteria and the influence of the bacterial biofilm on electrochemical behaviors of aluminum coatings. *Colloids And Surfaces B: Biointerfaces*, 145, 688-694. doi: 10.1016/j.colsurfb.2016.05.075
- Abou El-Nour, K. M., Eftaiha, A., Al-Warthan, A., & Ammar, R. A. (2010). Synthesis and applications of silver nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 3(3), 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.04.008>
- Agarwal, S., & Greiner, A. (2011). On the way to clean and safe electrospinning-green electrospinning: emulsion and suspension electrospinning. *Polymers For Advanced Technologies*, 22(3), 372-378. doi: 10.1002/pat.1883
- Ahmad, S., Munir, S., Zeb, N., Ullah, A., Khan, B., & Ali, J. (2019). Green nanotechnology: a review on green synthesis of silver nanoparticles — an ecofriendly approach. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 14, 5087-5107. doi: 10.2147/ijn.s200254
- Ahn, Y., Park, S., Kim, G., Hwang, Y., Lee, C., Shin, H., & Lee, J. (2006). Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers. *Current Applied Physics*, 6(6), 1030- 1035. doi: 10.1016/j.cap.2005.07.013
- Allison, D. G. (2003). The biofilm matrix. *Biofouling*, 19(2), 139–150. <https://doi.org/10.1080/0892701031000072190>
- Amani, M., & Hjeij, D. (2015). A Comprehensive review of corrosion and its inhibition in the oil and gas industry. *All Days*. <https://doi.org/10.2118/175337-ms>
- Amendola, V., Polizzi, S., & Meneghetti, M. (2007). Free silver nanoparticles synthesized by laser ablation in organic solvents and their easy functionalization. *Langmuir*, 23(12), 6766-6770. doi: 10.1021/la0637061
- Anitha, J., Krithikadevi, R., Dheep. G., R., Daniel. S.C.G., K., Nehru, K., & Sivakumar, M. (2012). Biosynthesis of Ag nanoparticles using *Amaranthus tristis* extract for the fabrication of nanoparticle embedded PVA membrane. *Current Nanoscience*, 8(5), 703–708. <https://doi.org/10.2174/157341312802884436>
- Arakha, M., Pal, S., Samantarrai, D., Panigrahi, T., Mallick, B., & Pramanik, K. et al. (2015). Antimicrobial activity of iron oxide nanoparticle upon modulation of nanoparticle-bacteria interface. *Scientific Reports*, 5(1). doi: 10.1038/srep14813
- Arthur, D., Jonathan, A., Ameh, P., & Anya, C. (2013). A review on the assessment of polymeric materials used as corrosion inhibitor of metals and alloys. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(1), 2. doi: 10.1186/2228-5547-4-2
- Arulmozhi, V., Pandian, K., & Mirunalini, S. (2013). Ellagic acid encapsulated chitosan nanoparticles for drug delivery system in human oral cancer cell line (KB). *Colloids And Surfaces B: Biointerfaces*, 110, 313-320. doi: 10.1016/j.colsurfb.2013.03.039
- Ashraf, M., Champagne, P., Campagne, C., Perwuelz, A., Dumont, F., & Leriche, A. (2014). Study the multi self-cleaning characteristics of ZnO nanorods functionalized polyester fabric. *Journal of Industrial Textiles*, 45(6), 1440–1456. <https://doi.org/10.1177/1528083714562086>

- Aydoğdu, G., & Aydinol, M. (2006). Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel. *Corrosion Science*, 48(11), 3565-3583. doi: 10.1016/j.corsci.2006.01.003
- Bairi, L., George, R., & Kamachi Mudali, U. (2012). Microbially induced corrosion of D9 stainless steel–zirconium metal waste form alloy under simulated geological repository environment. *Corrosion Science*, 61, 19-27. doi: 10.1016/j.corsci.2012.04.019
- Bakhsheshi-Rad, H., Akbari, M., Ismail, A., Aziz, M., Hadisi, Z., & Pagan, E. et al. (2019). Coating biodegradable magnesium alloys with electrospun poly-L-lactic acid-åkermanite-doxycycline nanofibers for enhanced biocompatibility, antibacterial activity, and corrosion resistance. *Surface And Coatings Technology*, 377, 124898. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.124898
- Barnes, C., Sell, S., Boland, E., Simpson, D., & Bowlin, G. (2007). Nanofiber technology: Designing the next generation of tissue engineering scaffolds. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 59(14), 1413-1433. doi: 10.1016/j.addr.2007.04.022
- Baumgarten, P. (1971). Electrostatic spinning of acrylic microfibers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 36(1), 71-79. doi: 10.1016/0021-9797(71)90241-4
- Baygar, T., Sarac, N., Ugur, A., & Karaca, I. (2019). Antimicrobial characteristics and biocompatibility of the surgical sutures coated with biosynthesized silver nanoparticles. *Bioorganic Chemistry*, 86, 254-258. doi: 10.1016/j.bioorg.2018.12.034
- Beachley, V., & Wen, X. (2009). Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length. *Materials Science and Engineering: C*, 29(3), 663-668. doi: 10.1016/j.msec.2008.10.037
- Beverkog, B., & Puigdomenech, I. (1997). Revised Pourbaix diagrams for nickel at 25–300 °C. *Corrosion Science*, 39(5), 969-980. doi: 10.1016/s0010-938x(97)00002-4
- Boopathy, R., & Daniels, L. (1991). Effect of pH on anaerobic mild steel corrosion by methanogenic bacteria. *Applied And Environmental Microbiology*, 57(7), 2104-2108. doi: 10.1128/aem.57.7.2104-2108.1991
- Burger, C., Hsiao, B., & Chu, B. (2006). Nanofibrous Materials and their applications. *Annual Review of Materials Research*, 36(1), 333-368. doi: 10.1146/annurev.matsci.36.011205.123537
- Casini, M. (2016). *Smart buildings*. Duxford, UK: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier.
- Casper, C., Stephens, J., Tassi, N., Chase, D., & Rabolt, J. (2003). Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process. *Macromolecules*, 37(2), 573-578. doi: 10.1021/ma0351975
- Celebioglu, A., & Uyar, T. (2012). Electrospinning of nanofibers from non-polymeric systems: polymer-free nanofibers from cyclodextrin derivatives. *Nanoscale*, 4(2), 621-631. doi: 10.1039/c1nr11364j
- Cetin, D., & Aksu, M. L. (2011). Corrosion behavior of low-alloy steel in the presence of *Desulfovibrio caledoniensis*. *Materials and Corrosion*, 64(3), 236–241. <https://doi.org/10.1002/maco.201106142>

- Chaloupka, K., Malam, Y., & Seifalian, A. (2010). Nanosilver as a new generation of nanoproduct in biomedical applications. *Trends In Biotechnology*, 28(11), 580-588. doi: 10.1016/j.tibtech.2010.07.006
- Chan, C., Fakra, S., Emerson, D., Fleming, E., & Edwards, K. (2011). Lithotrophic iron-oxidizing bacteria produce organic stalks to control mineral growth: implications for biosignature formation. *The ISME Journal*, 5(4), 717-727. doi: 10.1038/ismej.2010.173
- Chang, Y., Chang, Y., & Hung, C. (2008). The use of magnesium peroxide for the inhibition of sulfate-reducing bacteria under anoxic conditions. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 35(11), 1481-1491. doi: 10.1007/s10295-008-0450-6
- Characklis, W. (1981). Bioengineering report: Fouling biofilm development: A process analysis. *Biotechnology And Bioengineering*, 23(9), 1923-1960. doi: 10.1002/bit.26023090
- Chen, S., & Zhang, D. (2018). Study of corrosion behavior of copper in 3.5 wt.% NaCl solution containing extracellular polymeric substances of an aerotolerant sulphate-reducing bacteria. *Corrosion Science*, 136, 275-284. doi: 10.1016/j.corsci.2018.03.017
- Chen, S., Wang, P., & Zhang, D. (2014). Corrosion behavior of copper under biofilm of sulfate-reducing bacteria. *Corrosion Science*, 87, 407-415. doi: 10.1016/j.corsci.2014.07.001
- Chen, W., Abe, K., Uetani, K., Yu, H., Liu, Y., & Yano, H. (2014). Individual cotton cellulose nanofibers: pretreatment and fibrillation technique. *Cellulose*, 21(3), 1517-1528. doi: 10.1007/s10570-014-0172-z
- Chong, E., Phan, T., Lim, I., Zhang, Y., Bay, B., Ramakrishna, S., & Lim, C. (2007). Evaluation of electrospun PCL/gelatin nanofibrous scaffold for wound healing and layered dermal reconstitution. *Acta Biomaterialia*, 3(3), 321-330. doi: 10.1016/j.actbio.2007.01.002
- Conley, S., Franco, G., Faloona, I., Blake, D., Peischl, J., & Ryerson, T. (2016). Methane emissions from the 2015 Aliso Canyon blowout in Los Angeles, CA. *Science*, 351(6279), 1317-1320. doi: 10.1126/science.aaf2348
- Contu, F., Elsener, B., & Böhni, H. (2005). Corrosion behaviour of CoCrMo implant alloy during fretting in bovine serum. *Corrosion Science*, 47(8), 1863-1875. doi: 10.1016/j.corsci.2004.09.003
- Cui, M., Xu, C., Shen, Y., Tian, H., Feng, H., & Li, J. (2018). Electrospinning superhydrophobic nanofibrous Poly(vinylidene fluoride)/stearic acid coatings with excellent corrosion resistance. *Thin Solid Films*, 657, 88-94. doi: 10.1016/j.tsf.2018.05.008
- Dabirian, S., Kashanian, S., Nazari, M., & Arkan, E. (2022). The corrosion control of temporary magnesium (AZ31 alloy) implants using electrospinning polycaprolactone-curcumin nanofiber coatings. *Analytical And Bioanalytical Chemistry Research*, 9(2), 191-200. doi: 10.22036/ABCR.2021.285160.1632
- Daniel, M., & Astruc, D. (2004). Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology. *Chemical Reviews*, 35(16). doi: 10.1002/chin.200416213
- Davis, J. (2001). *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. Materials Park, OH: ASM International.

- Davis, J. R. (Ed.). (2000). Corrosion: Understanding the Basics. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.cub.9781627082501>
- Deitzel, J., Kleinmeyer, J., Harris, D., & Beck Tan, N. (2001). The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer*, 42(1), 261-272. doi: 10.1016/s0032-3861(00)00250-0
- Deitzel, J. (2002). Electrospinning of polymer nanofibers with specific surface chemistry. *Polymer*, 43(3), 1025-1029. doi: 10.1016/s0032-3861(01)00594-8
- Demir, M., Yilgor, I., Yilgor, E., & Erman, B. (2002). Electrospinning of polyurethane fibers. *Polymer*, 43(11), 3303-3309. doi: 10.1016/s0032-3861(02)00136-2
- Deyab, M., Osman, M., Elkholy, A., & El-Taib Heikal, F. (2017). Green approach towards corrosion inhibition of carbon steel in produced oilfield water using lemongrass extract. *RSC Advances*, 7(72), 45241-45251. doi: 10.1039/c7ra07979f
- Doshi, J., & Reneker, D. (1995). Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal Of Electrostatics*, 35(2-3), 151-160. doi: 10.1016/0304-3886(95)00041-8
- Edwards, M., Ferguson, J., & Reiber, S. (1994). The pitting corrosion of copper. *Journal - American Water Works Association*, 86(7), 74-90. doi: 10.1002/j.1551-8833.1994.tb06226.x
- Es-Saheb, M., Elzatahry, A., Sherif, E., Alkaraki, A., & Kenawy, E. (2012). A Novel Electrospinning Application for Polyvinyl Chloride Nanofiber Coating Deposition as a Corrosion Inhibitor for Aluminum, Steel, and Brass in Chloride Solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 5962-5976.
- Fabrega, J., Fawcett, S., Renshaw, J., & Lead, J. (2009). Silver Nanoparticle Impact on Bacterial Growth: Effect of pH, Concentration, and Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 43(19), 7285-7290. doi: 10.1021/es803259g
- Fang, H., Xu, L., & Chan, K. (2002). Effects of toxic metals and chemicals on biofilm and biocorrosion. *Water Research*, 36(19), 4709-4716. doi: 10.1016/s0043-1354(02)00207-5
- Frankel, G. (2003). Pitting Corrosion (pp. 236-241). ASM International.
- Friend, W., & Cohen, M. (1980). Corrosion of Nickel and Nickel-Base Alloys. *Journal of The Electrochemical Society*, 127(8), 421C-421C. doi: 10.1149/1.2130025
- Garcia-Gonzales, D., Popoola, O., Bright, V., Paulson, S., Wang, Y., Jones, R., & Jerrett, M. (2019). Associations among particulate matter, hazardous air pollutants and methane emissions from the Aliso Canyon natural gas storage facility during the 2015 blowout. *Environment International*, 132, 104855. doi: 10.1016/j.envint.2019.05.049
- González, E. A., Leiva, N., Vejar, N., Sancy, M., Gulppi, M., Azócar, M. I., & Páez, M. A. (2019). Sol-gel coatings doped with encapsulated silver nanoparticles: inhibition of biocorrosion on 2024-T3 aluminum alloy promoted by *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1809-1818. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.011>
- Gou, Y., Zhou, R., Ye, X., Gao, S., & Li, X. (2015). Highly efficient in vitro biosynthesis of silver nanoparticles using *Lysinibacillus sphaericus* MR-1 and their characterization. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(1), 015004. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/1/015004>

- Greiner, A., & Wendorff, J. (2007). Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(30), 5670–5703. <https://doi.org/10.1002/anie.200604646>
- Gurunathan, S., Han, J. W., Kwon, D. N., & Kim, J. H. (2014). Enhanced antibacterial and anti-biofilm activities of silver nanoparticles against Gram-negative and Gram-positive bacteria. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-9-373>
- Hack, H. (2010). Galvanic corrosion (pp. 828-856). Philadelphia, Pa: Shreir's Corrosion.
- Haghi, A., & Akbari, M. (2007). Trends in electrospinning of natural nanofibers. *Physica Status Solidi (A)*, 204(6), 1830-1834. doi: 10.1002/pssa.200675301
- Hihara, L. H., Adler, R. P. I., & Latanision, R. M. (2013). *Environmental Degradation of Advanced and Traditional Engineering Materials* (1st ed.). ABD, Florida: CRC Press.
- Homayoni, H., Ravandi, S. A. H., & Valizadeh, M. (2009). Electrospinning of chitosan nanofibers: Processing optimization. *Carbohydrate Polymers*, 77(3), 656–661. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.02.008>
- Hou, J., Wang, L., Wang, C., Zhang, S., Liu, H., Li, S., & Wang, X. (2019). Toxicity and mechanisms of action of titanium dioxide nanoparticles in living organisms. *Journal of Environmental Sciences*, 75, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.06.010>
- Hulla, J., Sahu, S., & Hayes, A. (2015). Nanotechnology. *Human & Experimental Toxicology*, 34(12), 1318-1321. doi: 10.1177/0960327115603588
- Hunley, M., & Long, T. (2008). Electrospinning functional nanoscale fibers: a perspective for the future. *Polymer International*, 57(3), 385-389. doi: 10.1002/pi.2320
- Iribarren, A., Rivero, P., Berlanga, C., Larumbe, S., Miguel, A., Palacio, J., & Rodriguez, R. (2019). Multifunctional protective PVC-ZnO nanocomposite coatings deposited on aluminum alloys by electrospinning. *Coatings*, 9(4), 216. doi: 10.3390/coatings9040216
- Jacobson, G., & Director, P. (2007). Corrosion at Prudhoe bay: A lesson on the line. *Materials Science*, 46.
- Javaherdashti, R. (2008). *Microbiologically Influenced Corrosion: An Engineering Insight* (Engineering Materials and Processes) (2008th ed.). England, London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-074-2>
- Jiang, H., Manolache, S., Wong, A. C. L., & Denes, F. S. (2004). Plasma-enhanced deposition of silver nanoparticles onto polymer and metal surfaces for the generation of antimicrobial characteristics. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(3), 1411–1422. <https://doi.org/10.1002/app.20561>
- Jie, H., Xu, Q., Wei, L., & Min, Y. (2016). Etching and heating treatment combined approach for superhydrophobic surface on brass substrates and the consequent corrosion resistance. *Corrosion Science*, 102, 251-258. doi: 10.1016/j.corsci.2015.10.013
- Jigletsova, S., Rodin, V., Kholodenko, V., Zhirkova, N., & Alexandrova, N. (2004). Influence of nutrient medium composition on the direction of microbiologically induced corrosion. *CORROSION* 2004.
- Kailsa, S., Park, T., Rohit, J., & Koduru, J. (2019). Antimicrobial activity of silver nanoparticles (pp. 261-484). *Nanoparticles in Pharmacotherapy*.

- Kalimuthu, K., Suresh Babu, R., Venkataraman, D., Bilal, M., & Gurunathan, S. (2008). Biosynthesis of silver nanocrystals by *Bacillus licheniformis*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 65(1), 150–153. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.02.018>
- Kardas, M., Gozen, A., & Severcan, F. (2014). FTIR spectroscopy offers hints towards widespread molecular changes in cobalt-acclimated freshwater bacteria. *Aquatic Toxicology*, 155, 15-23. doi: 10.1016/j.aquatox.2014.05.027
- Katti, D. S., Robinson, K. W., Ko, F. K., & Laurencin, C. T. (2004). Bioresorbable nanofiber-based systems for wound healing and drug delivery: Optimization of fabrication parameters. *Journal of Biomedical Materials Research*, 70B(2), 286–296. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30041>
- Kenawy, E. R., Abdel-Hay, F. I., El-Newehy, M. H., & Wnek, G. E. (2009). Processing of polymer nanofibers through electrospinning as drug delivery systems. *Materials Chemistry and Physics*, 113(1), 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.07.081>
- Khamseh, H. (2017). The protective effect coating of modified nano silica and zycosil on the seven colors tile of the Qajar era (Case Study the Tile of Naser-Al-Din Mirzas House in Tehran). *Journal of Asian Scientific Research*, 7(10), 421–435. <https://doi.org/10.18488/journal.2.2017.710.421.435>
- Khil, M., Cha, D., Kim, H., Kim, I., & Bhattarai, N. (2003). Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing. *Journal Of Biomedical Materials Research*, 67B(2), 675-679. doi: 10.1002/jbm.b.10058
- Ki, C., Baek, D., Gang, K., Lee, K., Um, I., & Park, Y. (2005). Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin–formic acid solution. *Polymer*, 46(14), 5094-5102. doi: 10.1016/j.polymer.2005.04.040
- Kim, B., Lim, S., Daud, W., Gadd, G., & Chang, I. (2015). The biocathode of microbial electrochemical systems and microbially-influenced corrosion. *Bioresource Technology*, 190, 395-401. doi: 10.1016/j.biortech.2015.04.084
- Lee, J., Choi, K., Ghim, H., Kim, S., Chun, D., Kim, H., & Lyoo, W. (2004). Role of molecular weight of atactic Poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning. *Journal Of Applied Polymer Science*, 93(4), 1638-1646. doi: 10.1002/app.20602
- Li, D., & Xia, Y. (2004). Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel? *Advanced Materials*, 16(14), 1151–1170. <https://doi.org/10.1002/adma.200400719>
- Li, D., Wang, Y., & Xia, Y. (2004). Electrospinning nanofibers as uniaxially aligned arrays and layer-by-layer stacked films. *Advanced Materials*, 16(4), 361-366. doi: 10.1002/adma.200306226
- Li, J., Rong, K., Zhao, H., Li, F., Lu, Z., & Chen, R. (2013). highly selective antibacterial activities of silver nanoparticles against *Bacillus subtilis*. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13(10), 6806–6813. <https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7781>
- Little, B., Blackwood, D., Hinks, J., Lauro, F., Marsili, E., Okamoto, A., & Flemming, H. C. (2020). Microbially influenced corrosion—Any progress? *Corrosion Science*, 170, 108641. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108641>
- Liu, J., Liang, X., & Li, S. (2007). Effect of sulphate-reducing bacteria on the electrochemical impedance spectroscopy characteristics of 1Cr18Ni9Ti. *Journal Of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 14(5), 425-430. doi: 10.1016/s1005-8850(07)60084-x

- Liu, T., Pan, S., Wang, Y., Guo, Z., Wang, W., Zhao, Q., & Guo, N. (2020). *Pseudoalteromonas lipolytica* accelerated corrosion of low alloy steel by the endogenous electron mediator pyomelanin. *Corrosion Science*, 162, 108215. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108215>
- Lopez, D., Vlamakis, H., & Kolter, R. (2010). Biofilms. *Cold Spring Harbor Perspectives In Biology*, 2(7), a000398-a000398. doi: 10.1101/cshperspect.a000398
- Ma, P., & Zhang, R. (1999). Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix. *Journal Of Biomedical Materials Research*, 46(1), 60-72. doi: 10.1002/(sici)1097-4636(199907)46:1<60::aid-jbm7>3.0.co;2-h
- MacDiarmid, A., Jones, W., Norris, I., Gao, J., Johnson, A., Pinto, N., & Llaguno, M. (2001). Electrostatically-generated nanofibers of electronic polymers. *Synthetic Metals*, 119(1-3), 27-30. [https://doi.org/10.1016/s0379-6779\(00\)00597-x](https://doi.org/10.1016/s0379-6779(00)00597-x)
- Madhan Kumar, A., & Gasem, Z. M. (2015). Effect of functionalization of carbon nanotubes on mechanical and electrochemical behavior of polyaniline nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 276, 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.036>
- Madigan, M., Martinko, J., & Parker, J. (2003). *Brock biology of microorganism*. Upper Saddle River, New Jersey.
- Makarov, V., Love, A., Sinitsyna, O., Makarova, S., Yaminsky, I., Taliansky, M., & Kalinina, N. (2014). "Green" Nanotechnologies: Synthesis of Metal Nanoparticles Using Plants. *Acta Naturae*, 6(1), 35-44. doi: 10.32607/20758251-2014-6-1-35-44
- Makhlouf, A., & Tiginyanu, I. (2011). *Nanocoatings and ultra-thin films*. Oxford: Woodhead Publishing.
- Mamun, A., Blachowicz, T., & Sabantina, L. (2021). Electrospun Nanofiber Mats for Filtering Applications—Technology, Structure and Materials. *Polymers*, 13(9), 1368. doi: 10.3390/polym13091368
- McKee, M., Layman, J., Cashion, M., & Long, T. (2006). Phospholipid Nonwoven Electrospun Membranes. *Science*, 311(5759), 353-355. doi: 10.1126/science.1119790
- McNeil, S. (2005). Nanotechnology for the biologist. *Journal Of Leukocyte Biology*, 78(3), 585-594. doi: 10.1189/jlb.0205074
- Megelski, S., Stephens, J., Chase, D., & Rabolt, J. (2002). Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer Fibers. *Macromolecules*, 35(22), 8456-8466. doi: 10.1021/ma020444a
- Metikoš-Huković, M., & Babić, R. (2007). Passivation and corrosion behaviours of cobalt and cobalt-chromium-molybdenum alloy. *Corrosion Science*, 49(9), 3570-3579. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.023>
- Mittal, A., Chisti, Y., & Banerjee, U. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advances*, 31(2), 346-356. doi: 10.1016/j.biotechadv.2013.01.003
- Mit-uppatham, C., Nithitanakul, M., & Supaphol, P. (2004). Ultrafine electrospun Polyamide-6 fibers: effect of solution conditions on morphology and average fiber diameter. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 205(17), 2327-2338. doi: 10.1002/macp.200400225

- Mody, V., Siwale, R., Singh, A., & Mody, H. (2010). Introduction to metallic nanoparticles. *Journal Of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 2(4), 282. doi: 10.4103/0975-7406.72127
- Mohd Rasol, R., Abu Bakar, A., Md Noor, N., Nordin, Y., & Ismail, M. (2015). Microbiologically induced corrosion monitoring using open-circuit potential (OCP) measurements. *solid state phenomena*, 227, 294-297. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.227.294
- Munger, C. G. (1984). *Corrosion prevention by protective coatings*. Houston: National Association of Corrosion Engineers.
- NACE International Launches Corrosion Research Consortia to Reduce Global Corrosion Threat. (2017).
- Naeimirad, M., Zadhoush, A., Kotek, R., Esmaeely Neisiany, R., Nouri Khorasani, S., & Ramakrishna, S. (2018). Recent advances in core/shell bicomponent fibers and nanofibers: A review. *Journal Of Applied Polymer Science*, 135(21), 46265. doi: 10.1002/app.46265
- Naitō, M., Yokoyama, T., Hosokawa, K., & Nogi, K. (2018). *Nanoparticle technology handbook*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Shokouhimehr, M., & Varma, R. (2019). Recent developments in palladium (nano)catalysts supported on polymers for selective and sustainable oxidation processes. *Coordination Chemistry Reviews*, 397, 54-75. doi: 10.1016/j.ccr.2019.06.010
- Otari, S., Patil, R., Ghosh, S., Thorat, N., & Pawar, S. (2015). Intracellular synthesis of silver nanoparticle by actinobacteria and its antimicrobial activity. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.10.003>
- Papenfort, K., & Bassler, B. L. (2016). Quorum sensing signal–response systems in Gram-negative bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 576–588. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.89>
- Patra, J., & Baek, K. (2014). Green Nanobiotechnology: factors affecting synthesis and characterization techniques. *Journal Of Nanomaterials*, 2014, 1-12. doi: 10.1155/2014/417305
- Pedefferri, P. (1996). Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction And Building Materials*, 10(5), 391-402. doi: 10.1016/0950-0618(95)00017-8
- Pokorna, D., & Zabranska, J. (2015). Sulfur-oxidizing bacteria in environmental technology. *Biotechnology Advances*, 33(6), 1246–1259. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.02.007>
- Postgate, J. R. (1984). *The sulphate-reducing bacteria*. Cambridge Cambridge University Press.
- Pourbaix, M. (2012). *Lectures on Electrochemical Corrosion*. New York, United States: Springer Publishing.
- Pu, Y., Zheng, J., Chen, F., Long, Y., Wu, H., & Li, Q. et al. (2018). Preparation of Polypropylene micro and nanofibers by electrostatic-assisted melt blown and their application. *Polymers*, 10(9), 959. doi: 10.3390/polym10090959
- Qiu, S., Chen, C., Zheng, W., Li, W., Zhao, H., & Wang, L. (2017). Long-term corrosion protection of mild steel by epoxy coating containing self-doped polyaniline nanofiber. *Synthetic Metals*, 229, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2017.05.004>

- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Yong, T., Ma, Z., & Ramaseshan, R. (2006). Electrospun nanofibers: solving global issues. *Materials Today*, 9(3), 40–50. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(06\)71389-x](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(06)71389-x)
- Raveendran, P., Fu, J., & Wallen, S. (2003). Completely “Green” Synthesis and Stabilization of Metal Nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, 125(46), 13940-13941. doi: 10.1021/ja029267j
- Revie, R. (2000). *Uhlig's Corrosion Handbook*, 2nd Edition (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Rivero, P. J., Fuertes, J. P., Vicente, A., Mata, L., Palacio, J. F., Monteserín, M., & Rodríguez, R. (2021). Modeling experimental parameters for the fabrication of multifunctional surfaces composed of electrospun PCL/ZnO-NPs nanofibers. *Polymers*, 13(24), 4312. <https://doi.org/10.3390/polym13244312>
- Rosid, S., Ajji, A., Hasbullah, H., Rosid, S., Ismail, A., & Goh, P. (2021). Physicochemical characteristics of polysulfone nanofiber membranes with iron oxide nanoparticles via electrospinning. *Journal Of Applied Polymer Science*, 139(8), 51661. doi: 10.1002/app.51661
- San Keskin, N. O., Celebioglu, A., Uyar, T., & Tekinay, T. (2015). Microalgae immobilized by nanofibrous web for removal of reactive dyes from wastewater. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(21), 5802–5809. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01033>
- San Keskin, N. O., Yaylaci, E., Durgun, S. G., Deniz, F., & Nazır, H. (2021). Anticorrosive properties of green silver nanoparticles to prevent microbiologically influenced corrosion on copper in the marine environment. *Journal of Marine Science and Application*, 20(1), 10–20. <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00188-6>
- Santana Rodríguez, J., Santana Hernández, F., & González González, J. (2006). Study of the electrochemical behaviour of 304 stainless steel in postgate medium in the presence and absence of *Desulfovibrio desulfuricans*. *Materials And Corrosion*, 57(10), 778-782. doi: 10.1002/maco.200503968
- Sekar, S., Mahadevan, S., Kumar, S., & Mandal, A. (2010). Thermokinetic responses of the metabolic activity of *Staphylococcus lentus* cultivated in a glucose limited mineral salt medium. *Journal Of Thermal Analysis and Calorimetry*, 104(1), 149-155. doi: 10.1007/s10973-010-1121-1
- Shaker, M. A., & Shaaban, M. I. (2017). Synthesis of silver nanoparticles with antimicrobial and anti-adherence activities against multidrug-resistant isolates from *Acinetobacter baumannii*. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 12(4), 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2017.02.008>
- Shedbalkar, U., Singh, R., Wadhvani, S., Gaidhani, S., & Chopade, B. (2014). Microbial synthesis of gold nanoparticles: Current status and future prospects. *Advances In Colloid and Interface Science*, 209, 40-48. doi: 10.1016/j.cis.2013.12.011
- Shkodenko, L., Kassirov, I., & Koshel, E. (2020). Metal oxide nanoparticles against bacterial biofilms: perspectives and limitations. *Microorganisms*, 8(10), 1545. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101545>
- Shrivastava, S., Bera, T., Roy, A., Singh, G., Ramachandrarao, P., & Dash, D. (2007). Characterization of enhanced antibacterial effects of novel silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 18(22), 225103. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/22/225103>
- Sims, C. (1987). *Superalloys II*. New York: J. Wiley & Sons.

- Sinha, S., Paul, D., Halder, N., Sengupta, D., & Patra, S. (2014). Green synthesis of silver nanoparticles using fresh water green alga *Pithophora oedogonia* (Mont.) Wittrock and evaluation of their antibacterial activity. *Applied Nanoscience*, 5(6), 703-709. doi: 10.1007/s13204-014-0366-6
- Slabaugh, W. H., & Grotheer, M. (1954). Mechanism of filiform corrosion. *Industrial & Engineering Chemistry*, 46(5), 1014-1016. <https://doi.org/10.1021/ie50533a053>
- Sleytr, U. (1997). I. Basic and applied S-layer research: an overview. *FEMS Microbiology Reviews*, 20(1-2), 5-12. doi: 10.1016/s0168-6445(97)00039-9
- Stott, J. (1993). What progress in the understanding of microbially induced corrosion has been made in the last 25 years? A personal viewpoint. *Corrosion Science*, 35(1-4), 667-673. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(93\)90202-r](https://doi.org/10.1016/0010-938x(93)90202-r)
- Sukigara, S., Gandhi, M., Ayutsede, J., Micklus, M., & Ko, F. (2003). Regeneration of *Bombyx mori* silk by electrospinning—part 1: processing parameters and geometric properties. *Polymer*, 44(19), 5721-5727. doi: 10.1016/s0032-3861(03)00532-9
- Sun, B., Long, Y., Zhang, H., Li, M., Duvail, J., Jiang, X., & Yin, H. (2014). Advances in three-dimensional nanofibrous macrostructures via electrospinning. *Progress in Polymer Science*, 39(5), 862-890. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.06.002>
- Sutherland, I. W. (2001). The biofilm matrix – an immobilized but dynamic microbial environment. *Trends in Microbiology*, 9(5), 222-227. [https://doi.org/10.1016/S0966-842X\(01\)02012-1](https://doi.org/10.1016/S0966-842X(01)02012-1)
- Süpüren, G., Kırıcı, T., Kanat, Z., Gülümser, T., Çay, A., & Tarakçıoğlu, I. (2007). Nano Fibres. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 1, 83-89.
- Swamy, M., & Sinniah, U. (2015). A comprehensive review on the phytochemical constituents and pharmacological activities of *Pogostemon cablin* Benth.: An aromatic medicinal plant of industrial importance. *Molecules*, 20(5), 8521-8547. doi: 10.3390/molecules20058521
- Tang, K., Baskaran, V., & Nemati, M. (2009). Bacteria of the sulphur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 73-94. doi: 10.1016/j.bej.2008.12.011
- Thanh, N. T., & Green, L. A. (2010). Functionalisation of nanoparticles for biomedical applications. *Nano Today*, 5(3), 213-230. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2010.05.003>
- Thomas, R., Janardhanan, A., Varghese, R. T., Soniya, E., Mathew, J., & Radhakrishnan, E. (2014). Antibacterial properties of silver nanoparticles synthesized by marine *Ochrobactrum sp.* *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(4), 1221-1227. <https://doi.org/10.1590/s1517-83822014000400012>
- Tkachenko, A., Xie, H., Coleman, D., Glomm, W., Ryan, J., & Anderson, M. et al. (2003). Multifunctional gold nanoparticle-peptide complexes for nuclear targeting. *Journal of the American Chemical Society*, 125(16), 4700-4701. doi: 10.1021/ja0296935
- Toriello, M., Afsari, M., Shon, H., & Tijing, L. (2020). Progress on the fabrication and application of electrospun nanofiber composites. *Membranes*, 10(9), 204. doi: 10.3390/membranes10090204
- Uhlig, H. (2011). *Uhlig's corrosion handbook*. Hoboken, N.J.: Wiley.

- Urquidi-Macdonald, M., Tewari, A., & Ayala H., L. F. (2014). A neuro-fuzzy knowledge-based model for the risk assessment of microbiologically influenced corrosion in crude oil pipelines. *CORROSION*, 70(11), 1157–1166. <https://doi.org/10.5006/1174>
- Verderosa, A. D., Totsika, M., & Fairfull-Smith, K. E. (2019). Bacterial biofilm eradication agents: A current review. *Frontiers in Chemistry*, 7, 824 <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00824>
- Videla, H.A. (1996). *Manual of Biocorrosion*. Boca Raton: Routledge.
- Videla, H.A., & Herrera, L. (2005). Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. *International Microbiology*, 8(3), 169-180.
- Videla, H.A., & Herrera, L. (2009). Understanding microbial inhibition of corrosion. A comprehensive overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(7), 896-900. doi: 10.1016/j.ibiod.2009.02.002
- Welle, A., Kröger, M., Döring, M., Niederer, K., Pindel, E., & Chronakis, I. (2007). Electrospun aliphatic polycarbonates as tailored tissue scaffold materials. *Biomaterials*, 28(13), 2211-2219. doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.01.024
- Wendorff, J., Agarwal, S., & Greiner, A. (2012). *Electrospinning*. Weinheim: John Wiley & Sons, Inc.
- World Health Organization. (2014). *Antimicrobial resistance: global report on surveillance*. World Health Organization.
- Wypij, M., Czarnecka, J., Świecimska, M., Dahm, H., Rai, M., & Golinska, P. (2018). Synthesis, characterization and evaluation of antimicrobial and cytotoxic activities of biogenic silver nanoparticles synthesized from *Streptomyces xinghaiensis* OF1 strain. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34(2). doi: 10.1007/s11274-017-2406-3
- Xu, Z. P., Zeng, Q. H., Lu, G. Q., & Yu, A. B. (2006). Inorganic nanoparticles as carriers for efficient cellular delivery. *Chemical Engineering Science*, 61(3), 1027–1040. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.06.019>
- Xue, J., Wu, T., Dai, Y., & Xia, Y. (2019). Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications. *Chemical Reviews*, 119(8), 5298–5415. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00593>
- Yadav, A., Kumar, R., Choudhary, H. K., & Sahoo, B. (2018). Graphene-oxide coating for corrosion protection of iron particles in saline water. *Carbon*, 140, 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.062>
- Yao, Y., Sun, H., Zhang, Y., & Yin, Z. (2020). Corrosion protection of epoxy coatings containing 2-hydroxyphosphonocarboxylic acid doped polyaniline nanofibers. *Progress in Organic Coatings*, 139, 105470. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105470>
- Yordem, O., Papila, M., & Menciloğlu, Y. (2008). Effects of electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology. *Materials & Design*, 29(1), 34-44. doi: 10.1016/j.matdes.2006.12.013
- Yu, Z., Zhang, Wu, Ning, & Zuo. (2019). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings on Zinc for Anti-Corrosion in Alkaline Solution by Electrospinning. *Coatings*, 9(11), 692. doi: 10.3390/coatings9110692
- Yuan, X., Zhang, Y., Dong, C., & Sheng, J. (2004). Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning. *Polymer International*, 53(11), 1704-1710. doi: 10.1002/pi.1538

- Yuris. D. (2004). Spinning Continuous Fibers for Nanotechnology. *Science*, 304(5679), 1917-1919. doi: 10.1126/science.1099074
- Zhang, K., Li, X., Yu, C., & Wang, Y. (2020). Promising Therapeutic Strategies Against Microbial Biofilm Challenges. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10, 359. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2020.00359>
- Zhang, Y., Venugopal, J., Huang, Z., Lim, C., & Ramakrishna, S. (2005). Characterization of the surface biocompatibility of the electrospun PCL-Collagen nanofibers using fibroblasts. *Biomacromolecules*, 6(5), 2583-2589. doi: 10.1021/bm050314k
- Zhu, K., Li, X., Wang, H., Li, J., & Fei, G. (2016). Electrochemical and anti-corrosion behaviors of water dispersible graphene/acrylic modified alkyd resin latex composites coated carbon steel. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(11). <https://doi.org/10.1002/app.44445>
- Zuo, W., Zhu, M., Yang, W., Yu, H., Chen, Y., & Zhang, Y. (2005). Experimental study on relationship between jet instability and formation of beaded fibers during electrospinning. *Polymer Engineering & Science*, 45(5), 704-709. doi: 10.1002/pen.2030
- İnternet: <https://www.rcinet.ca/en/2021/04/24/corrosion-costs-the-world-an-estimated-2-5-trillion-usd> Erişim Tarihi: 04.07.2022
- İnternet: <http://cshprotocols.cshlp.org/content/2012/2/pdb.rec068270.full> Erişim Tarihi: 04.07.2022
- İnternet: <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx> Erişim Tarihi: 04.07.2022

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Deniz Furkan

Uyruğu : Türkiye

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi	2022
Lisans	Gazi Üniversitesi	2017
Lise	Şişli Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Endüstri	2012

### İş Deneyimi

-

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

- 1- Keskin, S., Oya, N., Yaylaci, E., Durgun, S. G., Deniz, F., & Nazır, H. (2021). Anticorrosive Properties of Green Silver Nanoparticles to Prevent Microbiologically Influenced Corrosion on Copper in the Marine Environment. *Journal of Marine Science and Application*, 20(1), 10-20.
- 2- San Keskin, N. O., Deniz, F., & Nazır, H. (2020). Anti microbial corrosion properties of electrospun cellulose acetate nanofibers containing biogenic silver nanoparticles for copper coatings. *RSC Advances*, 10(65), 39901-39908.
- 3- Deniz, F., Nazır, H., San Keskin, N.O. (2022). Synergistic antibacterial and anticorrosive effect of polysulfone nanofiber embedded with biogenic silver nanoparticles for microbiologically influenced corrosion of nickel. *ChemistrySelect*. Accepted.



